

Σύστημα Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων  
για τη Νόσο των Ανευρυσμάτων Κοιλιακής Αορτής  
Βασισμένο σε Μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης



Παραδοτέο Π4.4.  
Λογισμικό Ψηφίδα

<b>Όνομα Αρχείου:</b>	Safe-Aorta-D4.4-v1.0 - Λογισμικό Ψηφίδα.pdf	<b>Επίπεδο Διάδοσης:</b>	Απόρρητο
<b>Ημερομηνία Υποβολής:</b>	Δεκέμβριος 2025 (M28)	<b>Κωδικός Έργου:</b>	TAEDR-0535983
<b>Κοινοπραξία:</b>	ΕΜΠ, ΠΔΜ, ΠΚ, ΕΛΜΕΠΑ, ΠΑΔΑ, ΠΒΕΑΑ, ΠΑΠΕΛ	<b>Υπεύθυνος Παραδοτέου:</b>	ΕΛΚΕ ΠΔΜ
<b>Διάρκεια:</b>	28 μήνες	<b>Κατάσταση:</b>	Τελική έκδοση



**ΛΙΣΤΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ**

<b>Συγγραφείς</b>				
<b>#</b>	<b>Επίθετο</b>	<b>Όνομα</b>	<b>Φορέας</b>	<b>Email Επικοινωνίας</b>
1	Τζημούρτα	Αικατερίνη	ΕΛΚΕ ΠΔΜ	<a href="mailto:ktzimourta@uowm.gr">ktzimourta@uowm.gr</a>
2	Τσίπουρας	Μάρκος	ΕΛΚΕ ΠΔΜ	<a href="mailto:mtsipouras@uowm.gr">mtsipouras@uowm.gr</a>
3	Αγγελίδης	Αικατερίνη	ΕΛΚΕ ΠΔΜ	<a href="mailto:paggelidis@uowm.gr">paggelidis@uowm.gr</a>
4	Κατσούλη	Παρασκευή	ΕΛΚΕ ΠΔΜ	<a href="mailto:vivikatsouli@gmail.com">vivikatsouli@gmail.com</a>
5	Σμυρλής	Παναγιώτης	ΕΛΚΕ ΠΔΜ	<a href="mailto:pan.smyrlis@gmail.com">pan.smyrlis@gmail.com</a>
6	Ντέτσκα	Αιμιλία	ΕΛΚΕ ΠΔΜ	<a href="mailto:a.ntetska@uowm.gr">a.ntetska@uowm.gr</a>
7	Δημαράκη	Φωτεινή	ΕΛΚΕ ΠΔΜ	<a href="mailto:fodim96@gmail.com">fodim96@gmail.com</a>
<b>Συν-συγγραφείς</b>				
<b>#</b>	<b>Επίθετο</b>	<b>Όνομα</b>	<b>Φορέας</b>	<b>Email Επικοινωνίας</b>
1	Αθανασιάδης	Εμμανουήλ	ΠΑΔΔΑ	
2	Αραμπατζής	Δημήτριος	ΠΑΔΔΑ	
3	Θεοδωρακόπουλος	Ηλίας	ΠΑΔΔΑ	
4	Κάβουρας	Διονύσης	ΠΑΔΔΑ	
5	Τζιρτζιλάκης	Ευστράτιος	ΠΑΠΕΛ	
6	Ξένος	Μιχαήλ	ΠΑΠΕΛ	
7	Αραβανής	Θεοφάνης	ΠΑΠΕΛ	
8	Φουρνιώτης	Νικόλαος	ΠΑΠΕΛ	
9	Χρηματόπουλος	Γρηγόριος	ΠΑΠΕΛ	
10	Κυριακούδη	Κωνσταντίνα	ΠΑΠΕΛ	
11	Κατσούδας	Σπυρίδων	ΠΑΠΕΛ	
12	Ασλάνη	Κυριακή-Ευαγγελία	ΠΑΠΕΛ	
13	Τσικνάκης	Εμμανουήλ	ΕΛΜΕΠΑ	
14	Μαριάς	Κωνσταντίνος	ΕΛΜΕΠΑ	
15	Τζιράκης	Κωνσταντίνος	ΕΛΜΕΠΑ	
16	Ζερβάκης	Μιχάλης	ΠΚ	
17	Σταυρουλάκης	Γιώργος	ΠΚ	
18	Ουγγρινης	Κωνσταντίνος-Αλκέτας	ΠΚ	
19	Πετράκης	Ευριπίδης	ΠΚ	

20	Διαγγελάκης	Νικόλαος	ΠΚ	
21	Αντωνακάκης	Μάριος	ΠΚ	
22	Μπέη	Αικατερίνη	ΠΚ	
23	Μοιρογιώργου	Κωνσταντία	ΠΚ	
24	Κλαδοβασιλάκης	Νίκος	ΠΚ	
25	Καρασμανόγλου	Απόστολος	ΠΚ	
26	Πολιτώφ	Κωνσταντίνος	ΠΚ	
27	Δαράκη	Μαρία Στυλιανή	ΠΚ	
28	Λιάπη	Μαριάνθη	ΠΚ	
29	Χριστουλάκης	Μάριος	ΠΚ	
30	Ιωαννίδης	Μάριος	ΠΚ	
31	Αγγελίδης	Παντελής	ΠΔΜ	
32	Τσίπουρας	Μάρκος	ΠΔΜ	
33	Τζημούρτα	Αικατερίνη	ΠΔΜ	
34	Κατσούλη	Παρασκευή	ΠΔΜ	

#### ΛΙΣΤΑ ΚΡΙΤΩΝ

Κριτές				
#	Επίθετο	Όνομα	Φορέας	Email Επικοινωνίας
1	Χρήστος	Μανόπουλος	ΕΛΚΕ ΕΜΠ	<a href="mailto:manopoul@central.ntua.gr">manopoul@central.ntua.gr</a>
2	Αναστάσιος	Ράπτης	ΕΛΚΕ ΕΜΠ	<a href="mailto:raptistasos@mail.ntua.gr">raptistasos@mail.ntua.gr</a>

#### ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ

Έκδοση	Συγγραφέας	Ημερομηνία	Κατάσταση
0.1			Προσχέδιο
0.2			
0.3			
0.4			Τελικό

# Περιεχόμενα

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
Πίνακας Σχημάτων	2
Λίστα Συντομογραφιών	3
Περίληψη	4
1. Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός του παραδοτέου	1
1.2 Υπόβαθρο	2
1.3 Δομή του Εγγράφου	2
2. Γενική Περιγραφή του Συστήματος Ψηφίδα	3
2.1 Αντικείμενο και Στόχοι.	3
2.2 Ευθυγράμμιση με τις Απαιτήσεις Χρήστη και Συστήματος	4
2.2.1 Συμμόρφωση με τις Απαιτήσεις Χρήστη	5
2.2.2 Συμμόρφωση με τις Απαιτήσεις Συστήματος	6
2.3 Μεθοδολογία Ανάπτυξης του Υποσυστήματος Ψηφίδα	7
2.3.1 Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδιασμός	8
2.3.2 Έλεγχος Ποιότητας, Ασφάλειας και Συμμόρφωσης	8
2.4 Ενσωμάτωση και Διασύνδεση με την Πλατφόρμα SAFE-AORTA	9
3. Αρχιτεκτονική και Τεχνικές Προδιαγραφές Συστήματος	10
3.1 Συνολική Αρχιτεκτονική Ψηφίδα	10
3.2 Τεχνολογίες Υλοποίησης	11
3.2.1 Διαδικτυακές Υπηρεσίες και Επίπεδο Εφαρμογής	11
3.2.2 Υπολογιστικός Πυρήνας και Μονάδες Ανάλυσης	12
3.2.3 Φορητότητα και Αναπαραγωγιμότητα	13
3.2.4 Διαλειτουργικότητα, Πρότυπα και Ασφάλεια	13
3.3 Ενσωμάτωση Μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης	14
3.3.2 Υπολογιστική Ροή, Pipelines Επεξεργασίας	14
3.3.3 Εκτέλεση, Διαχείριση Εκδόσεων και Αναπαραγωγιμότητα	15
3.3.4 Ποιότητα, Παρακολούθηση και Ασφάλεια Λειτουργίας	15
4. Υπολογιστικές και Αναλυτικές Μονάδες του Λογισμικού Ψηφίδα	16
4.1 Μονάδα Επεξεργασίας Ιατρικής Εικόνας	16

4.2	Μονάδα Μορφολογικής Ανάλυσης	16
4.3	Αιμοδυναμική Μονάδα	17
4.4	Μονάδα Μηχανικής Τοιχώματος	17
5.	Λειτουργικές Ενότητες του Συστήματος	17
5.1	Οπτικοποίηση και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	17
5.2	Ενότητα Ανάλυσης και Εκτίμησης Κινδύνου Ρήξης	20
5.3	Διαχείριση Χρηστών, Πρόσβασης και Ιατρικών Δεδομένων	21
6.	Οδηγός Χρήσης	21
7.	Συμπεράσματα	23
7.	Βιβλιογραφία	23

## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Λειτουργία του <b>ΨηφιΔΑ</b> και της ροής δεδομένων μεταξύ χρηστών, υπολογιστικών ενοτήτων και κλινικών αποτελεσμάτων.	5
Σχήμα 2: Απαιτήσεις συστήματος του <b>ΨηφιΔΑ</b>	6
Σχήμα 3: Διαδικασία Ανάπτυξης και Ενσωμάτωσης του <b>ΨηφιΔΑ</b> στο <b>SAFE-AORTA</b>	7
Σχήμα 4: Αρχιτεκτονική Υποσυστήματος <b>ΨηφιΔΑ</b>	10
Σχήμα 5: Αρχική Αξιολόγηση ασθενούς με Ύποπτο Ανεύρυσμα	18
Σχήμα 6: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση της γεωμετρίας του ανευρύσματος και της αορτής.	19
Σχήμα 7: Στιγμιότυπο διαχρονικής ανάλυσης και σύγκριση παλαιότερων εξετάσεων	20
Σχήμα 8: Ροή χρήσης του <b>ΨηφιΔΑ</b> στο πλαίσιο της πλατφόρμας <b>SAFE-AORTA</b> .	22

## Λίστα Συντομογραφιών

Συντομογραφία	Ορισμός
ΑΚΑ	Ανεύρυσμα Κοιλιακής Αορτής
ΨΗΦΙΔΑ	Ψηφιακό Δίδυμο Αορτής
ΣΥΠΟΚΑ	Σύστημα Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων
CT	Αξονική τομογραφία
CTA	Αξονική αγγειογραφία
MRI	Μαγνητική τομογραφία
TN	Τεχνητή Νοημοσύνη

## Περίληψη

Το παρόν έγγραφο αποτελεί παραδοτέο για το έργο **SAFE-AORTA**, το οποίο χρηματοδοτείται από το Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας στο πλαίσιο του προγράμματος «Ελλάδα 2.0 – Εθνικό Σχέδιο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας», της δράσης «Εμβληματικές δράσεις σε διαθεματικές επιστημονικές περιοχές με ειδικό ενδιαφέρον για τη σύνδεση με τον παραγωγικό ιστό» (ID 16618), με κωδικό ΟΠΣ ΤΑ 5149305. Το παραδοτέο Π4.4 αφορά το λογισμικό του **Ψηφιακού Διδύμου Αορτής (ΨηφιΔΑ)**, το οποίο αναπτύχθηκε ως βασικό υποσύστημα της πλατφόρμας SAFE-AORTA και του Συστήματος Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων (ΣΥΠΟΚΑ) για τη νόσο των Ανευρυσμάτων Κοιλιακής Αορτής.

Η παρούσα έκθεση δεν συνιστά το ίδιο το λογισμικό παραδοτέο, αλλά λειτουργεί ως συμπληρωματική τεχνική και λειτουργική τεκμηρίωση του **ΨηφιΔΑ**. Περιγράφει τη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος, τις βασικές υπολογιστικές και λειτουργικές ενότητες, τις τεχνολογίες υλοποίησης και τον τρόπο ενσωμάτωσής του στην ευρύτερη υποδομή του **SAFE-AORTA**. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αξιοποίηση μοντέλων Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης για την ανάλυση απεικονιστικών δεδομένων, την παραγωγή εξατομικευμένων ψηφιακών αναπαραστάσεων της αορτής και τον υπολογισμό μη επεμβατικών βιοδεικτών μορφολογίας, αιμοδυναμικής και μηχανικής του ανευρυσματικού τοιχώματος.

Στόχος της έκθεσης είναι να υποστηρίξει την κατανόηση, την αξιολόγηση και την ορθή αξιοποίηση του λογισμικού από κλινικούς και τεχνικούς χρήστες, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια, την αξιοπιστία και τη βιώσιμη αξιοποίηση του παραδοτέου στο πλαίσιο του έργου **SAFE-AORTA**.

# 1. Εισαγωγή

Το παραδοτέο Π4.4 αφορά το λογισμικό του Ψηφιακού Διδύμου Αορτής (**ΨηφιΔΑ**), το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου **SAFE-AORTA** και αποτελεί βασικό υποσύστημα του Συστήματος Υποστήριξης Κλινικών Αποφάσεων (ΣΥΠΟΚΑ) για τη νόσο των Ανευρυσμάτων Κοιλιακής Αορτής (ΑΚΑ). Το λογισμικό **ΨηφιΔΑ** υλοποιεί μια ολοκληρωμένη ψηφιακή αναπαράσταση της αορτής και της παθολογικής της εξέλιξης, αξιοποιώντας ιατρικά δεδομένα, υπολογιστικά μοντέλα και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, με στόχο την υποστήριξη της κλινικής εκτίμησης και της λήψης αποφάσεων.

Η παρούσα έκθεση δεν συνιστά το ίδιο το παραδοτέο, αλλά λειτουργεί ως συμπληρωματική τεχνική και λειτουργική τεκμηρίωση του αναπτυγμένου λογισμικού **ΨηφιΔΑ**. Σκοπός της είναι η περιγραφή της αρχιτεκτονικής, των βασικών λειτουργικών ενοτήτων και του τρόπου χρήσης του συστήματος, ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση, η αξιολόγηση και η ορθή αξιοποίησή του από τους εμπλεκόμενους χρήστες και φορείς. Το λογισμικό έχει σχεδιαστεί ως μια επεκτάσιμη και διαλειτουργική ψηφιακή πλατφόρμα, ενσωματωμένη στην ευρύτερη υποδομή του **SAFE-AORTA**, η οποία υποστηρίζει τη διαχείριση ιατρικών δεδομένων, την εκτέλεση υπολογιστικών αναλύσεων και την παρουσίαση κλινικά αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του έργου και τις αρχές ασφάλειας, αξιοπιστίας και προστασίας ευαίσθητων δεδομένων.

## 1.1 Σκοπός του παραδοτέου

Ο σκοπός του παραδοτέου Π4.4 είναι η υλοποίηση και διάθεση του λογισμικού του **ΨηφιΔΑ**, το οποίο αποτελεί βασικό υποσύστημα της πλατφόρμας **SAFE-AORTA** και κεντρικό πυλώνα του ΣΥΠΟΚΑ για τη νόσο των ΑΚΑ. Το λογισμικό **ΨηφιΔΑ** παρέχει μια δυναμική, εξατομικευμένη ψηφιακή αναπαράσταση της αορτής κάθε ασθενούς, ενοποιώντας απεικονιστικά, κλινικά και υπολογιστικά δεδομένα με σκοπό την υποστήριξη της εκτίμησης κινδύνου και της κλινικής λήψης αποφάσεων.

Η παρούσα έκθεση λειτουργεί ως συνοδευτική τεχνική και λειτουργική τεκμηρίωση του αναπτυγμένου λογισμικού και δεν υποκαθιστά το ίδιο το παραδοτέο. Στόχος της είναι η συστηματική περιγραφή της αρχιτεκτονικής του **ΨηφιΔΑ**, των βασικών λειτουργικών ενοτήτων του και του τρόπου χρήσης του στο πλαίσιο της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**. Μέσω της τεκμηρίωσης αυτής, διευκολύνεται η κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος, η αξιολόγησή του από τους αρμόδιους φορείς και η αποτελεσματική αξιοποίησή του από κλινικούς και τεχνικούς χρήστες.

Πιο συγκεκριμένα, η έκθεση στοχεύει:

- στην τεκμηρίωση του ρόλου του **ΨηφιΔΑ** ως ψηφιακού και υπολογιστικού πυρήνα του **SAFE-AORTA**.
- στην επεξήγηση της ενσωμάτωσής του στην ευρύτερη υποδομή της πλατφόρμας.
- στην περιγραφή των παρεχόμενων λειτουργιών και της αλληλεπίδρασης του χρήστη με το σύστημα.
- στην αποτύπωση των αρχών ασφάλειας, αξιοπιστίας και προστασίας ευαίσθητων ιατρικών δεδομένων που διέπουν τη λειτουργία του λογισμικού.

Συνολικά, το παρόν έγγραφο αποτελεί τον συνδυαστικό κρίκο μεταξύ του υλοποιημένου λογισμικού του **ΨηφιΔΑ** και των τελικών χρηστών και αξιολογητών του έργου, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια, την ορθή χρήση και τη βιώσιμη αξιοποίηση του παραδοτέου Π4.4.

## 1.2 Υπόβαθρο

Η νόσος των ΑΚΑ αποτελεί μια σοβαρή αγγειακή πάθηση με υψηλό κίνδυνο ρήξης, η οποία συνεχίζει να προσελκύει ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της σύνθετης αιμοδυναμικής και μηχανικής συμπεριφοράς του αγγειακού τοιχώματος. Η συμβατική κλινική αξιολόγηση, πραγματοποιείται κυρίως από τη μέτρηση μέγιστης διαμέτρου του ανευρύσματος, έχει περιορισμένη προγνωστική αξία και δεν λαμβάνει υπόψη σύνθετους παραγοντικούς δείκτες που σχετίζονται με τη δομή και τη λειτουργία του αγγείου (Domanin et al., 2022; Moll et al., 2011)

Πρόσφατες μελέτες έχουν προωθήσει πολυπαραγοντικές και υπολογιστικές προσεγγίσεις που ενσωματώνουν αιμοδυναμικά χαρακτηριστικά, γεωμετρικούς δείκτες και μηχανικούς παράγοντες για την καλύτερη εκτίμηση κινδύνου εμφάνισης επιπλοκών στα ΑΚΑ (Masoumi Shahrababak et al., 2025). Η πρόοδος στην απεικόνιση υψηλής ανάλυσης και στις υπολογιστικές ροές έχει καταστήσει δυνατή τη λεπτομερή αναπαράσταση της ροής και της διατμητικής τάσης, στοιχεία που έχουν αποδειχθεί χρήσιμα στη διερεύνηση των βιοδεικτών κινδύνου (Yi et al., 2025).

Η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) στην υγεία αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη δημιουργία εξατομικευμένων, δυναμικά ενημερωμένων μοντέλων ασθενών που ενσωματώνουν πραγματικά δεδομένα, υπολογιστικές προσομοιώσεις και προγνωστικούς αλγορίθμους (El-Warrak & de Farias, 2024). Η εφαρμογή ψηφιακών διδύμων σε αγγειακές παθήσεις, συμπεριλαμβανομένων και των ανευρυσμάτων, επιτρέπει την αξιολόγηση της εξέλιξης της νόσου και την υποστήριξη κλινικών αποφάσεων με τρόπο που υπερβαίνει τις συμβατικές μεθόδους αξιολόγησης (Saratkar et al., 2025).

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης έχουν επιδείξει αξιοσημείωτη απόδοση στην επεξεργασία και ανάλυση ιατρικών εικόνων, καθώς και στην εξαγωγή σύνθετων δεικτών από πολυδιάστατα δεδομένα υψηλού όγκου, οδηγώντας σε βελτιωμένες προγνωστικές ικανότητες σε πολλές παθολογικές καταστάσεις (Ayhan et al., 2025; Sandeep Kumar & Satya Jayadev, 2020). Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνικών σε λογισμικά πλαίσια απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό με επίκεντρο την ασφάλεια, τη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια και τη διαλειτουργικότητα των δεδομένων.

Το **ΨηφιΔΑ** δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του **SAFE-AORTA** ως ολοκληρωμένη ψηφιακή πλατφόρμα που ενσωματώνει υπολογιστικά μοντέλα αιμοδυναμικής, προηγμένες αναλύσεις ιατρικών εικόνων και μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, με στόχο την ποσοτικοποίηση παραμέτρων που σχετίζονται με την εξέλιξη και τον κίνδυνο ρήξης των ανευρυσμάτων, και την υποστήριξη της λήψης κλινικών αποφάσεων.

## 1.3 Δομή του Εγγράφου

Η παρούσα έκθεση είναι δομημένη έτσι ώστε να καθοδηγεί τον αναγνώστη από το γενικό πλαίσιο και τους στόχους του έργου **SAFE-AORTA** προς την αναλυτική τεχνική και λειτουργική τεκμηρίωση του λογισμικού του **ΨηφιΔΑ**. Η διάρθρωση του εγγράφου ακολουθεί

τη λογική σταδιακής εμβάθυνσης, ξεκινώντας από το εννοιολογικό και μεθοδολογικό υπόβαθρο και καταλήγοντας στη λεπτομερή περιγραφή της αρχιτεκτονικής, της λειτουργικότητας και της ενσωμάτωσης του συστήματος.

**Ενότητα 1 – Εισαγωγή** παρουσιάζει τον σκοπό του παραδοτέου Π4.4, το υπόβαθρο της επιστημονικής και τεχνολογικής προσέγγισης του έργου **SAFE-AORTA** και τη θέση του **ΨηφιΔΑ** στο συνολικό οικοσύστημα του ΣΥΠΟΚΑ.

**Ενότητα 2 – Γενική Περιγραφή του Συστήματος ΨηφιΔΑ** περιγράφει το αντικείμενο και τους στόχους του υποσυστήματος, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο το λογισμικό ευθυγραμμίζεται με τις απαιτήσεις χρηστών και συστήματος που ορίστηκαν στο Παραδοτέο Π2.1. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάπτυξης και η ενσωμάτωση του υποσυστήματος **ΨηφιΔΑ** στην πλατφόρμα **SAFE-AORTA**.

**Ενότητα 3 – Αρχιτεκτονική και Τεχνικές Προδιαγραφές Συστήματος** εστιάζει στη συνολική αρχιτεκτονική του **ΨηφιΔΑ**, στις τεχνολογίες υλοποίησης και στις βασικές υπολογιστικές μονάδες του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης των μοντέλων Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης και της υπολογιστικής ροής επεξεργασίας δεδομένων.

**Ενότητα 4 – Λειτουργικές Ενότητες του Συστήματος** παρουσιάζει τις κύριες λειτουργίες του **ΨηφιΔΑ**, όπως η διαχείριση χρηστών και δικαιωμάτων πρόσβασης, η εισαγωγή και διαχείριση ιατρικών δεδομένων, η ανάλυση και εκτίμηση κινδύνου ρήξης, καθώς και η οπτικοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

**Ενότητα 6 – Συμπεράσματα** συνοψίζει τα βασικά σημεία του παραδοτέου Π4.4, αξιολογεί τον βαθμό τεχνικής και λειτουργικής ωρίμανσης του λογισμικού **ΨηφιΔΑ** και αναδεικνύει τη συμβολή του στο πλαίσιο του έργου **SAFE-AORTA** ως ολοκληρωμένου και αξιόπιστου ΣΥΠΟΚΑ.

## 2. Γενική Περιγραφή του Συστήματος ΨηφιΔΑ

Στο τμήμα αυτό εξετάζονται οι θεμελιώδεις αρχές σχεδιασμού του υποσυστήματος **ΨηφιΔΑ**, με έμφαση στον σκοπό λειτουργίας του και την ανταπόκρισή του στις απαιτήσεις των τελικών χρηστών. Επιπλέον, εξηγείται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την υλοποίηση των αρχικών προδιαγραφών σε λειτουργικό λογισμικό.

### 2.1 Αντικείμενο και Στόχοι.

Το αντικείμενο του συστήματος **ΨηφιΔΑ** είναι η παροχή μιας ολοκληρωμένης, δυναμικής και εξατομικευμένης ψηφιακής αναπαράστασης της αορτής ασθενών με ΑΚΑ, η οποία ενσωματώνει ετερογενή ιατρικά δεδομένα και υπολογιστικά μοντέλα σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον. Το **ΨηφιΔΑ** λειτουργεί ως ο υπολογιστικός πυρήνας του ΣΥΠΟΚΑ του **SAFE-AORTA**, συνδέοντας απεικονιστικά, κλινικά και δημογραφικά δεδομένα με προηγμένες αναλύσεις και προγνωστικές εκτιμήσεις.

Σε αντίθεση με στατικές προσεγγίσεις απεικόνισης ή απλής αποθήκευσης δεδομένων, το **ΨηφιΔΑ** υλοποιεί μια δυναμική ψηφιακή οντότητα που ενημερώνεται διαχρονικά, επιτρέποντας τη σύγκριση διαδοχικών εξετάσεων και την παρακολούθηση της εξέλιξης της

νόσου σε επίπεδο ατόμου. Η προσέγγιση αυτή καθιστά εφικτή την ποσοτικοποίηση της μορφολογικής και λειτουργικής μεταβολής της αορτής, καθώς και την υποστήριξη εξατομικευμένων κλινικών εκτιμήσεων.

Οι βασικοί στόχοι του συστήματος **ΨηφιΔΑ** συνοψίζονται ως εξής:

- **Ενοποίηση ετερογενών ιατρικών δεδομένων:** Συγκέντρωση απεικονιστικών δεδομένων (CT, CTA, MRI), κλινικών και δημογραφικών χαρακτηριστικών σε ένα ενιαίο ψηφιακό μοντέλο ασθενούς, διασφαλίζοντας τη συνοχή και τη διαλειτουργικότητα της πληροφορίας.
- **Δημιουργία δυναμικής ψηφιακής αναπαράστασης:** Ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου που αντικατοπτρίζει τη γεωμετρία και τη λειτουργική κατάσταση της αορτής και μπορεί να επικαιροποιείται με νέα δεδομένα, επιτρέποντας τη διαχρονική παρακολούθηση της νόσου.
- **Υποστήριξη προχωρημένης ανάλυσης και ποσοτικοποίησης:** Υπολογισμός μορφολογικών, αιμοδυναμικών και εμβιομηχανικών δεικτών, οι οποίοι εμπλουτίζουν την κλασική κλινική αξιολόγηση και προσφέρουν πολυπαραγοντική εκτίμηση του κινδύνου ρήξης.
- **Ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης:** Αξιοποίηση μοντέλων μηχανικής και βαθιάς μάθησης για την αυτοματοποιημένη ανάλυση απεικονιστικών δεδομένων και την πρόβλεψη της εξέλιξης της νόσου, με στόχο την παροχή κλινικά αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων.
- **Υποστήριξη της κλινικής λήψης αποφάσεων:** Παροχή ποσοτικοποιημένων και οπτικοποιημένων αποτελεσμάτων που λειτουργούν υποστηρικτικά προς τον κλινικό ιατρό, χωρίς να υποκαθιστούν την ιατρική κρίση.
- **Εξασφάλιση ασφάλειας και συμμόρφωσης:** Σχεδίαση και υλοποίηση του συστήματος σύμφωνα με τις αρχές ασφάλειας, προστασίας προσωπικών δεδομένων και κανονιστικής συμμόρφωσης, ώστε να είναι κατάλληλο για χρήση σε πραγματικό κλινικό περιβάλλον.

Συνολικά, το **ΨηφιΔΑ** στοχεύει στη μετάβαση από αποσπασματικές και μονοδιάστατες προσεγγίσεις παρακολούθησης των ΑΚΑ σε ένα ολοκληρωμένο, εξατομικευμένο και επιστημονικά τεκμηριωμένο ψηφιακό πλαίσιο υποστήριξης κλινικών αποφάσεων, το οποίο ενσωματώνεται λειτουργικά στο οικοσύστημα του **SAFE-AORTA**.

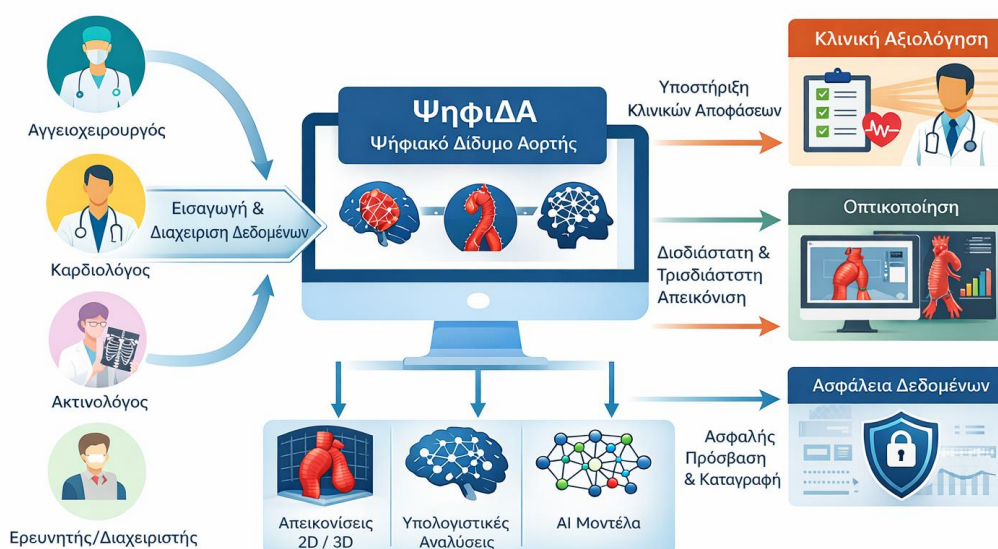
## 2.2 Ευθυγράμμιση με τις Απαιτήσεις Χρήστη και Συστήματος

Η ανάπτυξη του λογισμικού του **ΨηφιΔΑ** πραγματοποιήθηκε σε πλήρη ευθυγράμμιση με τις απαιτήσεις χρηστών και συστήματος που καθορίστηκαν στο *Παραδοτέο Π2.1 «Απαιτήσεις και Προδιαγραφές Συστήματος»*. Οι απαιτήσεις αυτές προέκυψαν μέσω συστηματικής ανάλυσης του πλαισίου χρήσης και της εφαρμογής της μεθοδολογίας VOLERE, και αποτέλεσαν το βασικό σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του **ΨηφιΔΑ**.

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο το αναπτυγμένο λογισμικό ανταποκρίνεται στις βασικές απαιτήσεις χρηστών και συστήματος, όπως αυτές είχαν οριστεί, χωρίς επανάληψη της αναλυτικής καταγραφής τους, η οποία παρουσιάζεται εκτενώς στο Π2.1.

### 2.2.1 Συμμόρφωση με τις Απαιτήσεις Χρήστη

Οι απαιτήσεις χρηστών του **SAFE-AORTA**, όπως προσδιορίστηκαν στο Π2.1, επικεντρώνονται κυρίως στη χρηστικότητα, τη σαφήνεια πληροφορίας, την υποστήριξη της κλινικής ροής εργασίας και την παροχή αξιόπιστων εργαλείων ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων. Το λογισμικό **ΨηφιΔΑ** σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με γνώμονα τις ανάγκες των βασικών ομάδων χρηστών, συμπεριλαμβανομένων αγγειοχειρουργών, καρδιολόγων, ακτινολόγων, ερευνητών και διαχειριστών συστήματος. Η λειτουργική ευθυγράμμιση του **ΨηφιΔΑ** με τις απαιτήσεις χρηστών αποτυπώνεται συνοπτικά στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Λειτουργία του **ΨηφιΔΑ** και της ροής δεδομένων μεταξύ χρηστών, υπολογιστικών ενοτήτων και κλινικών αποτελεσμάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, το **ΨηφιΔΑ** υποστηρίζει την καθιερωμένη κλινική ροή εργασίας για τη διάγνωση και την παρακολούθηση των ΑΚΑ, επιτρέποντας την εισαγωγή, τη διαχείριση και την επισκόπηση απεικονιστικών και κλινικών δεδομένων ασθενών με τρόπο συμβατό με τις υφιστάμενες κλινικές διαδικασίες. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρηστικότητα και στη διαβάθμιση πρόσβασης, με τη διεπαφή του συστήματος να είναι ρόλο-κεντρική και να προσαρμόζεται στα διαφορετικά επίπεδα λειτουργικότητας που απαιτούνται από τους επιμέρους ρόλους χρηστών, σύμφωνα με το πρότυπο ελέγχου πρόσβασης βάσει ρόλων (Role-Based Access Control – RBAC).

Παράλληλα, το υποσύστημα **ΨηφιΔΑ** παρέχει προηγμένα εργαλεία δισδιάστατης και τρισδιάστατης οπτικοποίησης της αορτής και των σχετικών μετρήσεων, διευκολύνοντας την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τη διαχρονική σύγκριση εξετάσεων, όπως απαιτείται από

τους τελικούς χρήστες. Τα αποτελέσματα των υπολογιστικών αναλύσεων και των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης παρουσιάζονται με τρόπο κατανοητό και ερμηνεύσιμο, λειτουργώντας υποστηρικτικά προς τη λήψη κλινικών αποφάσεων χωρίς να υποκαθιστούν την ιατρική κρίση.

Τέλος, το σύστημα ενσωματώνει μηχανισμούς αυθεντικοποίησης χρηστών, διαβάθμισης δικαιωμάτων πρόσβασης και καταγραφής ενεργειών, ανταποκρινόμενο στις απαιτήσεις για ασφαλή διαχείριση ευαίσθητων ιατρικών δεδομένων. Συνολικά, η υλοποίηση του **ΨηφιΔΑ** ανταποκρίνεται στις λειτουργικές και χρηστικές απαιτήσεις που τέθηκαν από τους τελικούς χρήστες στο Π2.1, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα είναι πρακτικά αξιοποιήσιμο, κατανοητό και έτοιμο για ενσωμάτωση στην κλινική πράξη.

## 2.2.2 Συμμόρφωση με τις Απαιτήσεις Συστήματος

Οι απαιτήσεις συστήματος του **SAFE-AORTA**, όπως ορίστηκαν στο Παραδοτέο Π2.1, αφορούν την τεχνική αρχιτεκτονική, την απόδοση, τη διαλειτουργικότητα, την ασφάλεια, την επεκτασιμότητα και τη διαθεσιμότητα του λογισμικού, με στόχο τη λειτουργία του σε πραγματικό κλινικό περιβάλλον. Το λογισμικό του **ΨηφιΔΑ** σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με βάση τις απαιτήσεις αυτές, ώστε να αποτελεί ένα αξιόπιστο και τεχνικά ώριμο υποσύστημα της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**.

Η αρχιτεκτονική του **ΨηφιΔΑ** ακολουθεί αρθρωτή (modular) προσέγγιση, επιτρέποντας τη σαφή διάκριση μεταξύ των επιπέδων διαχείρισης δεδομένων, υπολογιστικής επεξεργασίας και παρουσίασης. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει τη συντήρηση, την αναβάθμιση και την επεκτασιμότητα του συστήματος, ενώ παράλληλα υποστηρίζει τη σταδιακή ενσωμάτωση νέων λειτουργικών ενοτήτων και υπολογιστικών μοντέλων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του έργου. Οι απαιτήσεις που συνίστανται για το σύστημα του **SAFE-AORTA** και κατ' επέκταση του **ΨηφιΔΑ** αποτυπώνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Απαιτήσεις συστήματος του ΨηφιΔΑ

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διαλειτουργικότητα και στη δυνατότητα ενοποίησης του **ΨηφιΔΑ** με την ευρύτερη υποδομή του **SAFE-AORTA**. Το σύστημα υποστηρίζει τη διαχείριση και ανταλλαγή δεδομένων μέσω τυποποιημένων διεπαφών και δομών δεδομένων, επιτρέποντας την ασφαλή επικοινωνία με άλλα υποσυστήματα και υπηρεσίες της πλατφόρμας.

Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η ομαλή ροή δεδομένων και η συνεκτική λειτουργία του συνολικού συστήματος.

Σε επίπεδο απόδοσης και αξιοπιστίας, το **ΨηφιΔΑ** έχει σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζει την αποδοτική επεξεργασία απεικονιστικών και κλινικών δεδομένων, καθώς και την εκτέλεση υπολογιστικών αναλύσεων και μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, χωρίς να επηρεάζεται η εμπειρία χρήστη. Η αρχιτεκτονική του ολοκληρωμένου συστήματος επιτρέπει την κατανομή των υπολογιστικών πόρων και την κλιμάκωση ανάλογα με τις απαιτήσεις φόρτου, όπως αυτές περιγράφονται στο Π2.1.

Παράλληλα, η ασφάλεια και η προστασία δεδομένων αποτελούν βασικές σχεδιαστικές αρχές του **ΨηφιΔΑ**. Το σύστημα ενσωματώνει μηχανισμούς αυθεντικοποίησης, εξουσιοδότησης και καταγραφής ενεργειών, καθώς και μέτρα προστασίας της ακεραιότητας και της εμπιστευτικότητας των δεδομένων, σε συμμόρφωση με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο προστασίας προσωπικών δεδομένων. Οι μηχανισμοί αυτοί διασφαλίζουν ότι η πρόσβαση και η χρήση του συστήματος πραγματοποιούνται με ελεγχόμενο και ασφαλή τρόπο. Συνολικά, το **ΨηφιΔΑ** ανταποκρίνεται στις τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις συστήματος που είχαν τεθεί στο Π2.1, επιβεβαιώνοντας ότι το αναπτυγμένο λογισμικό αποτελεί μια τεχνικά ώριμη, αξιόπιστη και επεκτάσιμη λύση, ικανή να υποστηρίξει τις ανάγκες του **SAFE-AORTA** και να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε πραγματικό κλινικό περιβάλλον.

## 2.3 Μεθοδολογία Ανάπτυξης του Υποσυστήματος ΨηφιΔΑ

Η ανάπτυξη του λογισμικού του **ΨηφιΔΑ** ακολούθησε μια δομημένη και επαναληπτική μεθοδολογία, η οποία βασίστηκε στις απαιτήσεις χρηστών και συστήματος της πλατφόρμας **SAFE-AORTA** και στις αρχές της ποιοτικής και ασφαλούς ανάπτυξης λογισμικού. Η μεθοδολογία αυτή διασφαλίζει τη σταδιακή ωρίμανση του συστήματος, τη συνεχή επαλήθευση της λειτουργικότητάς του και τη συμμόρφωσή του με τις τεχνικές και κανονιστικές απαιτήσεις του έργου. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του **ΨηφιΔΑ** αναπαριστάται στο Σχήμα 3



Σχήμα 3: Διαδικασία Ανάπτυξης και Ενσωμάτωσης του **ΨηφιΔΑ** στο **SAFE-AORTA**

### **2.3.1 Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδιασμός**

Η διαδικασία ανάπτυξης του **ΨηφιΔΑ** ξεκίνησε με την αναλυτική καταγραφή και αξιολόγηση των απαιτήσεων χρηστών και συστήματος, όπως αυτές ορίστηκαν. Οι απαιτήσεις αυτές αποτέλεσαν το θεμέλιο για τον λειτουργικό και τεχνικό σχεδιασμό του συστήματος, διασφαλίζοντας ότι η υλοποίηση ανταποκρίνεται τόσο στις ανάγκες της κλινικής πράξης όσο και στις απαιτήσεις προηγμένης υπολογιστικής ανάλυσης.

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού, οι απαιτήσεις μεταφράστηκαν σε λειτουργικές ενότητες, ροές δεδομένων και σενάρια χρήσης, τα οποία καθόρισαν τη συνολική αρχιτεκτονική του **ΨηφιΔΑ**. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον σχεδιασμό ενός υπολογιστικού πυρήνα ικανού να υποστηρίξει αλγορίθμους Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης για την τμηματοποίηση και αναδόμηση των ανευρυσμάτων από απεικονιστικά δεδομένα, την αυτόματη μορφολογική ανάλυση, καθώς και τον μη επεμβατικό υπολογισμό αιμοδυναμικών και μηχανικών βιοδεικτών, όπως προβλέπεται στο επιστημονικό αντικείμενο του έργου.

Ο σχεδιασμός ακολούθησε αρθρωτή προσέγγιση, επιτρέποντας τη σαφή διάκριση μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων και τη σταδιακή ενσωμάτωσή τους. Η προσέγγιση αυτή διευκόλυνε τη συντήρηση και την επεκτασιμότητα του συστήματος, καθώς και την αντιστοίχιση των λειτουργικών ενοτήτων του **ΨηφιΔΑ** με τις τέσσερις βασικές υπολογιστικές μονάδες, τη Μονάδα Επεξεργασίας Ιατρικής Εικόνας, τη Μονάδα Μορφολογικής Ανάλυσης, την Αιμοδυναμική Μονάδα και τη Μονάδα Μηχανικής Τοιχώματος.

Παράλληλα, δόθηκε έμφαση στη σχεδίαση της διεπαφής χρήστη και της εμπειρίας χρήσης, με στόχο τη δημιουργία ενός λειτουργικού και κατανοητού περιβάλλοντος, συμβατού με την κλινική ροή εργασίας. Ο σχεδιασμός του συστήματος έλαβε υπόψη ζητήματα ασφάλειας, διαλειτουργικότητας και απόδοσης ήδη από τα αρχικά στάδια, ώστε οι αντίστοιχες απαιτήσεις να ενσωματωθούν εγγενώς στην αρχιτεκτονική του ΨηφιΔΑ.

### **2.3.2 Έλεγχος Ποιότητας, Ασφάλειας και Συμμόρφωσης**

Βασικούς άξονες καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης του **ΨηφιΔΑ** αποτέλεσαν η ποιότητα, η ασφάλεια και η συμμόρφωση. Η υλοποίηση του λογισμικού συνοδεύτηκε από διαδικασίες ελέγχου και επαλήθευσης, με στόχο τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας των επιμέρους ενοτήτων και της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος.

Ο έλεγχος ποιότητας περιλάμβανε λειτουργικές δοκιμές των βασικών σεναρίων χρήσης, επαλήθευση της ορθότητας της διαχείρισης δεδομένων και αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό διαφορετικά φορτία λειτουργίας. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι που αφορούν τη σταθερότητα και τη συνέπεια της συμπεριφοράς του συστήματος, ιδίως κατά την εκτέλεση υπολογιστικών αναλύσεων και την παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Σε επίπεδο ασφάλειας, το **ΨηφιΔΑ** ενσωματώνει μηχανισμούς αυθεντικοποίησης χρηστών, ελέγχου πρόσβασης και καταγραφής ενεργειών, διασφαλίζοντας την προστασία της εμπιστευτικότητας και της ακεραιότητας των δεδομένων. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του συστήματος έλαβαν υπόψη το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο προστασίας προσωπικών δεδομένων, με στόχο τη συμμόρφωση με τις σχετικές απαιτήσεις και τη μείωση του κινδύνου μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης.

Τέλος, η συμμόρφωση του **ΨηφιΔΑ** με τις απαιτήσεις του έργου και τις τεχνικές προδιαγραφές επιβεβαιώθηκε μέσω της αντιστοίχισης των υλοποιημένων λειτουργιών με τις αρχικά καθορισμένες απαιτήσεις χρηστών και συστήματος, διασφαλίζοντας ότι το τελικό λογισμικό ανταποκρίνεται πλήρως στους στόχους του **SAFE-AORTA**.

## 2.4 Ενσωμάτωση και Διασύνδεση με την Πλατφόρμα **SAFE-AORTA**

Το υποσύστημα του **ΨηφιΔΑ** έχει υλοποιηθεί ως πλήρως ενσωματωμένο, διαλειτουργικό και service-oriented υποσύστημα της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**, λειτουργώντας ως ο κεντρικός υπολογιστικός πυρήνας του ΣΥΠΟΚΑ. Η αρχιτεκτονική του επιτρέπει την ενοποιημένη επεξεργασία απεικονιστικών, κλινικών και υπολογιστικών δεδομένων, καθώς και την παροχή προηγμένων υπηρεσιών ανάλυσης και εκτίμησης κινδύνου μέσω τυποποιημένων διεπαφών.

Σε τεχνικό επίπεδο, η διασύνδεση του **ΨηφιΔΑ** με τα λοιπά υποσυστήματα της πλατφόρμας **SAFE-AORTA** υλοποιείται μέσω RESTful διεπαφών (APIs), οι οποίες υποστηρίζουν την ανταλλαγή δεδομένων με σαφώς ορισμένα σχήματα και πρωτόκολλα επικοινωνίας. Η πρόσβαση στις υπηρεσίες του **ΨηφιΔΑ** ελέγχεται μέσω κοινών μηχανισμών αυθεντικοποίησης και ελέγχου πρόσβασης βάσει ρόλων, εξασφαλίζοντας συνεπή πολιτική ασφάλειας και ομοιόμορφη διαχείριση χρηστών σε επίπεδο πλατφόρμας. Το **ΨηφιΔΑ** λαμβάνει δεδομένα εισόδου από τα υποσυστήματα διαχείρισης ιατρικών δεδομένων και χρηστών και επιστρέφει επεξεργασμένα αποτελέσματα, ποσοτικοποιημένους βιοδείκτες και οπτικοποιήσεις, τα οποία διατίθενται προς χρήση στα κλινικά σενάρια της πλατφόρμας.

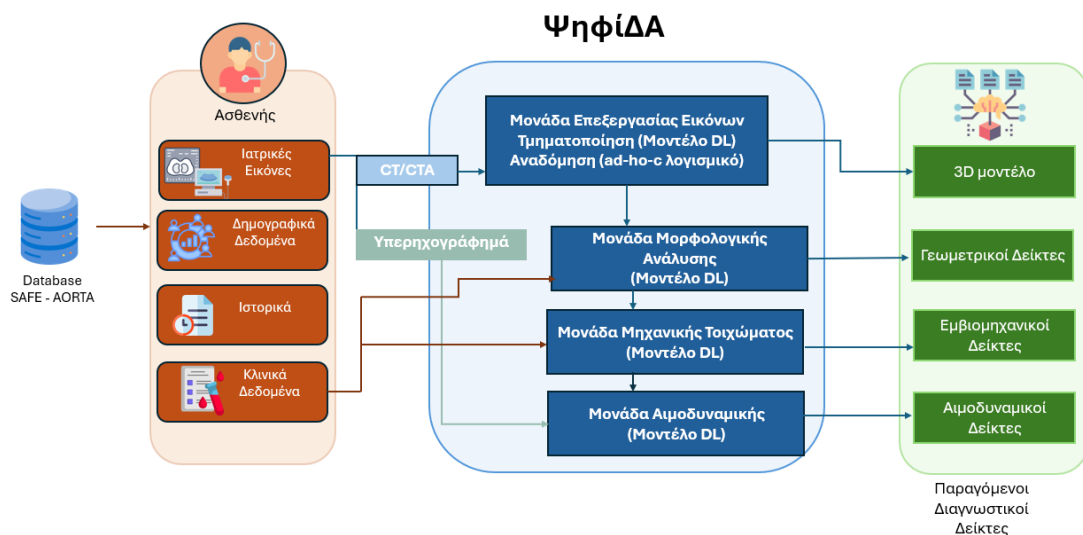
Σε λειτουργικό επίπεδο, το **ΨηφιΔΑ** οργανώνεται ως σύνολο διακριτών αλλά αλληλοσυνδεδεμένων υπολογιστικών μονάδων, οι οποίες υλοποιούνται εντός του επιπέδου εφαρμογικής λογικής και συντονίζονται μέσω εσωτερικών ροών επεξεργασίας. Οι μονάδες αυτές περιλαμβάνουν τη Μονάδα Επεξεργασίας Ιατρικής Εικόνας, τη Μονάδα Μορφολογικής Ανάλυσης, την Αιμοδυναμική Μονάδα και τη Μονάδα Μηχανικής Τοιχώματος, και συνεργάζονται για τη δημιουργία της εξατομικευμένης ψηφιακής αναπαράστασης της αορτής και την παραγωγή μη επεμβατικών βιοδεικτών. Τα παραγόμενα δεδομένα και αποτελέσματα αποθηκεύονται στο κοινό επίπεδο δεδομένων της πλατφόρμας **SAFE-AORTA** και καθίστανται διαθέσιμα μέσω των αντίστοιχων υπηρεσιών.

Τέλος, το **ΨηφιΔΑ** αξιοποιεί κοινές υποδομές της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**, όπως υπηρεσίες διαχείρισης χρηστών, μηχανισμούς αυθεντικοποίησης, καταγραφής ενεργειών και πολιτικές ασφάλειας δεδομένων, εξασφαλίζοντας την ομοιογένεια της λειτουργίας και τη συμμόρφωση με το κανονιστικό πλαίσιο προστασίας προσωπικών δεδομένων. Η αρχιτεκτονική ενσωμάτωσης ακολουθεί αρθρωτή και επεκτάσιμη προσέγγιση, επιτρέποντας την προσθήκη νέων υπολογιστικών μονάδων, υπηρεσιών ή μοντέλων ανάλυσης χωρίς να επηρεάζεται η υφιστάμενη λειτουργία του συστήματος.

## 3. Αρχιτεκτονική και Τεχνικές Προδιαγραφές Συστήματος

### 3.1 Συνολική Αρχιτεκτονική ΨηφιΔΑ

Η συνολική αρχιτεκτονική του **ΨηφιΔΑ** έχει σχεδιαστεί με στόχο τη λειτουργική σαφήνεια, την επεκτασιμότητα και την αξιόπιστη ενσωμάτωσή του στην πλατφόρμα **SAFE-AORTA**. Το **ΨηφιΔΑ** δεν αποτελεί απλώς μια τρισδιάστατη (3D) γεωμετρική αναπαράσταση του Ανευρύσματος Κοιλιακής Αορτής, αλλά ένα ολοκληρωμένο σύστημα υπολογιστικών εργαλείων και μοντέλων Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης (Machine Learning και Deep Learning – ML/DL), το οποίο τροφοδοτείται με ιατρικά δεδομένα και παράγει ένα σύνολο μη επεμβατικών βιοδεικτών που σχετίζονται με τη μορφολογία, την αιμοδυναμική και τη μηχανική συμπεριφορά του ανευρυσματικού τοιχώματος.



Σχήμα 4: Αρχιτεκτονική Υποσυστήματος ΨηφιΔΑ

Η αρχιτεκτονική του **ΨηφιΔΑ** ακολουθεί πολυεπίπεδη προσέγγιση, με σαφή διαχωρισμό μεταξύ του επιπέδου διεπαφής χρήστη, του επιπέδου εφαρμογικής λογικής και του επιπέδου δεδομένων, υποστηρίζοντας την αποδοτική λειτουργία του συστήματος και τη μελλοντική του εξέλιξη. Στο επίπεδο διεπαφής χρήστη, το **ΨηφιΔΑ** παρέχει φιλική και ρόλο-κεντρική διεπαφή μέσω της οποίας οι τελικοί χρήστες αλληλεπιδρούν με το σύστημα, εισάγουν και επισκοπούν δεδομένα και έχουν πρόσβαση σε οπτικοποιήσεις αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένων διδιάστατων και τρισδιάστατων αναπαραστάσεων της αορτής και των υπολογιζόμενων ποσοτικών δεικτών.

Το επίπεδο εφαρμογικής λογικής αποτελεί τον υπολογιστικό πυρήνα του **ΨηφιΔΑ** και υλοποιεί τις βασικές λειτουργίες ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων. Σε αυτό το επίπεδο, το ΨηφιΔΑ οργανώνεται σε τέσσερις διακριτές αλλά αλληλένδετες υπολογιστικές μονάδες (modules), οι οποίες υλοποιούν τη συνολική λειτουργικότητα του ψηφιακού διδύμου:

- **Μονάδα Επεξεργασίας Ιατρικής Εικόνας**, η οποία αξιοποιεί αλγορίθμους βαθιάς μάθησης για την τμηματοποίηση και τρισδιάστατη αναδόμηση των Ανευρυσμάτων Κοιλιακής Αορτής από δεδομένα αξονικής αγγειογραφίας.
- **Μονάδα Μορφολογικής Ανάλυσης**, η οποία εξάγει αυτόματα ποσοτικούς γεωμετρικούς και μορφολογικούς δείκτες του ανευρύσματος, πέραν της μέγιστης διαμέτρου.
- **Αιμοδυναμική Μονάδα**, η οποία υποστηρίζει τον μη επεμβατικό υπολογισμό αιμοδυναμικών βιοδεικτών, αξιοποιώντας υπολογιστικά μοντέλα ροής και γεωμετρικά χαρακτηριστικά.
- **Μονάδα Μηχανικής Τοιχώματος**, η οποία υπολογίζει μη επεμβατικά μηχανικούς δείκτες του ανευρυσματικού τοιχώματος, σχετιζόμενους με τον κίνδυνο ρήξης.

Το επίπεδο δεδομένων είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση, διαχείριση και ανάκτηση των απεικονιστικών, κλινικών και παραγόμενων υπολογιστικών δεδομένων του **ΨηφιΔΑ**. Ο σχεδιασμός του επιπέδου αυτού λαμβάνει υπόψη την ασφάλεια, την ακεραιότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, καθώς και τη διαλειτουργικότητα με τα λοιπά υποσυστήματα της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**.

Η επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων και των επιμέρους υπολογιστικών μονάδων υλοποιείται μέσω καθορισμένων διεπαφών και πρωτοκόλλων, επιτρέποντας τη σαφή οριοθέτηση ευθυνών και τη μείωση της αλληλεξάρτησης μεταξύ των ενοτήτων. Συνολικά, η αρχιτεκτονική του **ΨηφιΔΑ** παρέχει ένα συνεκτικό και ευέλικτο πλαίσιο ανάπτυξης και λειτουργίας, το οποίο υποστηρίζει τη σύνθετη επεξεργασία ιατρικών δεδομένων και τη διασύνδεση με την πλατφόρμα **SAFE-AORTA**, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία, τη βιωσιμότητα και τον επιστημονικό χαρακτήρα του συστήματος στο πλαίσιο του έργου.

## 3.2 Τεχνολογίες Υλοποίησης

Η υλοποίηση του **ΨηφιΔΑ** στηρίζεται σε ένα πολυτεχνολογικό και πολυεπίπεδο οικοσύστημα, το οποίο έχει επιλεγεί ώστε να εξυπηρετεί ταυτόχρονα τις ανάγκες μιας σύγχρονης διαδικτυακής πλατφόρμας και τις αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις που προκύπτουν από την ανάλυση ιατρικών δεδομένων και την παραγωγή μη επεμβατικών βιοδεικτών. Η τεχνολογική επιλογή ακολουθεί τη λογική της διάκρισης μεταξύ επιπέδου διεπαφής, επιπέδου εφαρμογικής λογικής και επιπέδου δεδομένων, διασφαλίζοντας λειτουργική σαφήνεια, επεκτασιμότητα και σταθερή ενσωμάτωση στο ευρύτερο περιβάλλον της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**.

### 3.2.1 Διαδικτυακές Υπηρεσίες και Επίπεδο Εφαρμογής

Σε επίπεδο διαδικτυακών υπηρεσιών, ενσωματώνεται μέσω αρχιτεκτονικής REST, όπου η επικοινωνία μεταξύ των υποσυστημάτων και των επιμέρους υπηρεσιών υλοποιείται με σαφώς ορισμένες διεπαφές (APIs). Ο κορμός των web υπηρεσιών της πλατφόρμας αξιοποιεί τεχνολογίες PHP και RESTful αρχιτεκτονική, με κύριο back-end framework το **Laravel (v8.83.27)** και χρήση **REST APIs** (Laravel web APIs και slimphp v3.12.5) ως κύρια μέθοδο επικοινωνίας μεταξύ υπηρεσιών και υποσυστημάτων. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την τυποποιημένη ανταλλαγή δεδομένων, τον διαχωρισμό ευθυνών μεταξύ λειτουργικών ενοτήτων και τη σταδιακή εξέλιξη του συστήματος χωρίς να διαταράσσεται η συνοχή του. Η εξυπηρέτηση γίνεται μέσω **Apache**, ενώ το REST επίπεδο επιτρέπει την ασφαλή και

επεκτάσιμη επικοινωνία με άλλα συστήματα/υπηρεσίες της πλατφόρμας. Η διαδικτυακή πύλη και οι υπηρεσίες εξυπηρέτησης υλοποιούνται με καθιερωμένα web frameworks και υποδομές εξυπηρετητών, με στόχο την αξιόπιστη λειτουργία, τη διαχείριση χρηστών και ρόλων, και τη σταθερή παροχή λειτουργιών προς τους τελικούς χρήστες και τα υπόλοιπα υποσυστήματα της πλατφόρμας.

Το επίπεδο δεδομένων σχεδιάζεται ώστε να ανταποκρίνεται στη σύνθετη φύση των δεδομένων που διαχειρίζεται το **ΨηφιΔΑ**. Η πλατφόρμα συνδυάζει τεχνολογίες σχεσιακών και μη σχεσιακών βάσεων δεδομένων, ώστε να υποστηρίζεται τόσο η αποθήκευση δομημένων πληροφοριών (όπως μεταδεδομένα εξετάσεων, στοιχεία χρηστών και καταγραφές χρήσης) όσο και η αποδοτική διαχείριση ημιδομημένων ή μη δομημένων δεδομένων που σχετίζονται με κλινικά και υπολογιστικά αποτελέσματα.

Για την κάλυψη διαφορετικών τύπων δεδομένων (δομημένα, ημιδομημένα, μεγάλα αρχεία και δείκτες αναζήτησης) υιοθετείται συνδυασμός:

- **MySQL (v8.0.13)** για δομημένα δεδομένα (π.χ. χρήστες, οντότητες ασθενών, μεταδεδομένα).
- **MongoDB (v4.2.3)** για ημιδομημένα/μη δομημένα δεδομένα και αναφορές.
- **ElasticSearch (v7.10.2)** για γρήγορη αναζήτηση/φιλτράρισμα μεγάλου όγκου πληροφοριών (π.χ. εξετάσεις, χρήστες).
- **Redis (v3.2.12)** για caching και βελτιστοποίηση απόκρισης (π.χ. sessions).

Επιπλέον αξιοποιείται και **Node.js (v10.24.1)** για λειτουργίες υψηλής απόδοσης/παράλληλης εξυπηρέτησης αιτημάτων όπου απαιτείται. Με αυτόν τον τρόπο εξυπηρετούνται μηχανισμοί ευρετηρίασης και αναζήτησης για τη γρήγορη ανάκτηση πληροφορίας, καθώς και μηχανισμοί προσωρινής αποθήκευσης (caching) που βελτιώνουν την απόκριση και την εμπειρία χρήσης σε σενάρια υψηλού φόρτου ή επαναλαμβανόμενων αιτημάτων.

### 3.2.2 Υπολογιστικός Πυρήνας και Μονάδες Ανάλυσης

Ο υπολογιστικός πυρήνας του **ΨηφιΔΑ** υλοποιείται σε περιβάλλοντα που είναι κατάλληλα για επιστημονικούς υπολογισμούς, επεξεργασία ιατρικής εικόνας και ανάπτυξη μοντέλων Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης.

Οι υπολογιστικές μονάδες του **ΨηφιΔΑ** (επεξεργασία εικόνας, μορφολογική ανάλυση, αιμοδυναμική, μηχανική) υλοποιούνται σε **Python** (με χρήση βιβλιοθηκών ανοικτού κώδικα), ενώ για επιμέρους στάδια αξιοποιείται και **C++** όπου χρειάζεται απόδοση/βιβλιοθήκες χαμηλού επιπέδου. Ειδικά για τη Μονάδα Επεξεργασίας Εικόνας κάθε στάδιο υλοποιείται σε Python/C++ με βιβλιοθήκες όπως **ITK** (επεξεργασία), **VTK** (οπτικοποίηση/3D), **GDCM** (DICOM) και **Boost** (πολυνηματική επεξεργασία). Για τα μοντέλα ML/DL, χρησιμοποιείται **PyTorch**, με είσοδο/έξοδο που μπορεί να περιλαμβάνει τόσο tensors (.pt) όσο και γεωμετρικές αναπαραστάσεις/πλέγματα **STL/VTK/OBJ** (ανάλογα με το στάδιο). Για προσομοιώσεις (π.χ. παραγωγή δεδομένων εκπαίδευσης) γίνεται χρήση **COMSOL Multiphysics** σε στάδιο προσομοίωσης, ενώ η βιβλιοθήκη **Deformetrica** αξιοποιείται σε βήματα template registration/ευθυγράμμισης γεωμετριών. Η βασική υπολογιστική ροή υποστηρίζεται από γλώσσες και βιβλιοθήκες ανοικτού κώδικα που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ιατρικής πληροφορικής και υπολογιστικής βιοϊατρικής. Στο πλαίσιο αυτό,

υλοποιούνται αλγόριθμοι τμηματοποίησης και τρισδιάστατης αναδόμησης, διαδικασίες εξαγωγής γεωμετρικών χαρακτηριστικών και μορφολογικών δεικτών, καθώς και υπολογιστικά μοντέλα που εκτιμούν αιμοδυναμικές και μηχανικές παραμέτρους. Για τις ανάγκες μοντελοποίησης και μάθησης, αξιοποιούνται σύγχρονες βιβλιοθήκες εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων, οι οποίες επιτρέπουν τόσο την εκπαίδευση όσο και την αξιολόγηση μοντέλων σε πραγματικά ή συνθετικά δεδομένα, ενώ σε επιμέρους στάδια επιτρέπεται η χρήση εργαλείων προσομοίωσης για παραγωγή ή εμπλουτισμό δεδομένων.

### 3.2.3 Φορητότητα και Αναπαραγωγιμότητα

Η υλοποίηση του **ΨηφιΔΑ** ενσωματώνει μηχανισμούς φορητότητας και αναπαραγωγιμότητας, μέσω containerization και ελεγχόμενων περιβαλλόντων εκτέλεσης. Για λόγους φορητότητας, ασφάλειας και ευκολίας διαχείρισης, επιμέρους υπομονάδες (όπως η Μονάδα Επεξεργασίας Εικόνας) προβλέπεται να εκτελούνται σε **Docker container**, μειώνοντας εξαρτήσεις εγκατάστασης και διευκολύνοντας την κλιμάκωση. Σε επίπεδο πλατφόρμας, η **SAFE-AORTA** προδιαγράφεται να λειτουργεί σε **cloud-based υποδομή**, ώστε να υποστηρίζεται η ανάλυση και αποθήκευση μεγάλου όγκου ιατρικών δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, οι υπολογιστικές μονάδες μπορούν να εκτελούνται με συνέπεια ανεξάρτητα από το υποκείμενο λειτουργικό περιβάλλον, να αναπτύσσονται ευκολότερα σε υποδομές νέφους και να υποστηρίζουν κλιμάκωση ανάλογα με τις ανάγκες του φόρτου εργασίας. Η συνολική υποδομή προσανατολίζεται σε cloud-based ανάπτυξη, ώστε να καθίσταται εφικτή η ασφαλής αποθήκευση μεγάλου όγκου ιατρικών δεδομένων και η εκτέλεση υπολογιστικών διεργασιών που απαιτούν σημαντικούς πόρους.

### 3.2.4 Διαλειτουργικότητα, Πρότυπα και Ασφάλεια

Η διαλειτουργικότητα και η ομοιογένεια της πληροφορίας διασφαλίζονται με την αξιοποίηση διεθνώς αναγνωρισμένων προτύπων και κοινών μοντέλων δεδομένων, τα οποία διευκολύνουν τη σημασιολογική εναρμόνιση, την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ συστημάτων και τη σύνδεση των κλινικών δεδομένων με τα παραγόμενα υπολογιστικά αποτελέσματα. Η ανταλλαγή/τυποποίηση οπτικών και κλινικών δεδομένων βασίζεται σε κοινά πρότυπα και μοντέλα (CDMs) για να υποστηριχθεί η διαλειτουργικότητα και η σημασιολογική εναρμόνιση, όπως **DICOM**. Η επιλογή αυτή καθιστά δυνατή τη συμβατότητα με ευρύτερα οικοσυστήματα κλινικών υποδομών και ενισχύει την προοπτική αξιοποίησης του **ΨηφιΔΑ** σε περιβάλλοντα με διαφορετικές πηγές δεδομένων και διαφορετικές πρακτικές καταγραφής.

Τέλος, η τεχνολογική υλοποίηση συμπληρώνεται από ένα συνεκτικό πλαίσιο ασφάλειας και συμμόρφωσης, το οποίο καλύπτει τόσο την προστασία των δεδομένων κατά τη μεταφορά όσο και την προστασία κατά την αποθήκευση. Η πρόσβαση στην πλατφόρμα προβλέπεται μέσω **HTTPS** με **SSL** και κρυπτογράφηση μεταφοράς, καθώς και αυτόματη αποσύνδεση σε περίοδο αδράνειας. Υιοθετούνται πρακτικές ασφαλούς πρόσβασης, ισχυρές πολιτικές αυθεντικοποίησης, έλεγχος πρόσβασης βάσει ρόλων, καταγραφή ενεργειών και μηχανισμοί παρακολούθησης χρήσης, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ιχνηλασιμότητα και η προστασία ευαίσθητων ιατρικών πληροφοριών. Δηλαδή προβλέπονται πολιτικές όπως ισχυροί κωδικοί, **2FA** σε κρίσιμες λειτουργίες, κρυπτογράφηση ευαίσθητων δεδομένων, καταγραφή ενεργειών και παρακολούθηση χρήσης. ε τεχνικό επίπεδο αναφέρεται χρήση **TLS EV** για ασφαλή μετάδοση, κρυπτογράφηση δεδομένων σε αποθήκευση/backup μέσω **TDE**, και προστασία δικτύου με firewall (pfsense). Με τον τρόπο αυτό, το **ΨηφιΔΑ** διαμορφώνεται ως ένα

τεχνολογικά ώριμο και αξιόπιστο υποσύστημα, ικανό να υποστηρίξει τη σύνθετη επεξεργασία ιατρικών δεδομένων και να ενσωματωθεί αποτελεσματικά στην πλατφόρμα **SAFE-AORTA**, ανταποκρινόμενο στις απαιτήσεις ενός συστήματος υποστήριξης κλινικών αποφάσεων.

### 3.3 Ενσωμάτωση Μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης

Η ενσωμάτωση των μοντέλων TN στο **ΨηφιΔΑ** υλοποιείται ως τυποποιημένη υπολογιστική υπηρεσία (AI inference service) εντός του συνολικού οικοσυστήματος της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**, με στόχο να μετατρέψει αλγόριθμους Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης από πειραματικές υλοποιήσεις σε παραγωγικές μονάδες λογισμικού. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει την αναπαραγωγικότητα, την ιχνηλασιμότητα και την ενσωμάτωση των υπολογισμών σε κλινικές ροές εργασίας.

Τα μοντέλα TN εντάσσονται στον υπολογιστικό πυρήνα του **ΨηφιΔΑ** ως διακριτές υπολογιστικές μονάδες που ενεργοποιούνται από αιτήματα ή γεγονότα της πλατφόρμας. Η εκτέλεση μπορεί να είναι συγχρονισμένη για λειτουργίες μικρού κόστους ή ασύγχρονη για υπολογιστικά απαιτητικές διεργασίες, με στόχο να διασφαλίζεται αφενός η αποδοτικότητα και αφετέρου η ομαλή λειτουργία του συστήματος σε επίπεδο διεπαφής χρήστη. Η επεξεργασία οργανώνεται ως ακολουθία σταδίων (pipeline), όπου το αποτέλεσμα κάθε βήματος αποτελεί είσοδο για το επόμενο, επιτρέποντας την παραγωγή κλινικά αξιοποιήσιμων εξαγωγών από ετερογενή δεδομένα.

#### 3.3.2 Υπολογιστική Ροή, Pipelines Επεξεργασίας

Η υπολογιστική ροή ξεκινά από την εισαγωγή απεικονιστικών δεδομένων (όπως CTA/DICOM) μαζί με τα σχετικά μεταδεδομένα εξέτασης ή περιστατικού, συνεχίζει με την αυτόματη τμηματοποίηση μέσω μοντέλων Βαθιάς Μάθησης που παράγουν μάσκα ανευρύσματος και αορτής, και ακολούθως με τη μετατροπή της μάσκας σε τρισδιάστατη γεωμετρία/πλέγμα (mesh). Το παραγόμενο πλέγμα τροφοδοτεί διαδικασίες μορφολογικής ανάλυσης για την εξαγωγή γεωμετρικών και μορφολογικών δεικτών, ενώ σε επόμενα στάδια υποστηρίζεται η εκτίμηση αιμοδυναμικών και μηχανικών δεικτών μέσω μοντέλων ή υβριδικών υπολογιστικών προσεγγίσεων όπου αυτό απαιτείται. Η αλυσιδωτή αυτή δομή επιτρέπει στα μοντέλα να λειτουργούν ως «δομικά στοιχεία» μιας ενιαίας ροής, μειώνοντας την αλληλεξάρτηση μεταξύ ενοτήτων και διευκολύνοντας την αντικατάσταση ή αναβάθμιση επιμέρους μοντέλων χωρίς ανασχεδιασμό του συνολικού συστήματος.

Για να διασφαλιστεί ότι η ενσωμάτωση παραμένει σταθερή, προβλέψιμη και συμβατή με την πλατφόρμα, υιοθετούνται σαφή συμβόλαια διαλειτουργικότητας (contracts) για κάθε μονάδα TN. Τα συμβόλαια αυτά καθορίζουν τις αποδεκτές μορφές εισόδου (π.χ. DICOM series ή μετασχηματισμένη 3D εικόνα σε NIfTI), τα υποχρεωτικά μεταδεδομένα (όπως voxel spacing, orientation και αναγνωριστικά study/series), τη μορφή εξόδου (segmentation mask, surface mesh ή σύνολο βιοδεικτών), καθώς και σαφείς κωδικούς κατάστασης και σφάλματος. Παράλληλα, ορίζονται τυποποιημένα παραγόμενα αρχεία και δομημένα αποτελέσματα ανά στάδιο, όπως τρισδιάστατοι όγκοι ετικετών (label volumes) για τις μάσκες, γεωμετρικά αρχεία για την αναπαράσταση της επιφάνειας (π.χ. STL/VTK/OBJ), και δομές JSON για την απόδοση των ποσοτικών δεικτών μαζί με τις μονάδες, τα εύρη τιμών, χρονικές σφραγίδες και αναγνωριστικά περιστατικού. Επιπλέον, ενσωματώνονται βασικοί δείκτες ποιότητας, όπως έλεγχοι συνέχειας της τμηματοποίησης, επαλήθευση κλειστής επιφάνειας του mesh ή

επισήμανση ασυνήθιστων τιμών, ώστε να υποστηρίζεται ο έλεγχος αξιοπιστίας πριν από την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, η πλατφόρμα γνωρίζει με ακρίβεια τι παραλαμβάνει και πώς το αξιοποιεί, ενώ τα στάδια ελέγχονται για συμβατότητα πριν περάσουν σε παραγωγική λειτουργία.

### **3.3.3 Εκτέλεση, Διαχείριση Εκδόσεων και Αναπαραγωγιμότητα**

Η διαχείριση εκδόσεων και η αναπαραγωγιμότητα αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της ενσωμάτωσης. Κάθε μοντέλο TN αντιμετωπίζεται ως «πακέτο» που περιλαμβάνει τα weights ή checkpoints, τον ορισμό της αρχιτεκτονικής και τις απαιτούμενες εξαρτήσεις, καθώς και τις προδιαγραφές προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας. Παράλληλα ορίζονται έκδοση μοντέλου (model version) και έκδοση pipeline (pipeline version), ώστε να αποτυπώνεται τόσο το καθαρά μαθησιακό συστατικό όσο και η συνολική ροή που το περιβάλλει. Σε κάθε εκτέλεση, τα παραγόμενα αποτελέσματα συσχετίζονται με τα αντίστοιχα στοιχεία έκδοσης και με βασικά runtime metadata (ημερομηνία, χρόνος εκτέλεσης, υπολογιστικός κόμβος), επιτρέποντας πλήρη τεκμηρίωση του τρόπου παραγωγής κάθε εξαγωγής και δυνατότητα αναδρομικού ελέγχου (audit), κάτι που είναι απαραίτητο για τη διαχείριση αλλαγών και την τεχνική λογοδοσία του συστήματος.

Η λειτουργία των μοντέλων παρέχεται στην πλατφόρμα μέσω υπηρεσίας inference που καλείται από τη πλατφόρμα **SAFE-AORTA**. Η επικοινωνία υλοποιείται με κλήσεις REST και υποστηρίζεται ασύγχρονη εκτέλεση μέσω μηχανισμού εργασιών (job mechanism), ώστε η πλατφόρμα να μπορεί να υποβάλει μια εργασία επεξεργασίας για συγκεκριμένο περιστατικό ή εξέταση, να παρακολουθεί την κατάστασή της (π.χ. queued, running, completed ή failed) και να ανακτά τα αποτελέσματα μετά την ολοκλήρωση. Η ασύγχρονη εκτέλεση επιτρέπει στο σύστημα να παραμένει λειτουργικά ελαφρύ στο επίπεδο της διεπαφής χρήστη, ενώ οι υπολογιστικά βαριές διεργασίες, όπως η τμηματοποίηση ή η παραγωγή mesh, εκτελούνται σε κατάλληλο περιβάλλον υπολογισμού (CPU/GPU) χωρίς να επηρεάζεται η εμπειρία χρήσης. Τα αποτελέσματα επιστρέφουν με τυποποιημένο τρόπο, περιλαμβάνοντας τους βιοδείκτες, αναφορές ή συνδέσμους στα παραγόμενα αρχεία και συνοδευτικούς δείκτες ποιότητας, διαμορφώνοντας ένα πλήρες και αξιοποιήσιμο πακέτο εξόδου.

### **3.3.4 Ποιότητα, Παρακολούθηση και Ασφάλεια Λειτουργίας**

Για την αξιόπιστη λειτουργία σε ετερογενείς υποδομές, τα μοντέλα και οι ροές inference υλοποιούνται σε containerized περιβάλλοντα, με ελεγχόμενες εκδόσεις εξαρτήσεων, ώστε να αποφεύγονται ασυμβατότητες, να υποστηρίζεται η κλιμάκωση και να διασφαλίζεται συνεπής συμπεριφορά μεταξύ περιβαλλόντων ανάπτυξης και παραγωγής. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη φορητότητα και διευκολύνει την ανάπτυξη σε υποδομές νέφους.

Η ενσωμάτωση ακολουθεί διαδικασίες συνεχούς ολοκλήρωσης και παράδοσης (CI/CD), όπου κάθε αλλαγή ενεργοποιεί αυτοματοποιημένα pipelines με ελέγχους unit, integration και end-to-end σε ελεγχόμενα σύνολα δεδομένων, καθώς και δοκιμές παλινδρόμησης και οπισθοσυμβατότητας. Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση των ελέγχων, τα artefacts αναπτύσσονται αρχικά σε περιβάλλον staging, με τη χρήση quality gates για τον έλεγχο απόδοσης και κατανάλωσης πόρων.

Για τη διαρκή αξιολόγηση της συμπεριφοράς των μοντέλων, εφαρμόζονται μηχανισμοί παρακολούθησης μετρικών, έλεγχοι λογικής συνέπειας και ανίχνευση data και model drift, ενώ

προβλέπεται δυνατότητα rollback σε προηγούμενες σταθερές εκδόσεις. Τα αποτελέσματα συνοδεύονται από βασικές ενδείξεις ποιότητας, υποστηρίζοντας ορθή ερμηνεία από τον χρήστη.

Τέλος, η ενσωμάτωση πραγματοποιείται με πλήρη συμμόρφωση προς τις πολιτικές ασφάλειας και προστασίας δεδομένων, μέσω μηχανισμών αυθεντικοποίησης, κρυπτογράφησης και ιχνηλασιμότητας. Συνολικά, η υποδομή διαμορφώνεται ως επεκτάσιμη και ελέγξιμη πλατφόρμα, μετατρέποντας απεικονιστικά και κλινικά δεδομένα σε τυποποιημένα και επιχειρησιακά αξιοποιήσιμα αποτελέσματα στο πλαίσιο του **SAFE-AORTA**.

## 4. Υπολογιστικές και Αναλυτικές Μονάδες του Λογισμικού ΨηφιδΑ

Η ενότητα αυτή περιγράφει τις βασικές υπολογιστικές και αναλυτικές μονάδες που συνθέτουν το λογισμικό **ΨηφιδΑ** του ολοκληρωμένου συστήματος **SAFE-AORTA**. Οι μονάδες αυτές υλοποιούν τον επιστημονικό και υπολογιστικό πυρήνα του **ΨηφιδΑ** και λειτουργούν συμπληρωματικά για την εξαγωγή εξατομικευμένων βιοδεικτών και την εκτίμηση του κινδύνου ρήξης.

### 4.1 Μονάδα Επεξεργασίας Ιατρικής Εικόνας

Η Μονάδα Επεξεργασίας Ιατρικής Εικόνας αποτελεί τον βασικό πυρήνα ανάλυσης απεικονιστικών δεδομένων του συστήματος του Αλγοριθμικού ΨηφιδΑ. Αξιοποιεί προηγμένους αλγορίθμους Βαθιάς Μάθησης και Υπολογιστικής Όρασης για την αυτόματη επεξεργασία δεδομένων αξονικής αγγειογραφίας (CTA) της κοιλιακής αορτής. Η λειτουργικότητά της περιλαμβάνει τη διάκριση παθολογικών περιοχών, την ακριβή τμηματοποίηση του ανευρυσματικού σάκου και των παρακείμενων αγγειακών δομών, καθώς και την τρισδιάστατη αναδόμηση της αορτικής γεωμετρίας.

Η μονάδα έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί πλήρως αυτοματοποιημένα, μειώνοντας την ανάγκη χειροκίνητης παρέμβασης και διασφαλίζοντας υψηλή αναπαραγωγιμότητα και ακρίβεια. Τα παραγόμενα τρισδιάστατα μοντέλα αποτελούν τη βάση για τις επόμενες αναλυτικές ενότητες του συστήματος, υποστηρίζοντας τόσο τη μορφολογική όσο και τη βιομηχανική και αιμοδυναμική ανάλυση του ανευρύσματος.

### 4.2 Μονάδα Μορφολογικής Ανάλυσης

Η Μονάδα Μορφολογικής Ανάλυσης αξιοποιεί τα τρισδιάστατα ανακατασκευασμένα μοντέλα της αορτής και του ανευρύσματος για την εκτέλεση εκτενούς γεωμετρικής και μορφολογικής ανάλυσης. Στόχος της μονάδας είναι η εξαγωγή ενός πλούσιου συνόλου ποσοτικών χαρακτηριστικών που αποτυπώνουν τη σύνθετη γεωμετρία και μορφολογία του Ανευρύσματος Κοιλιακής Αορτής, πέραν της κλασικής μέτρησης της μέγιστης διαμέτρου.

Ενδεικτικά, υπολογίζονται δείκτες ασυμμετρίας, καμπυλότητας, επιμήκυνσης, στρεβλότητας και γεωμετρικής πολυπλοκότητας, οι οποίοι έχουν συσχετιστεί στη διεθνή βιβλιογραφία με την εξέλιξη και τον κίνδυνο ρήξης του ανευρύσματος. Τα εξαγόμενα μορφολογικά χαρακτηριστικά

αποθηκεύονται σε δομημένη μορφή και τροφοδοτούν τις επόμενες υπολογιστικές μονάδες του συστήματος, συμβάλλοντας στην πολυπαραγοντική και εξατομικευμένη εκτίμηση κινδύνου.

### 4.3 Αιμοδυναμική Μονάδα

Η Αιμοδυναμική Μονάδα του Αλγοριθμικού Ψηφίδα υποστηρίζει τον μη επεμβατικό υπολογισμό κρίσιμων αιμοδυναμικών βιοδεικτών, αξιοποιώντας υπολογιστικά μοντέλα ροής αίματος σε συνδυασμό με τα εξαχθέντα γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της αορτής. Η μονάδα προσομοιώνει τη ροή του αίματος εντός της ανευρυσματικής περιοχής και υπολογίζει αιμοδυναμικές παραμέτρους που σχετίζονται με τη μηχανική φόρτιση του αγγειακού τοιχώματος.

Μεταξύ των βασικών παραγόμενων δεικτών περιλαμβάνονται η διατμητική τάση του ενδοθηλίου (Wall Shear Stress – WSS) και παράγωγοι αιμοδυναμικοί δείκτες, οι οποίοι έχουν αποδειχθεί σημαντικοί για την κατανόηση της παθοφυσιολογίας των ΑΚΑ. Τα αποτελέσματα της αιμοδυναμικής ανάλυσης ενσωματώνονται στο συνολικό προφίλ του ασθενούς, ενισχύοντας την ακρίβεια της εκτίμησης του κινδύνου εξέλιξης και ρήξης.

### 4.4 Μονάδα Μηχανικής Τοιχώματος

Η Μονάδα Μηχανικής Τοιχώματος επικεντρώνεται στον μη επεμβατικό υπολογισμό μηχανικών παραμέτρων του ανευρυσματικού τοιχώματος, αξιοποιώντας μοντέλα υπολογιστικής εμβιομηχανικής και τα εξαχθέντα γεωμετρικά και αιμοδυναμικά δεδομένα. Η μονάδα υπολογίζει την κατανομή και το μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων στο τοίχωμα της αορτής, λαμβάνοντας υπόψη την πολύπλοκη γεωμετρία και τις συνθήκες φόρτισης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον εντοπισμό περιοχών υψηλής μηχανικής καταπόνησης, οι οποίες θεωρούνται δυνητικά ευάλωτες σε ρήξη. Οι παραγόμενοι μηχανικοί δείκτες συμβάλλουν στην ποσοτικοποίηση παραμέτρων που σχετίζονται άμεσα με τον κίνδυνο ρήξης και ενσωματώνονται στη συνολική εκτίμηση κινδύνου του συστήματος, υποστηρίζοντας μια πιο ολοκληρωμένη και εξατομικευμένη κλινική αξιολόγηση.

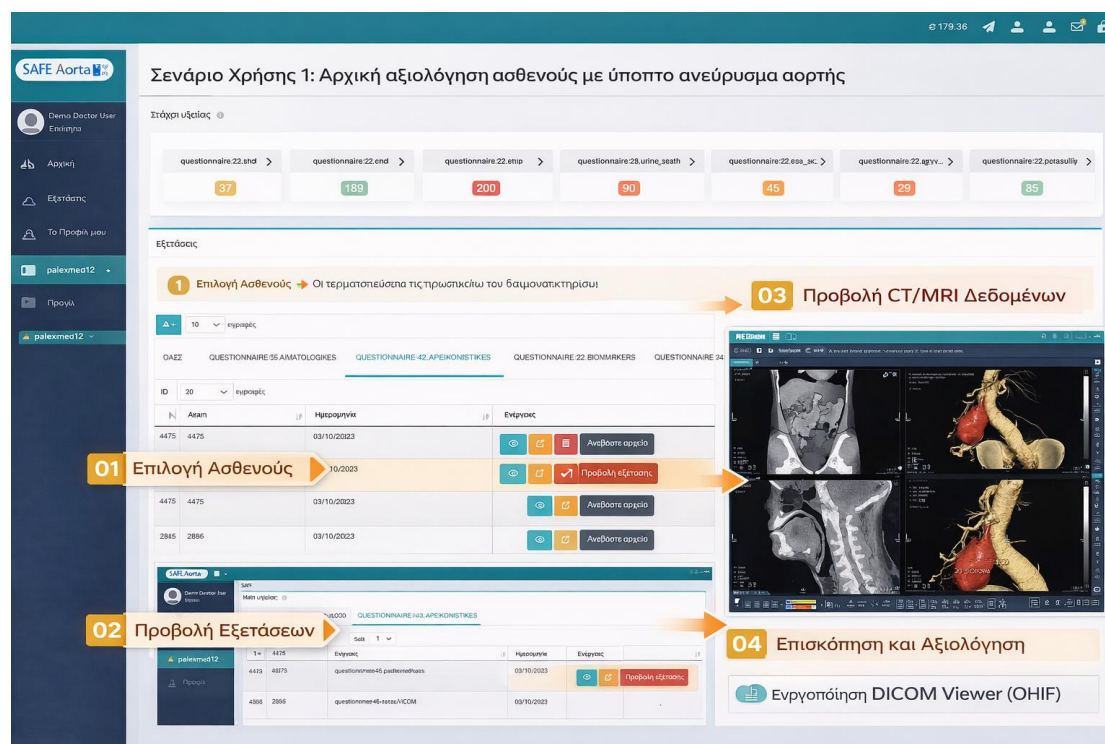
## 5. Λειτουργικές Ενότητες του Συστήματος

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τις βασικές λειτουργικές ενότητες του **Ψηφίδα**, εστιάζοντας στον τρόπο με τον οποίο τα αποτελέσματα των υπολογιστικών αναλύσεων καθίστανται προσβάσιμα, ερμηνεύσιμα και λειτουργικά αξιοποιήσιμα από τον τελικό χρήστη στο πλαίσιο της υποστήριξης κλινικών αποφάσεων. Οι λειτουργικές ενότητες οργανώνουν την αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα, καλύπτοντας τη διαχείριση χρηστών και δεδομένων, την ανάλυση και εκτίμηση κινδύνου, καθώς και την οπτικοποίηση και παρουσίαση των παραγόμενων αποτελεσμάτων, διασφαλίζοντας συνοχή, διαφάνεια και χρηστικότητα.

### 5.1 Οπτικοποίηση και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Κρίσιμο λειτουργικό στοιχείο του **Ψηφίδα** αποτελεί η οπτικοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων, καθώς διαμορφώνει το σημείο επαφής μεταξύ των υπολογιστικών αναλύσεων του συστήματος και του τελικού χρήστη. Στόχος της ενότητας δεν είναι απλώς η απεικόνιση αριθμητικών εξαγωγών, αλλά η μετατροπή σύνθετων υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε

μορφές κατανοητές, ερμηνεύσιμες και λειτουργικά αξιοποιήσιμες στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης πλατφόρμας. Η οπτικοποίηση λειτουργεί ως μέσο γεφύρωσης μεταξύ της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του Ψηφιακού και της κλινικής ή ερευνητικής αξιολόγησης, ενισχύοντας τη διαφάνεια και τη χρηστικότητα του συστήματος.



Σχήμα 5: Αρχική Αξιολόγηση ασθενούς με Ύποπτο Ανεύρυσμα

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων οργανώνεται γύρω από το εκάστοτε περιστατικό και τις αντίστοιχες εκτελέσεις ανάλυσης. Για κάθε ολοκληρωμένη υπολογιστική ροή, το σύστημα καθιστά διαθέσιμα τόσο τα ποσοτικά αποτελέσματα (βιοδείκτες, δείκτες κινδύνου, συνοπτικές μετρικές) όσο και τις αντίστοιχες οπτικοποιήσεις που επιτρέπουν την άμεση κατανόηση της χωρικής και μορφολογικής πληροφορίας. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με το περιστατικό, την ημερομηνία εκτέλεσης και την έκδοση της ανάλυσης διασφαλίζει τη σαφήνεια και τη δυνατότητα αναδρομικής επισκόπησης.

Κεντρικό ρόλο στην ενότητα διαδραματίζει η τρισδιάστατη οπτικοποίηση της γεωμετρίας του ανευρύσματος και της αορτής. Η παρουσίαση των τρισδιάστατων αναπαραστάσεων επιτρέπει στον χρήστη να εξετάζει τη μορφολογία του ανευρύσματος από διαφορετικές οπτικές γωνίες, να αντιλαμβάνεται τη γεωμετρική πολυπλοκότητα και να συνδέει ποσοτικούς δείκτες με τη χωρική τους κατανομή. Πέραν της απλής γεωμετρικής απεικόνισης, υποστηρίζεται η προβολή υπολογισμένων πεδίων ή δεικτών επάνω στη γεωμετρία, όπως κατανομές αιμοδυναμικών ή μηχανικών παραμέτρων, με χρήση χρωματικών κλιμάκων που διευκολύνουν την οπτική ερμηνεία.



Σχήμα 6: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση της γεωμετρίας του ανευρύσματος και της αορτής.

Παράλληλα με τις τρισδιάστατες απεικονίσεις, η ενότητα περιλαμβάνει παρουσίαση δισδιάστατων γραφημάτων, πινάκων και συνοπτικών αριθμητικών ενδείξεων, οι οποίες συγκεντρώνουν τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης. Οι ποσοτικοί δείκτες παρουσιάζονται με τρόπο δομημένο, συνοδευόμενοι από τις αντίστοιχες μονάδες και, όπου απαιτείται, από εύρη τιμών ή συγκριτικές αναφορές, ώστε να είναι άμεσα αξιοποιήσιμοι από τον χρήστη. Η συνδυαστική παρουσίαση αριθμητικών και οπτικών στοιχείων επιτρέπει την παράλληλη αξιολόγηση τόσο της συνολικής εικόνας όσο και των επιμέρους παραμέτρων που συνθέτουν την ανάλυση.

Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται για τη δυνατότητα σύγκρισης και ιστορικότητας των αποτελεσμάτων. Όταν υπάρχουν πολλαπλές εκτελέσεις ανάλυσης για το ίδιο περιστατικό, η ενότητα επιτρέπει την επισκόπηση προηγούμενων αποτελεσμάτων και τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ διαφορετικών χρονικών στιγμών ή διαφορετικών ρυθμίσεων ανάλυσης. Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για σενάρια παρακολούθησης της εξέλιξης του ανευρύσματος, καθώς επιτρέπει την οπτική και ποσοτική αποτύπωση μεταβολών με την πάροδο του χρόνου.

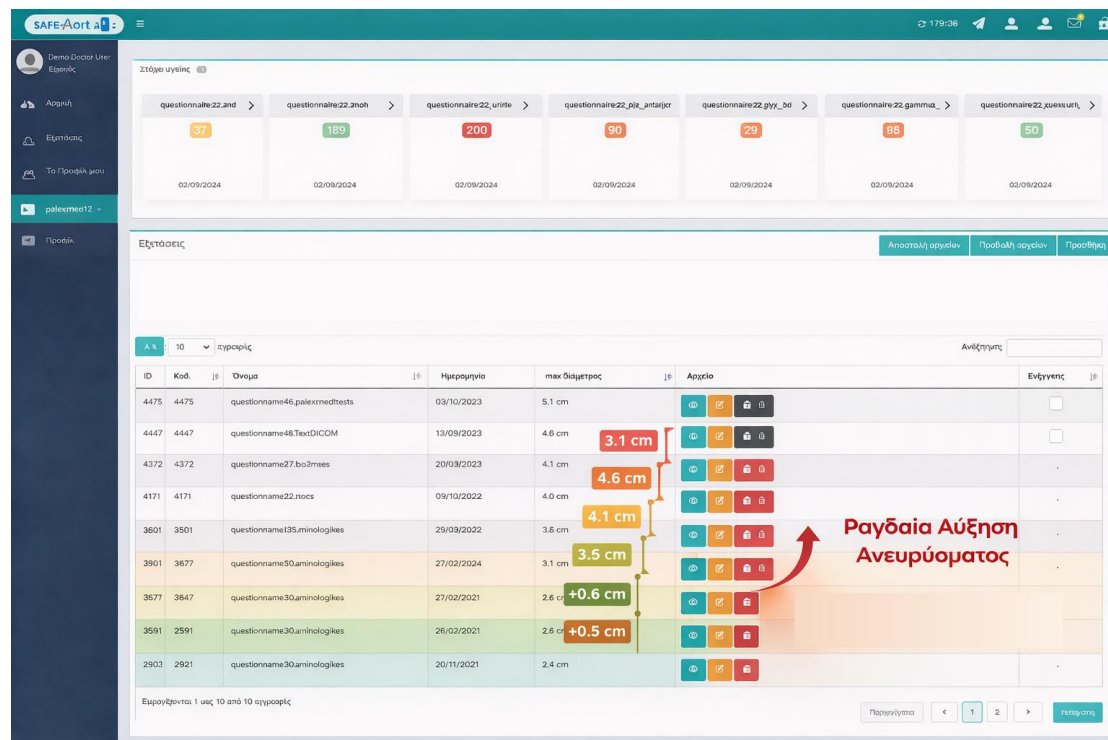
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων συνοδεύεται από ενδείξεις ποιότητας και περιορισμούς ερμηνείας, όπου αυτό είναι σκόπιμο. Ενδεικτικά, το σύστημα μπορεί να επισημαίνει περιπτώσεις στις οποίες η ποιότητα των απεικονιστικών δεδομένων ή συγκεκριμένες παραδοχές της ανάλυσης ενδέχεται να επηρεάζουν την αξιοπιστία των οπτικοποιήσεων ή των ποσοτικών εξαγωγών. Οι ενδείξεις αυτές λειτουργούν υποστηρικτικά, ενισχύοντας τη διαφάνεια και υπενθυμίζοντας ότι τα αποτελέσματα του **ΨηφιΔΑ** αποτελούν εργαλεία υποστήριξης και όχι αυτόνομες διαγνωστικές αποφάσεις.

## 5.2 Ενότητα Ανάλυσης και Εκτίμησης Κινδύνου Ρήξης

Η ενότητα ανάλυσης και εκτίμησης κινδύνου ρήξης μετατρέπει απεικονιστικά και κλινικά δεδομένα σε ποσοτικές εκτιμήσεις που σχετίζονται με τη συμπεριφορά και τη δυναμική επικινδυνότητα του ανευρύσματος κοιλιακής αορτής. Η λειτουργία της δεν αποσκοπεί στην παραγωγή αυτόνομων διαγνωστικών αποφάσεων, αλλά στην παροχή τεκμηριωμένων δεικτών που υποστηρίζουν τη συστηματική αξιολόγηση του κινδύνου στο πλαίσιο της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**.

Η ανάλυση βασίζεται σε συνδυασμό γεωμετρικών, μορφολογικών, αιμοδυναμικών και μηχανικών παραμέτρων, οι οποίες προκύπτουν από τις προηγούμενες υπολογιστικές ενότητες του **ΨηφιδΑ**. Η τρισδιάστατη αναπαράσταση του ανευρύσματος επιτρέπει την εξαγωγή μορφολογικών δεικτών πέραν της μέγιστης διαμέτρου, ενώ οι αιμοδυναμικές και μηχανικές εκτιμήσεις συμβάλλουν στην κατανόηση των φορτίων και των τάσεων που αναπτύσσονται στο ανευρυσματικό τοίχωμα.

Η εκτίμηση κινδύνου προκύπτει από συνδυαστική αξιολόγηση των επιμέρους παραμέτρων και παρουσιάζεται ως ενοποιημένο σύνολο δεικτών, συνοδευόμενο από επιμέρους τιμές και οπτικοποιήσεις, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων. Τέλος, η ενότητα υποστηρίζει διαχρονική ανάλυση, επιτρέποντας τη σύγκριση δεικτών από πολλαπλές χρονικές στιγμές και την παρακολούθηση της εξέλιξης του ανευρύσματος στον χρόνο.



Σχήμα 7: Στιγμιότυπο διαχρονικής ανάλυσης και σύγκριση παλαιότερων εξετάσεων

Τα αποτελέσματα που παράγονται προορίζονται να λειτουργούν ως εργαλεία υποστήριξης της κλινικής απόφασης και όχι ως αυτόματες ή δεσμευτικές διαγνώσεις. Η παρουσίαση των δεικτών συνοδεύεται από ενδείξεις ποιότητας και περιορισμούς ερμηνείας, οι οποίοι υπενθυμίζουν ότι η αξιολόγηση εξαρτάται από την ποιότητα των εισαγόμενων δεδομένων και

τις παραδοχές των υπολογιστικών μοντέλων. Συνολικά, η ενότητα συνεισφέρει ουσιαστικά στη λειτουργική και επιστημονική αξία του **ΨηφιΔΑ**, προσφέροντας ένα πολυπαραμετρικό, διαφανές και επεκτάσιμο πλαίσιο ανάλυσης και εκτίμησης κινδύνου ρήξης στο πλαίσιο ενός σύγχρονου συστήματος υποστήριξης κλινικών αποφάσεων.

### 5.3 Διαχείριση Χρηστών, Πρόσβασης και Ιατρικών Δεδομένων

Η διαχείριση χρηστών, πρόσβασης και ιατρικών δεδομένων αποτελεί βασική λειτουργική ενότητα του **ΨηφιΔΑ**, καθώς το σύστημα διαχειρίζεται ευαίσθητα απεικονιστικά και κλινικά δεδομένα και παράγει αποτελέσματα δυναμικά αξιοποιήσιμα σε κλινικές ροές εργασίας. Η λειτουργικότητα ενσωματώνεται στο ενιαίο πλαίσιο αυθεντικοποίησης, εξουσιοδότησης και διαχείρισης δεδομένων της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**, διασφαλίζοντας συνεκτική εμπειρία χρήσης και κοινή πολιτική ασφάλειας.

Ο έλεγχος πρόσβασης υλοποιείται βάσει μοντέλου Role-Based Access Control (RBAC) και της αρχής ελάχιστου προνομίου, με διακριτούς ρόλους χρηστών και σαφώς ορισμένα δικαιώματα σε επίπεδο λειτουργιών και δεδομένων. Η αυθεντικοποίηση ακολουθεί ασφαλείς πρακτικές διαχείρισης λογαριασμών, πολιτικές ισχυρών κωδικών και, όπου απαιτείται, χρήση δεύτερου παράγοντα αυθεντικοποίησης, ενώ ο έλεγχος εξουσιοδότησης εφαρμόζεται οριζόντια στη διεπαφή, στις υπηρεσίες και στο επίπεδο δεδομένων. Παράλληλα, υποστηρίζονται μηχανισμοί καταγραφής ενεργειών για τη διασφάλιση ιχνηλασιμότητας και λογοδοσίας.

Η εισαγωγή και διαχείριση ιατρικών δεδομένων διασφαλίζει ότι τα δεδομένα που τροφοδοτούν τις υπολογιστικές μονάδες συλλέγονται, οργανώνονται και καθίστανται διαθέσιμα με τρόπο ασφαλή, συνεπή και διαλειτουργικό. Η διαδικασία εισαγωγής εστιάζει κυρίως σε απεικονιστικά δεδομένα συμβατά με κλινικά πρότυπα, με ταυτόχρονους ελέγχους εγκυρότητας και πληρότητας, εξαγωγή κρίσιμων μεταδεδομένων και συσχέτιση με το αντίστοιχο περιστατικό, επιτρέποντας τη διατήρηση ιστορικότητας και τη διαχρονική σύγκριση εξετάσεων.

Η διαχείριση επεκτείνεται και στα αποτελέσματα της υπολογιστικής επεξεργασίας (όπως τμηματοποιήσεις, τρισδιάστατες γεωμετρίες και βιοδείκτες), τα οποία αποθηκεύονται συσχετισμένα με το περιστατικό, την εξέταση και την έκδοση της υπολογιστικής ροής. Παρέχονται λειτουργίες αναζήτησης, φιλτραρίσματος και επισκόπησης, επιτρέποντας αποδοτική πλοήγηση και ανάκτηση πληροφορίας ακόμη και σε περιβάλλοντα μεγάλου όγκου δεδομένων.

## 6. Οδηγός Χρήσης

Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει τη χρήση του **ΨηφιΔΑ** με περιγραφικό και λειτουργικό τρόπο, στο πλαίσιο της ενσωμάτωσής του στην πλατφόρμα **SAFE-AORTA**. Το **ΨηφιΔΑ** δεν αποτελεί αυτόνομο λογισμικό, αλλά λειτουργεί ως υποσύστημα ανάλυσης και υποστήριξης κλινικών αποφάσεων που αξιοποιείται αποκλειστικά μέσω των ενοτήτων της πλατφόρμας. Για τον λόγο αυτό, ο οδηγός χρήσης δεν εστιάζει σε τεχνικές λεπτομέρειες υλοποίησης ή αναλυτική περιγραφή διεπαφών, αλλά αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο ο τελικός χρήστης αλληλεπιδρά με τις λειτουργίες του συστήματος στο πλαίσιο μιας συνεκτικής ροής εργασίας, από την εισαγωγή δεδομένων έως την παρουσίαση αποτελεσμάτων, υποστηρίζοντας την ομαλή ένταξη του **ΨηφιΔΑ** σε πραγματικά σενάρια χρήσης και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Το

Σχήμα 8 απεικονίζει τη συνεκτική ροή αλληλεπίδρασης του χρήστη με το **ΨηφιΔΑ** από την είσοδο στην πλατφόρμα και την οργάνωση του περιστατικού, έως την ενεργοποίηση των υπολογιστικών αναλύσεων, την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την υποστήριξη της κλινικής ή ερευνητικής αξιολόγησης.



Σχήμα 8: Ροή χρήσης του **ΨηφιΔΑ** στο πλαίσιο της πλατφόρμας **SAFE-AORTA**.

Αναλυτικότερα, η πρόσβαση στο **ΨηφιΔΑ** πραγματοποιείται μετά την επιτυχή είσοδο του χρήστη στην πλατφόρμα, σύμφωνα με τους μηχανισμούς αυθεντικοποίησης και ελέγχου πρόσβασης που εφαρμόζονται σε επίπεδο **SAFE-AORTA**. Ανάλογα με τον ρόλο του χρήστη, καθίστανται διαθέσιμες οι αντίστοιχες λειτουργίες που σχετίζονται με την εισαγωγή δεδομένων, την εκτέλεση υπολογιστικών αναλύσεων και την επισκόπηση αποτελεσμάτων. Η ενσωμάτωση του ΨηφιΔΑ διασφαλίζει ότι δεν απαιτείται ξεχωριστή διαδικασία σύνδεσης ή

ρύθμισης, ενώ η εμπειρία χρήσης παραμένει συνεκτική σε όλα τα υποσυστήματα της πλατφόρμας.

Η τυπική χρήση του **ΨηφιΔΑ** ξεκινά με την επιλογή ή τη δημιουργία ενός περιστατικού εντός της πλατφόρμας. Το περιστατικό λειτουργεί ως κεντρικό σημείο οργάνωσης, στο οποίο συσχετίζονται τα απεικονιστικά δεδομένα, οι υπολογιστικές αναλύσεις και τα παραγόμενα αποτελέσματα. Στο επόμενο στάδιο, ο χρήστης εισάγει ή επιλέγει τα διαθέσιμα απεικονιστικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση, όπως εξετάσεις αξονικής αγγειογραφίας. Κατά την εισαγωγή, το σύστημα εκτελεί ελέγχους εγκυρότητας και οργανώνει τα δεδομένα με τρόπο που επιτρέπει την ασφαλή αποθήκευση και την επαναχρησιμοποίησή τους σε μελλοντικές αναλύσεις.

Αφού τα δεδομένα συσχετιστούν με το περιστατικό, ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει τις υπολογιστικές λειτουργίες του **ΨηφιΔΑ**. Η ενεργοποίηση αυτή οδηγεί στην εκτέλεση των προβλεπόμενων αναλυτικών ροών, οι οποίες περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως η τμηματοποίηση, η τρισδιάστατη αναδόμηση, η μορφολογική ανάλυση και η εκτίμηση δεικτών που σχετίζονται με τον κίνδυνο ρήξης. Οι διεργασίες αυτές εκτελούνται στο παρασκήνιο, ενώ ο χρήστης ενημερώνεται για την κατάσταση της ανάλυσης, χωρίς να απαιτείται άμεση παρέμβαση ή τεχνική γνώση σχετικά με τον τρόπο εκτέλεσης.

Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης, τα αποτελέσματα του **ΨηφιΔΑ** καθίστανται διαθέσιμα εντός της πλατφόρμας για επισκόπηση και αξιολόγηση. Ο χρήστης μπορεί να δει ποσοτικούς δείκτες, συνοπτικές μετρικές και οπτικοποιήσεις που αποτυπώνουν τη μορφολογία και τα υπολογιστικά χαρακτηριστικά του ανευρύσματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με δομημένο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η κατανόηση τόσο της συνολικής εικόνας όσο και των επιμέρους παραμέτρων που συνθέτουν την ανάλυση. Παράλληλα, διατηρείται ιστορικό προηγούμενων εκτελέσεων, επιτρέποντας τη σύγκριση αποτελεσμάτων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ή υπό διαφορετικές συνθήκες.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με την κατανόηση ότι το **ΨηφιΔΑ** λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης και όχι ως αυτόνομο σύστημα διάγνωσης. Οι παραγόμενοι δείκτες και οι οπτικοποιήσεις προορίζονται να ενισχύουν την κλινική ή ερευνητική αξιολόγηση, παρέχοντας πρόσθετη ποσοτική και χωρική πληροφορία. Όπου απαιτείται, τα αποτελέσματα συνοδεύονται από ενδείξεις ποιότητας ή περιορισμούς, οι οποίοι υπενθυμίζουν ότι η αξιοπιστία των εξαγωγών εξαρτάται από την ποιότητα των εισαγόμενων δεδομένων και τις παραδοχές των υπολογιστικών μοντέλων.

## 7. Συμπεράσματα

Το παρόν παραδοτέο Π4.4 παρουσίασε το λογισμικό του **ΨηφιΔΑ**, το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου **SAFE-AORTA** ως βασικό υποσύστημα του ΣΥΠΟΚΑ για τη νόσο των ΑΚΑ. Μέσα από τη συστηματική τεχνική και λειτουργική τεκμηρίωση που προηγήθηκε, αναδείχθηκε ο ρόλος του **ΨηφιΔΑ** ως υπολογιστικού πυρήνα της πλατφόρμας, ικανού να μετατρέπει απεικονιστικά και κλινικά δεδομένα σε εξατομικευμένες ψηφιακές αναπαραστάσεις και κλινικά αξιοποιήσιμους βιοδείκτες.

Το **ΨηφιΔΑ** υλοποιεί μια ολοκληρωμένη και πολυεπίπεδη προσέγγιση ανάλυσης, ενσωματώνοντας αλγορίθμους επεξεργασίας ιατρικής εικόνας, μορφολογικής ανάλυσης,

αιμοδυναμικής και μηχανικής μοντελοποίησης, καθώς και τεχνικές Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης. Η αρθρωτή αρχιτεκτονική του συστήματος επιτρέπει τη σαφή οργάνωση των υπολογιστικών ενοτήτων, τη διαλειτουργικότητα με τα λοιπά υποσυστήματα της πλατφόρμας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη λειτουργική ενσωμάτωση του **ΨηφιΔΑ** στην πλατφόρμα **SAFE-AORTA**, με τρόπο που διασφαλίζει συνεκτική εμπειρία χρήσης και συμβατότητα με τις κλινικές ροές εργασίας. Το **ΨηφιΔΑ** δεν λειτουργεί ως αυτόνομο λογισμικό, αλλά αξιοποιείται αποκλειστικά μέσω των ενοτήτων της πλατφόρμας, υποστηρίζοντας τη διαχείριση περιστατικών, την εκτέλεση υπολογιστικών αναλύσεων και την οπτικοποίηση αποτελεσμάτων σε ένα ενιαίο περιβάλλον.

Παράλληλα, το παραδοτέο ανέδειξε τη συμμόρφωση του **ΨηφιΔΑ** με τις απαιτήσεις χρηστών και συστήματος του έργου, καθώς και την εφαρμογή αρχών ασφάλειας, προστασίας προσωπικών δεδομένων, αναπαραγωγιμότητας και ιχνηλασιμότητας των αποτελεσμάτων. Η τεκμηρίωση των υπολογιστικών ροών και των μηχανισμών ελέγχου ποιότητας ενισχύει τη διαφάνεια και την αξιοπιστία του συστήματος.

Εν κατακλείδι, το λογισμικό του **ΨηφιΔΑ** αποτελεί μια τεχνικά ώριμη και επιστημονικά τεκμηριωμένη υλοποίηση ψηφιακού διδύμου για τη νόσο των ΑΚΑ. Η προσέγγιση που υιοθετεί υπερβαίνει τις παραδοσιακές μονοπαραμετρικές μεθόδους αξιολόγησης, παρέχοντας ένα πολυπαραγοντικό και εξατομικευμένο πλαίσιο ανάλυσης και υποστήριξης κλινικών αποφάσεων, και θέτει τις βάσεις για τη μελλοντική επέκταση και αξιοποίησή του σε κλινικά και ερευνητικά περιβάλλοντα στο πλαίσιο του έργου **SAFE-AORTA**.

## 7. Βιβλιογραφία

- Ayhan, C., Mekhaeil, M., Channawi, R., Ozcan, A. E., Akargul, E., Deger, A., Cayan, I., Abdalla, A., Chan, C., Mahon, R., Ayhan, D., Wijns, W., Sultan, S., & Soliman, O. (2025). Applications of Artificial Intelligence as a Prognostic Tool in the Management of Acute Aortic Syndrome and Aneurysm: A Comprehensive Review. *Journal of Clinical Medicine*, 14(23), 8420. <https://doi.org/10.3390/jcm14238420>
- Domanin, M., Vergara, C., Bissacco, D., & Trimarchi, S. (2022). Computational Fluid Dynamics to Assess Hemodynamic Forces in Abdominal Aortic Aneurysm. *Vascular and Endovascular Surgery*, 56(3), 349. <https://doi.org/10.1177/15385744211068609>
- El-Warrak, L., & de Farias, C. M. (2024). The State of the Art of Digital Twins in Health—A Quick Review of the Literature. *Computers*, 13(9), 228. <https://doi.org/10.3390/computers13090228>
- Masoumi Shahrababak, S., Youn, B. D., Cheng, H.-M., Chen, C.-H., Sung, S.-H., Mukkamala, R., & Hahn, J.-O. (2025). Deep Learning-Enabled Diagnosis of Abdominal Aortic

Aneurysm Using Pulse Volume Recording Waveforms: An In Silico Study. *Sensors*, 25(21), 6678. <https://doi.org/10.3390/s25216678>

Moll, F. L., Powell, J. T., Fraedrich, G., Verzini, F., Haulon, S., Waltham, M., van Herwaarden, J. A., Holt, P. J. E., van Keulen, J. W., Rantner, B., Schlösser, F. J. V., Setacci, F., & Ricco, J.-B. (2011). Management of Abdominal Aortic Aneurysms Clinical Practice Guidelines of the European Society for Vascular Surgery. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, Management of Abdominal Aortic Aneurysms. Clinical Practice Guidelines of the European Society for Vascular Surgery*, 41, S1–S58. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2010.09.011>

Sandeep Kumar, E., & Satya Jayadev, P. (2020). Deep Learning for Clinical Decision Support Systems: A Review from the Panorama of Smart Healthcare. In S. Dash, B. R. Acharya, M. Mittal, A. Abraham, & A. Kelemen (Eds.), *Deep Learning Techniques for Biomedical and Health Informatics* (pp. 79–99). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33966-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33966-1_5)

Saratkar, S. Y., Langote, M., Kumar, P., Gote, P., Weerarathna, I. N., & Mishra, G. V. (2025). Digital twin for personalized medicine development. *Frontiers in Digital Health*, 7, 1583466. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2025.1583466>

Yi, J.-E., Park, S., Kwon, O., Han, D., Huh, H., & Lee, B. Y. (2025). Evaluation of 4D Flow MRI-Derived Aortic Hemodynamics and Their Relationships With Left Ventricular Remodeling in Patients With Moderate Aortic Stenosis: A Preliminary Study. *Echocardiography*, 42(9), e70280. <https://doi.org/10.1111/echo.70280>