

# Case study of Submarine Disasters (Titan - Kursk) from a reliability perspective

Τμήμα: HMMY ΑΠΘ

Μάθημα: Αξιοπιστία Συστημάτων

Ακαδημαϊκό έτος: 2024-2025

Μαρία Μαμουγώρη

HMMY ΑΠΘ

Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

[mmamougi@ece.auth.gr](mailto:mmamougi@ece.auth.gr)

AEM: 10533

Αλέξανδρος Φωτιάδης

HMMY ΑΠΘ

Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

[afotiadis@ece.auth.gr](mailto:afotiadis@ece.auth.gr)

AEM: 10392

**Περιληπτικά** - Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη υποβρύχιων καταστροφών αναλύοντας τις περιπτώσεις των υποβρυχίων Kursk και Titan, από την οπτική της αξιοπιστίας των συστημάτων τους. Η ανάλυση εντοπίζει κρίσιμους παράγοντες αξιοπιστίας, όπως η δομική ακεραιότητα, η απόδοση των υλικών σε ακραίες συνθήκες και η αποτελεσματικότητα των συστημάτων ασφαλείας και επικοινωνίας. Οι περιπτωσιολογικές μελέτες των υποβρυχίων Kursk και Titan αποκαλύπτουν τον καταστροφικό αντίκτυπο της ανεπαρκούς συντήρησης, των σχεδιαστικών ατελειών και των αστοχιών υλικών. Χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες όπως η ανθεκτικότητα και η αξιολόγηση κινδύνου, η παρούσα εργασία παρέχει πληροφορίες για τους μηχανισμούς αστοχίας και προτείνει στρατηγικές για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των υποβρυχίων μέσω βελτιωμένων προτύπων σχεδίασμού, προηγμένων εφαρμογών υλικών και συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ

Η αξιοπιστία των υποβρυχίων αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα για τη λειτουργία, την ασφάλεια και την αποδοτικότητά τους, ιδιαίτερα σε απαιτητικά και ακραία περιβάλλοντα. Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας βασίζεται τόσο στην ανάλυση βασικών παραγόντων που την επηρεάζουν όσο και στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση και τη βελτίωσή της.

### A. Βασικοί Παράγοντες Αξιοπιστίας Υποβρυχίων

#### 1. Συστήματα Ηλεκτρονικών και Επικοινωνίας

Τα υποβρύχια εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα ηλεκτρονικά συστήματα και τις τεχνολογίες επικοινωνίας για την πλοήγηση, τον εντοπισμό και τη διαχείριση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η αποτυχία αυτών των συστημάτων μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για την αποστολή και την ασφάλεια του πληρώματος.

#### 2. Μηχανικά Συστήματα και Κινητήρες

Η αξιοπιστία των μηχανικών συστημάτων και των κινητήρων είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του υποβρυχίου. Αυτά τα συστήματα πρέπει να λειτουργούν απρόσκοπτα κάτω από μεγάλες πιέσεις και σε ακραίες συνθήκες.

#### 3. Συστήματα Ασφαλείας και Διάσωσης

Τα συστήματα ασφαλείας, όπως τα συστήματα διάσωσης και εκκένωσης, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προστασία του πληρώματος σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η αξιοπιστία αυτών των συστημάτων είναι καθοριστική για τη μείωση του

κινδύνου.

#### 4. Δομική Ακεραιότητα (Υλικό και Σχεδιασμός)

Η αντοχή των υλικών και ο σχεδιασμός του κύτους καθορίζουν τη δυνατότητα του υποβρυχίου να αντέξει την εξωτερική πίεση σε μεγάλα βάθη. Οποιαδήποτε αστοχία σε αυτόν τον τομέα μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες.

## B. Μέθοδοι Εκτίμησης Αξιοπιστίας

#### 1. Resilience Assessment

Αξιολογεί την ικανότητα του υποβρυχίου να αντέξει και να ανακάμψει από διαταραχές ή βλάβες στα συστήματά του.

#### 2. Risk Assessment

Αναλύει τους κινδύνους που συνδέονται με την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση του υποβρυχίου, με στόχο τη μείωση των πιθανών απειλών.

#### 3. Vulnerability Analysis

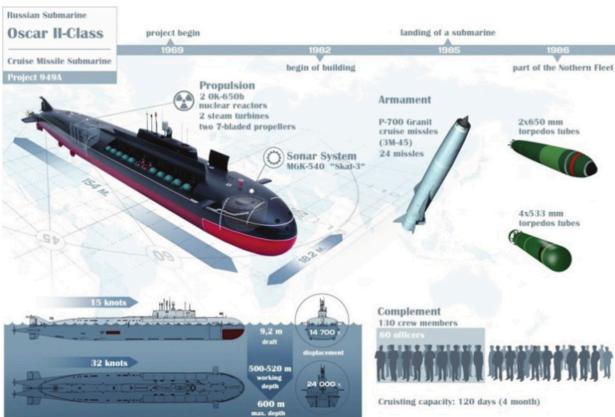
Εντοπίζει τις αδυναμίες στα συστήματα και στις δομές του υποβρυχίου, ώστε να ληφθούν μέτρα για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας.

#### 4. Business Continuity Management (BCM)

Εστιάζει στη διασφάλιση της συνέχισης της αποστολής, ακόμη και σε περίπτωση μερικής αποτυχίας των συστημάτων.

## II. KURSK CASE STUDY

### A. Ιστορική Αναδρομή



Το υποβρύχιο **Kursk**, ένα από τα πιο προηγμένα υποβρύχια της κλάσης **Oscar-II**, θεωρείται μέχρι σήμερα μία από τις πιο ισχυρές και εντυπωσιακές ναυτικές κατασκευές της Ρωσίας, κατατάσσοντας την κλάση αυτή στην **4η Θέση** ισχύος παγκοσμίως. Ωστόσο, η βύθισή του στις **12 Αυγούστου 2000** κατά τη διάρκεια στρατιωτικής άσκησης στη Θάλασσα του Μπάρεντς, αποτέλεσε μια από τις πιο τραγικές σελίδες στην ιστορία των υποβρυχίων.

Κατά τη διάρκεια της στρατιωτικής άσκησης, το υποβρύχιο ήταν εξοπλισμένο τόσο με dummy τορπίλες (για εξάσκηση) όσο και με κανονικές τορπίλες εξοπλισμένες με πυρηνικές κεφαλές, ο αριθμός των οποίων παραμένει άγνωστος μέχρι και σήμερα. Η καταστροφή ξεκίνησε με **δύο διαδοχικές εκρήξεις στο διαμέρισμα των τορπιλών**. Οι εκρήξεις αυτές:

- Προκάλεσαν την άμεση αποσυμπίεση και την καταστροφή των πρώτων διαμερισμάτων του υποβρυχίου.
- Επηρέασαν την εσωτερική δομή, αφήνοντας το **Kursk** χωρίς λειτουργικό σύστημα διάσωσης ή ανάδυσης.

Η καταστροφή είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια **119 ατόμων**, όλου του πληρώματος, καταγράφοντας ένα από τα χειρότερα ναυτικά ατυχήματα στη σύγχρονη ιστορία.

### B. RCA Ανάλυση

Η τραγωδία του υποβρυχίου **Kursk** στις **12 Αυγούστου 2000** αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά περιστατικά στην ιστορία των ναυτικών ατυχημάτων. Το **Root Cause Analysis (RCA)** που παρουσιάζεται εδώ απλοποιημένο, λειτουργεί τόσο ως χρονολογική απεικόνιση των γεγονότων όσο και ως εργαλείο κατανόησης των βαθύτερων αιτιών της καταστροφής.

#### 1. Έλλειψη Κατάρτισης (01):

Η επιτυχής στρατιωτική άσκηση του 1999 είχε ανεβάσει το ηθικό του πληρώματος. Ωστόσο, υπήρχε σοβαρή έλλειψη κατάρτισης και προετοιμασίας για την αντιμετώπιση κρίσιμων καταστάσεων.

#### 2. Στρατιωτική Άσκηση 2000 (02):

Το **Kursk** συμμετείχε σε στρατιωτική άσκηση μεγάλης κλίμακας στη Θάλασσα Barents, παρά το γεγονός ότι είχε παραμείνει κακοσυντηρημένο και άπραγο για

αρκετούς μήνες.

#### 3. Σχεδιαστικά Σφάλματα του Στόλου (03):

Υπήρξαν σχεδιαστικές αδυναμίες στον εξοπλισμό και τα συστήματα του στόλου, που ενδέχεται να συνέβαλαν στη μετέπειτα καταστροφή.

#### 4. Ύπαρξη υποθαλάσσιων οροσειρών (04):

Η ύπαρξη υποθαλάσσιων οροσειρών στη Θάλασσα Barents αποτελούσε γεωγραφικό παράγοντα που περιέπλεκε τις υποβρύχιες ασκήσεις και ενδέχεται να συνέβαλε σε σύγκρουση ή δυσλειτουργίες.

#### 5. Προετοιμασία για Άσκηση Σκοποβολής (05):

Το πλήρωμα προετοιμαζόταν για τη δεύτερη βολή μετά την επιτυχημένη εκτόξευση της πρώτης τορπίλης, χωρίς να γνωρίζει ότι επίκειτο ένα καταστροφικό γεγονός. Υπήρχαν υποβρύχιες παρακολουθήσεις από άλλα σκάφη, γεγονός που πιθανώς έπαιξε ρόλο στη συνέχεια.

#### 6. Σύγκρουση με Άλλο Υποβρύχιο (06):

Εικάζεται ότι σημειώθηκε σύγκρουση με άλλο υποβρύχιο, που βρισκόταν στην περιοχή για να παρακολουθήσει την άσκηση.

#### 7. Έκρηξη της Τορπίλης (07):

Στο θάλαμο τορπιλών, σημειώθηκε μικρή έκρηξη πιθανώς λόγω βλάβης σε τορπίλη τύπου USET-80.

#### 8. Είσοδος Νερού στο Δωμάτιο Τορπιλών (08):

Η έκρηξη προκάλεσε διαρροή θαλασσινού νερού στον θάλαμο τορπιλών, δημιουργώντας επικίνδυνες συνθήκες.

#### 9. Διαταγή Αναδύσεως (09):

Η διαταγή για ανάδυση δεν ολοκληρώθηκε, καθώς το σύστημα ελέγχου είχε ήδη υποστεί σοβαρές ζημιές.

#### 10. Βραχιονόκλωμα στα Ηλεκτρονικά (10):

Η είσοδος νερού προκάλεσε βραχιονόκλωμα, οδηγώντας στην απώλεια βασικών συστημάτων του υποβρυχίου.

#### 11. Αυτόματο Shutdown Πυρηνικών Αντιδραστήρων (11.1):

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες του υποβρυχίου τέθηκαν σε αυτόματο shutdown για λόγους ασφαλείας, όταν το **Kursk** τέθηκε εκτός ελέγχου.

#### 12. Kursk Εκτός Ελέγχου (11.2):

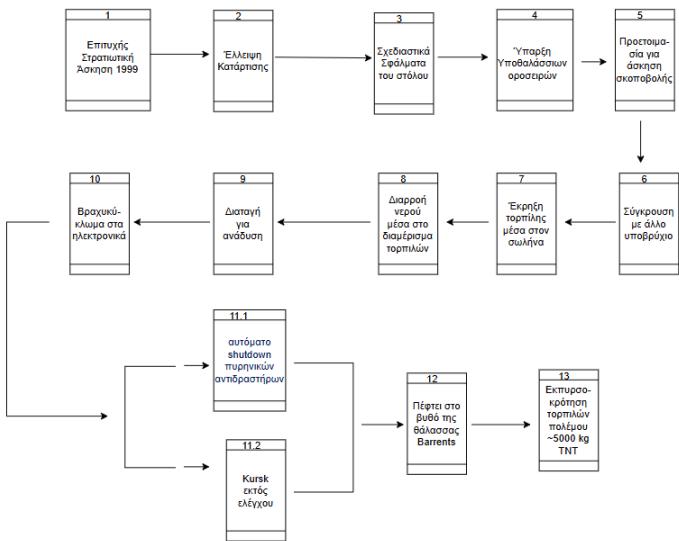
Το υποβρύχιο βρέθηκε σε πλήρη απώλεια ελέγχου, οδηγώντας στη μοιραία πτώση του.

#### 13. Πτώση στον Πυθμένα της Θάλασσας Barents (12):

Το υποβρύχιο βυθίστηκε στον πυθμένα, καθιστώντας αδύνατη τη διάσωση.

#### 14. Εκρηκτική Αντίδραση (13):

Ακολούθησε δεύτερη έκρηξη, η οποία προκλήθηκε από τις τορπίλες πολέμου που περιείχαν περίπου **5000 kg TNT**, ολοκληρώνοντας την καταστροφή.



RCA	Sub-system	P	Action	Actor(s)
1	fleet	+	success	Kursk crew, fleet
2	Kursk	-		Kursk crew
3	fleet	-	preparedness	Kursk crew, fleet
4	environment	-		
5	Kursk	+	exercise	Kursk crew
6	Kursk, other sub.	-	ram	Both crews
7	Kursk	-	explosion	
8	Kursk	-	leakage	
9	Kursk	+	order	Kursk's captain
10	Kursk	n.r	short-circuit, loss of control	
11.1	Kursk	n.r	shutdown reactor	
11.2	Kursk	n.r	loss of control	
12	Kursk, environment	n.r	grounding, loss of control	
13	Kursk	n.r	detonation, loss of control	
End	Kursk	n.r		

RCA events	Risk assessment	Resilience assessment
1	N	Y
2	N	Y
3	N	Y
4	Y	Y
5	N	?
6	Y	Y
6.1	N	Y
6.2	N	Y
6.3	Y	Y
6.4	?	Y
6.5	?	Y
7	Y	Y
8	Y	Y
9	N/Y	Y
10	Y	N
11.1	Y	N
11.2	Y	N
12	Y	N
13	Y	N
Summary	Y: 10 of 19	Y: 13 of 19

Οι παραπάνω πίνακες και το διάγραμμα περιγράφουν μια εκτενή ανάλυση της καταστροφής του υποβρυχίου Kursk, εστιάζοντας τόσο στα συστηματικά αίτια όσο και στην αξιολόγηση κινδύνου και ανθεκτικότητας.

#### Ανάλυση Αιτιών (RCA):

Ο πρώτος πίνακας ενσωματώνει τη μεθοδολογία "Root Cause Analysis" (RCA), καταγράφοντας βασικά υποσυστήματα, την πρόσδο (P), ενέργειες, και τους εμπλεκόμενους φορείς. Τα κύρια γεγονότα (π.χ. επιτυχίες, αποτυχίες, και ζημιές) αναλύονται βάσει της αλληλουχίας τους, ξεκινώντας από την αρχική επιτυχία του στόλου μέχρι την τελική έκρηξη που ολοκλήρωσε την καταστροφή. Κάθε βήμα συνδέεται με κρίσιμες ενέργειες, όπως το βραχυκύκλωμα στα ηλεκτρονικά (RCA 10) και το shutdown των πυρηνικών αντιδραστήρων (RCA 11.1).

#### Αξιολόγηση Κινδύνου και Ανθεκτικότητας:

Ο δεύτερος πίνακας συνδέει τα γεγονότα RCA με τις έννοιες της **αξιολόγησης κινδύνου** και της **ανθεκτικότητας**. Ειδικότερα, αξιολογούνται οι δυνατότητες πρόληψης των κινδύνων ("Risk assessment") και οι ικανότητες ανάκαμψης των συστημάτων ("Resilience assessment"). Σημαντικές παρατηρήσεις περιλαμβάνουν:

- Οι περισσότερες φάσεις (13 από 19) επέδειξαν κάποια μορφή ανθεκτικότητας.
- Παρόλα αυτά, μόνο 10 από τα 19 γεγονότα περιλαμβάνουν σαφή αξιολόγηση κινδύνου, γεγονός που υποδεικνύει πιθανές ελλείψεις στον προγραμματισμό.

#### Συσχέτιση με το Διάγραμμα:

Τα παραπάνω δεδομένα συσχετίζονται άμεσα με το

διάγραμμα ροής γεγονότων της καταστροφής του Kursk, αποσαφηνίζοντας πώς οι συστημές αποτυχίες και οι εξωτερικοί παράγοντες, όπως οι υποθαλάσσιες οροσειρές, συνεισέφεραν στην τελική κατάρρευση.

Η ανάλυση αυτή παρέχει μια σφαιρική εικόνα της τραγωδίας του Kursk, ενισχύοντας την κατανόηση της αλληλεπιδρασης μεταξύ ανθρώπινων λαθών, τεχνικών δυσλειτουργιών και περιβαλλοντικών παραμέτρων.

### C. Emergency Cooling System

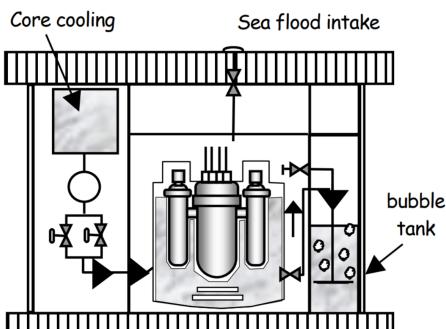
Ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που αντιμετωπίστηκαν μετά τη βύθιση ήταν η **ασφαλής ανάσυρση των συντριμμάτων** και η αποφυγή πυρηνικής καταστροφής.

Το Emergency Cooling System του Kursk, το οποίο βρισκόταν στο διαμέρισμα 6, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της σταθερότητας των δύο πυρηνικών αντιδραστήρων του υποβρυχίου. Παρά τη σοβαρότητα της κατάστασης, το σύστημα παρέμεινε λειτουργικό, αποτρέποντας την υπερθέρμανση και την πιθανή καταστροφή των αντιδραστήρων. Η λειτουργία του εξασφάλισε:

- **Διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στους πυρήνες των αντιδραστήρων..**
- **Αποφυγή πυρηνικής καταστροφής, που θα είχε καταστροφικές συνέπειες για τη θαλάσσια περιοχή και το περιβάλλον.**

Η δεύτερη, μεγαλύτερη έκρηξη που σημειώθηκε στο Kursk κατέστρεψε το υποβρύχιο μέχρι και το **διαμέρισμα 5**. Ωστόσο, το **διαμέρισμα 6**, όπου βρίσκονταν οι πυρηνικοί αντιδραστήρες και το Emergency Cooling System, έμεινε άθικτο. Αυτό ήταν ζωτικής σημασίας, καθώς διασφαλίστηκε ότι οι αντιδραστήρες δεν επηρεάστηκαν από τη βύθιση και τις εκρήξεις.

Μετά το ναυάγιο, η ασφαλής ανάσυρση των συντριμμάτων αποτέλεσε πρωταρχικό στόχο, ιδιαίτερα λόγω της παρουσίας των πυρηνικών αντιδραστήρων. Χάρη στη λειτουργία του Emergency Cooling System, τα απομεινάρια του υποβρυχίου ανασύρθηκαν **επιτυχώς**, χωρίς να δημιουργηθεί επιπλέον κίνδυνος. Η σταθερότητα που παρείχε το σύστημα κατέστησε δυνατή την ασφαλή μεταφορά των αντιδραστήρων για περαιτέρω διαχείριση.



### III. TITAN CASE STUDY

#### A. Ιστορικά

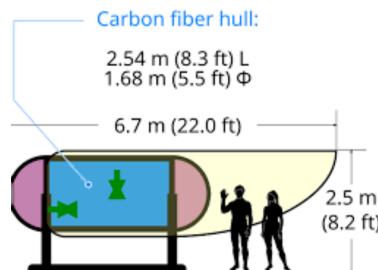
Το υποβρύχιο Titan, κατασκευασμένο από την εταιρεία OceanGate, σχεδιάστηκε για την εξερεύνηση βαθέων υδάτων, με κύριο στόχο την επίσκεψη του ναυαγίου του Τίτανικου, σε βάθος περίπου 3.800 μέτρων. Στις 18 Ιουνίου του 2023, κατά τη διάρκεια αποστολής στο ναυάγιο του Τίτανικου, το Titan έχασε την επικοινωνία με την επιφάνεια και αργότερα εντοπίστηκαν συντρίμμια του, επιβεβαιώνοντας την καταστροφή του. Η βύθιση του προκάλεσε την απώλεια πέντε επιβανόντων και αποτέλεσε σημείο αναφοράς για την ασφάλεια και τα δρια της υποβρύχιας τεχνολογίας.

Το περιστατικό αυτό υπογραμμίζει τη ζωτική σημασία της προληπτικής συντήρησης, της χρήσης υλικών υψηλών προδιαγραφών και της επαρκούς σχεδίασης που λαμβάνει υπόψη τις καταπονήσεις στα μεγάλα βάθη. Επιπλέον, ενισχύει την ανάγκη για συνεχή έλεγχο της ποιότητας και για διαρκή επανεκτίμηση των υλικών και τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε κρίσιμες δομές, όπως τα υποβρύχια.

#### B. Δομή Υποβρυχίου

Το υποβρύχιο είχε 6,7 μέτρα μήκος και 2,5 μέτρα ύψος, με χωρητικότητα 5 ατόμων (4 επιβάτες και 1 χειριστή).

Το κύριο κέλυφος του υποβρυχίου ήταν κατασκευασμένο από **5 στρώσεις ανθρακονημάτων**, υλικό γνωστό για την αντοχή του σε εφελκυσμό και το χαμηλό βάρος του. Τα δύο άκρα του υποβρυχίου αποτελούνταν από **θόλους τιτανίου**, οι οποίοι ήταν συνδεδέμενοι με το κέλυφος μέσω **δακτύλων τιτανίου**. Αυτοί οι δακτύλοι είχαν στερεωθεί στα ανθρακονήματα με τη χρήση ειδικής κόλλας, διασφαλίζοντας τη στεγανότητα και την αντοχή της σύνδεσης. Ο μπροστινός θόλος τιτανίου λειτουργούσε και ως **καταπακτή**, με τοποθετημένο πάνω του ένα **παράθυρο θέασης** από υλικό Perspex, προσφέροντας θέα στο εξωτερικό περιβάλλον.



#### Γ. Σύνθετα Υλικά Υποβρύχια

Στα **πλεονεκτήματα** των υποβρυχίων με σύνθετα υλικά συνυπολογίζονται:

1. Μειωμένα Μαγνητικά και Θερμικά Αποτυπώματα:

Τα σύνθετα υλικά μειώνουν τη μαγνητική και θερμική υπογραφή των υποβρυχίων, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της δυσδιάκριτης παρουσίας τους σε εχθρικά περιβάλλοντα.

2. Μείωση Βάρους:

Η ελαφριά κατασκευή των σύνθετων υλικών επιτρέπει τη μείωση του συνολικού βάρους του υποβρυχίου, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή

αποδοτικότητα και τη χωρητικότητα.

### 3. Ανθεκτικότητα στη Διάβρωση:

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως το θαλασσινό νερό, σημαντικό παράγοντα διάβρωσης των υποβρυχίων.

Τα μειονεκτήματα χρήσης σύνθετων υλικών αφορούν:

#### 1. Αντοχή στην Πίεση:

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα σύνθετα υλικά συχνά υστερούν σε αντοχή υπό συνθήκες υψηλής πίεσης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια σε μεγάλα βάθη.

#### 2. Υψηλό Κόστος:

Η κατασκευή και η επεξεργασία σύνθετων υλικών απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες και εξειδικευμένη τεχνογνωσία, αυξάνοντας το κόστος παραγωγής.

#### 3. Ρωγμές και Αποκόλληση:

Τα σύνθετα υλικά είναι επιρρεπή στην εμφάνιση ρωγμών και αποκολλήσεων, ειδικά σε συνθήκες έντονου μηχανικού στρες.

#### 4. Πολύπλοκα Μοντέλα Σχεδίασης:

Η εφαρμογή σύνθετων υλικών απαιτεί εξειδικευμένα μοντέλα σχεδίασης, γεγονός που επιβαρύνει τη διαδικασία ανάπτυξης.

Η απόδοση των σύνθετων υλικών στα υποβρύχια επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- **Αστοχία Λυγισμού και Υλικού:** Προβλήματα σταθερότητας που μπορεί να προκύψουν υπό μηχανικές καταπονήσεις. Η αστοχία υλικού επέρχεται λόγω των υψηλών τάσεων που ασκούνται σε ένα υλικό που προκαλούν ρωγμές ή θραύση, ενώ η αστοχία λυγισμού αναφέρεται στην παραμόρφωση της δομής λόγω υπερβολικής πίεσης κάμψης.
- **Υποβάθμιμη Υλικού:** Λόγω μακροχρόνιας έκθεσης σε ακραία περιβάλλοντα, αλλοιώνονται σταδιακά οι ιδιότητες του υλικού.
- **Διακυμάνσεις Πίεσης:** Οι αλλαγές πίεσης μπορεί να προκαλέσουν φθορά ή ρωγμές στο υλικό, συνήθως λόγω εναλλαγής βάθους.
- **Διακυμάνσεις Θερμοκρασίας:** Οι έντονες αλλαγές θερμοκρασίας επηρεάζουν τη δομή και τη σταθερότητα των υλικών καθώς προκαλούν διαστολές, συστολές ή ρωγμές στο υλικό.

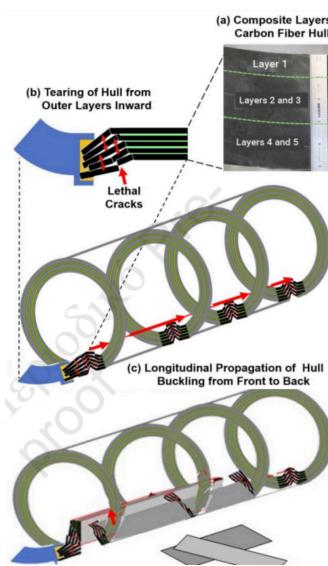
Όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία των σύνθετων υλικών έχουν από μία κρίσιμη τιμή για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του υποβρυχίου. Ωστόσο οι κρίσιμες τιμές αυτές υπολογίζονται μέσα από περίπλοκα μαθηματικά μοντέλα που απαιτούν πολλές πράξεις. Για τον λόγο αυτό και σε συνδυασμό με την έλλειψη τεχνογνωσίας και τις περιορισμένες γνώσεις πάνω στην κατασκευή δομών από σύνθετα υλικά, συνήθως επιλέγονται πιο εμπειρικοί δείκτες για να υπολογιστούν οι κρίσιμες τιμές των συνθηκών στις οποίες το υποβρύχιο μπορεί να αντέξει.

### Δ. Κύριες Αιτίες Βύθισης

Η επικρατούσα άποψη για την αιτία βύθισης του υποβρυχίου Titan συνδέεται με τη βύθιση λόγω αστοχίας υλικού.

Οπως υποδεικνύεται από τα δεδομένα, μια μικρή διαρροή επέτρεψε την είσοδο νερού στο εσωτερικό του κύτους, οδηγώντας σε απότομη εσωτερική κάμψη. Αυτή η διαδικασία, σε συνδυασμό με την αύξηση της εξωτερικής πίεσης σε μεγάλα βάθη, κατέληξε σε καταστροφική διαμήκη θραύση.

Η τραγική κατάληξη αυτής της αστοχίας προκύπτει ως αποτέλεσμα ενός συνδυασμού ανεπαρκούς σχεδιασμού, ελλιπούς συντήρησης και χρήσης υλικών που δεν άντεξαν την καταπόνηση.



Στην ανάλυση παρουσιάζεται πώς τα σύνθετα στρώματα του κύτους αποκόπηκαν και πώς οι ρωγμές εξελίχθηκαν σε θανατηφόρες αστοχίες. Η προοδευτική λυγιστική κατάρρευση, η οποία ξεκίνησε από το μπροστινό μέρος και επεκτάθηκε προς τα πίσω, απεικονίζεται στο διάγραμμα. Αυτή η εξέλιξη υποδεικνύει τα σημεία αδυναμίας στο υλικό και τον σχεδιασμό του υποβρυχίου. Κύρια αίτια αστοχίας του εν λόγω υποβρυχίου αποτέλεσαν συν τοις άλλοις:

1. **Σχεδιαστική Ανεπάρκεια:**
  - Έλλειψη επαρκούς σχεδίασης ώστε να αντέχει τις υψηλές πιέσεις που ασκούνται στα μεγάλα βάθη.
2. **Χαμηλός Συντελεστής Ασφαλείας Λυγισμού:**
  - Διαμήκεις θραύσεις του κύτους.
  - Εύρεση πλήθους ορθογωνίων πλακών στον πυθμένα, ένδειξη σημαντικής δομικής αστοχίας.
3. **Έλλειψη Τακτικής Συντήρησης:**
  - Η παραμέληση τακτικών ελέγχων και επισκευών οδήγησε σε συσσώρευση φθοράς και αδυναμία αντοχής στις πιέσεις.
4. **Υποβάθμιμη Υλικού:**
  - Αποκόλληση της κόλλας μεταξύ των στρώσεων ανθρακονήματος, προκαλώντας προοδευτική αποδυνάμωση της δομής του κύτους.

## E. Ανάλυση Πιθανής Αλληλουχίας Γεγονότων

Η καταστροφή που αναλύεται παρουσιάζεται σε βάθος μεταξύ 3.700 και 3.500 μέτρων, βάθος στο οποίο χάθηκε η επικοινωνία με το πλοίο στην επιφάνεια της θάλασσας, λίγο πριν το συνολικό βάθος της θάλασσας (3.777 μέτρα). Οι εξαιρετικά υψηλές πιέσεις σε αυτά τα βάθη ασκούν ανυπολόγιστες δυνάμεις στις δομές του υποβρυχίου, οι οποίες, αν δεν έχουν σχεδιαστεί επαρκώς, οδηγούν σε προοδευτική αποτυχία.

### 1. Δομικές Αδυναμίες και Κυκλική Φόρτιση:

Τα υποβρύχια υφίστανται κυκλική φόρτιση κατά τη διάρκεια των επαναλαμβανόμενων καταδύσεων και αναδύσεων. Οι δομικές αδυναμίες που σχετίζονται με το κύτος, είτε από την κατασκευή είτε από μακροχρόνια φθορά, γίνονται αφετηρία για την αποτυχία.

### 2. Σπάσιμο και Λυγισμός:

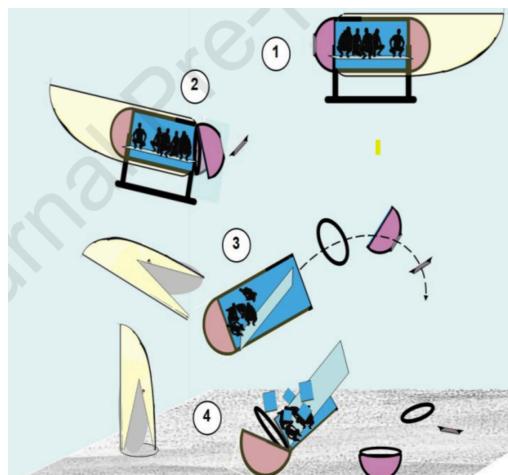
Η συσσώρευση καταπονήσεων οδηγεί σε σπάσιμο ή λυγισμό σε συγκεκριμένα σημεία του κύτους. Αυτά τα σημεία είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στις υψηλές πιέσεις που επικρατούν σε μεγάλα βάθη (3.700-3.500 μέτρα), προκαλώντας απότομη απώλεια δομικής αντοχής.

### 3. Κατάρρευση και Ενδόρρηξη:

Μετά το αρχικό σπάσιμο, το κύτος καταρρέει προοδευτικά λόγω της εξωτερικής πίεσης. Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει ταχεία κατάρρευση και πιθανή ενδόρρηξη.

### 4. Επιπτώσεις στο Πλήρωμα:

Η καταστροφή του κύτους οδηγεί σε άμεση κατάρρευση του εσωτερικού περιβάλλοντος, με τραγικές επιπτώσεις για το πλήρωμα, καθώς δεν υπάρχει περιθώριο επιβίωσης σε τέτοιες συνθήκες.



## IV. ΜΕΛΛΟΝ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ

Η αξιοπιστία των υποβρυχίων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία τους, ειδικά υπό απαιτητικές συνθήκες. Η παρούσα ανάλυση επικεντρώνεται στις καινοτόμες προσεγγίσεις που βελτιώνουν την αξιοπιστία των υποβρυχίων, όπως αυτές προκύπτουν από την σχετική βιβλιογραφία.

### A. Προσεγγίσεις

#### 1. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός των υποβρυχίων απαιτεί τη συνεχή αναβάθμιση των προτύπων με βάση την ανάλυση πολλαπλών σεναρίων, την ενσωμάτωση ανθεκτικών υλικών και την εξασφάλιση υψηλού συντελεστή ασφάλειας. Η χρήση μοντέλων προσομοίωσης βοηθά στην πρόβλεψη και αξιολόγηση της αποδοτικότητας διαφορετικών λύσεων, εστιάζοντας σε παραμέτρους όπως η αντοχή και η ευστάθεια.

#### 2. ΑΚΡΙΒΕΣΤΕΡΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στα υποβρύχια απαιτούν δοκιμές υπό ρεαλιστικές συνθήκες, ώστε να διασφαλίζεται η απόδοσή τους. Οι καινοτόμες στα υλικά και η βελτίωση των διαδικασιών συγκόλλησης προσφέρουν σημαντική πρόοδο, ενώ παράλληλα μειώνουν τις πιθανότητες αστοχίας κατά τη λειτουργία.

#### 3. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

Η ενσωμάτωση αισθητήρων υψηλής ακρίβειας και συστημάτων συναγερμού επιτρέπει την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Μέσα από την προβλεπτική ανάλυση δεδομένων, οι χειριστές έχουν τη δυνατότητα να προλαμβάνουν πιθανά προβλήματα πριν αυτά εξελιχθούν σε σοβαρές δυσλειτουργίες.

#### 4. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η αξιοπιστία των υποβρυχίων εξαρτάται επίσης από τις διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου κατά την κατασκευή. Η ενίσχυση της παραγωγικής τεχνολογίας, η τυποποίηση των διαδικασιών και η χρήση εξελιγμένων μεθόδων ελέγχου διασφαλίζουν την μείωση των ανθρωπίνων λαθών και την κατασκευή εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας που πληρούν τις απαιτήσεις ασφαλείας.

### B. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η βελτίωση της αξιοπιστίας των υποβρυχίων απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει την τεχνολογική καινοτομία με την ενίσχυση της σχεδίασης, της παρακολούθησης και του ποιοτικού ελέγχου. Η συστηματική ανάλυση των παραγόντων αυτών συμβάλλει στην ανάπτυξη υποβρυχίων που ανταποκρίνονται στις αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας και λειτουργικότητας.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ**

- [1] Weijermars, R. (2024), Comprehensive Assessment of Deep-Water Vessel Implosion Mechanisms: OceanGate's Titan Submersible Failure Sequence Explained., *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105340>.
- [2] Large John H, (2021), Forensic Assessments of the Nuclear Propulsion Plants of the Submarines HMS Tireless and RF Northern Fleet Kursk, *Large & Associates, Consulting Engineers* , [Online]. Available: <http://www.largeassociates.com/LA%20reports%20&%20papers/Kursk/TirelessKurskForensic.pdf>.
- [3] Leksin, A., Barth, U., & Mock, R. (2018), The Kursk submarine disaster in view of resilience assessment, *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World – Haugen et al. (Eds)*, Taylor & Francis. [Online]. Available: <https://www.taylorfrancis.com/reader/read-online/599fe65f-971b-448d-b382-68590051fe04/chapter/pdf?context=ubx>.
- [4] Matos, H., Ngwa, A. N., Chaudhary, B., & Shukla, A. (2024). Review of Implosion Design Considerations for Underwater Composite Pressure Vessels., *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1468. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12091468>.