



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

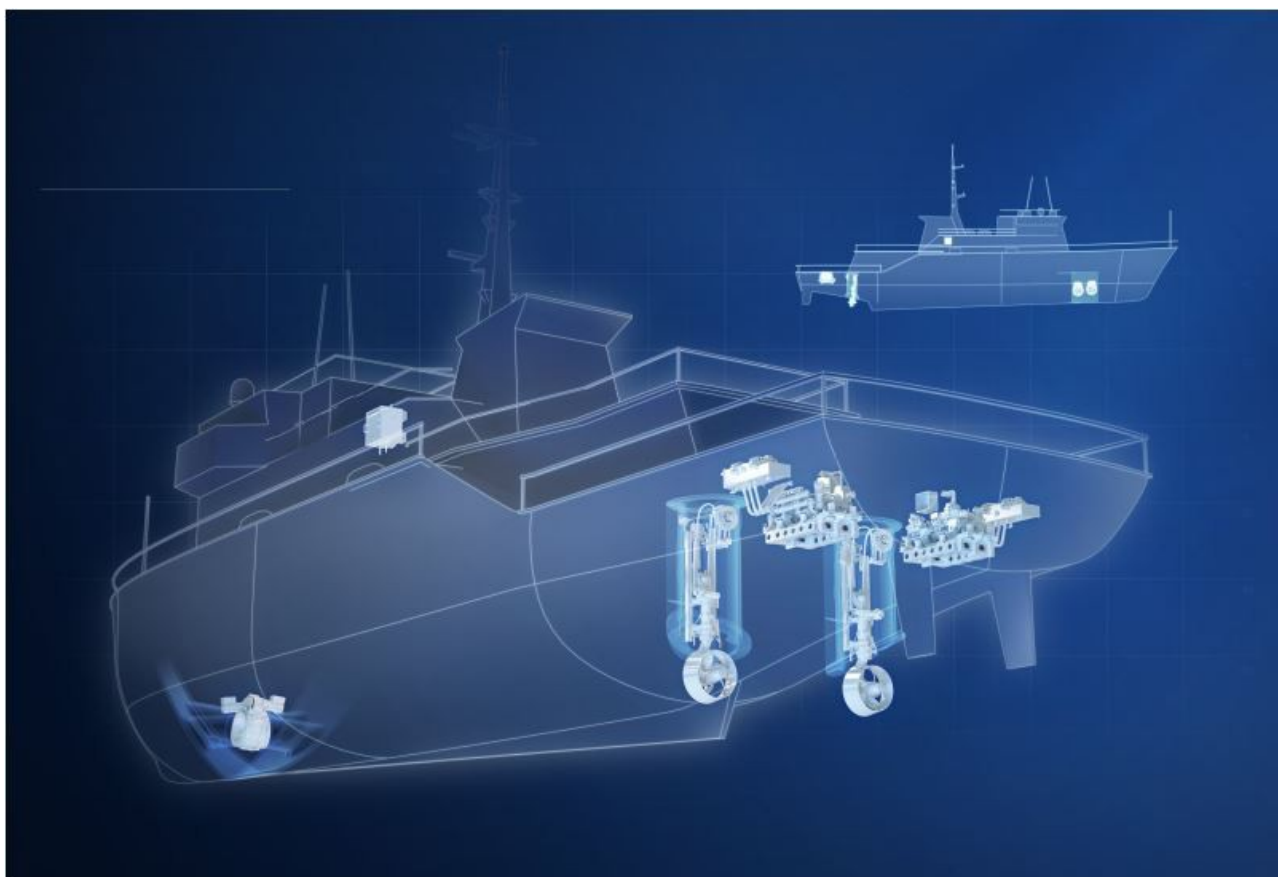


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ - Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ - Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»

Το Σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης Πλοίων και η Ασαφής Λογική ως Μέθοδος Ελέγχου



Ημερομηνία Παράδοσης: Φεβρουάριος 2022
Ονοματεπώνυμο Σπουδαστή: ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΗΛΙΟΣ
Ονοματεπώνυμο Επιβλέποντος Καθηγητή: ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΖΑΧΑΡΙΑ

Το Σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης Πλοίων και η Ασαφής Λογική ως Μέθοδος Ελέγχου

Dynamic Positioning, a Fuzzy Logic Approach

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΖΑΧΑΡΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

.....

ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

.....

ΣΥΜΕΩΝΑΚΗ ΕΛΕΝΗ

.....

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αλέξανδρος Πήλιος του Πέτρου, με αριθμό μητρώου 8066244 φοιτητής του Διϋδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

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

Ο δηλών

Ημερομηνία



11-04-2022

ΤΙΤΛΟΣ

Το Σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης Πλοίων και η Ασαφής Λογική ως Μέθοδος Ελέγχου

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Αλέξανδρος Πηλιος

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Διιδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αφενός η συνοπτική περιγραφή των βασικών μερών και αρχών λειτουργίας της τεχνολογίας Δυναμικής Τοποθέτησης (dynamic positioning - DP), και αφετέρου η εφαρμογή της ασαφούς λογικής ως τρόπου επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος ελέγχου. Η δυναμική τοποθέτηση είναι ένα σύστημα ελέγχου της θέσης και της διεύθυνσης του πλοίου με την χρήση των κύριων και βοηθητικών προωθητών του. Για τον αλγόριθμο ελέγχου αυτής της διεργασίας, οι επικρατέστερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές συστημάτων DP, είναι ο έλεγχος βάσει μαθηματικού μοντέλου πρόγνωσης (MPC) και ο αναλογικός – ολοκληρωτικός - διαφορικός (PID) έλεγχος. Η εύρεση των κατάλληλων ρυθμίσεων ενός PID ελεγκτή είναι μια δύσκολη διαδικασία, η οποία βασίζεται κυρίως σε εμπειρικούς κανόνες, όπως ο κανόνας Ziegler-Nichols. Ωστόσο, τα συμπεράσματα που εξάγονται στη συνέχεια, δείχνουν πως οι κατάλληλες ρυθμίσεις για τον PID, μπορούν εύκολα να υπολογιστούν αυτόματα και να επαναπροσαρμόζονται με την χρήση του προσαρμοστικού νευρο-ασαφούς συστήματος συμπερασμού ANFIS.

Η εργασία, αποτελείται συνολικά από 4 κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την Εισαγωγή όπου γίνεται μία σύντομη παρουσίαση των βασικών μερών της εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, ξεδιπλώνεται το Θεωρητικό Υπόβαθρο στο οποίο αναλύονται διεξοδικά το Σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης και η Ασαφής Λογική. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται η σχετική Μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του νευρώνα ANFIS, ενώ στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα αυτής της προσπάθειας. Τέλος, ακολουθούν η σχετική Βιβλιογραφία και τα Παραρτήματα ως βοηθητικό υλικό.

Λέξεις-κλειδιά: Δυναμική Τοποθέτηση, Αναλογικός – Ολοκληρωτικός - Διαφορικός Έλεγχος, Προσαρμοστικά Νευρο-Ασαφή Συστήματα, Νευρωνικά δίκτυα

ABSTRACT

The scope of this master's thesis is to present the basic principles of the dynamic positioning technology for ships (DP) and to propose a neuro-fuzzy logic approach for its control algorithm. Dynamic Positioning (DP) is a vessel capability provided via an integration of a variety of individual systems and functions. A computer control system automatically maintains a vessel's position and heading by using her own propellers and thrusters. The most common algorithm methods used by DP manufacturers today is model predictive control (MPC) and proportional-integral-derivative (PID) control. Finding the right gain parameters of a PID controller can become a hard task and it is often based on trial and error techniques like the Ziegler-Nichols method. For this case study, an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) will be used to automatically tune a PID controller of a Dynamic Positioning System of a vessel.

This work consists of 4 parts. The first part is the Introduction which is a short brief of what follows next. In the second part lies the Theoretical Background which covers dynamic positioning and fuzzy-logic aspects. The third part is the Methodology for creating the ANFIS neural network. The fourth and last part is the conclusion and discussion over possible future applications.

Keywords: Dynamic Positioning, PID Tuning, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems, Neural Networks, ANFIS-PID

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται στους γονείς μου,
Πέτρο και Ιουλία*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΟΝΥΜΩΝ.....	11
A ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
B ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	14
1 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ.....	15
1.1 Το χρονικό της αναπτυξης του DP.....	15
1.2 Τύποι πλοίων που χρησιμοποιούν την τεχνολογία DP.....	19
1.3 Πλεονεκτήματα του DP.....	22
1.4 Κλάσεις, αρχιτεκτονική και βαθμός εφεδρικότητας DP.....	22
1.5 Τα υποσυστήματα του DP.....	24
1.5.1 Τροφοδοσία.....	24
1.5.2 Προωθητές.....	25
1.5.3 Περιβαλλοντικοί αισθητήρες.....	26
1.5.4 Συστήματα Εντοπισμού Θέσης.....	26
1.5.5 Υπολογιστής πραγματικού χρόνου (RTC).....	26
1.5.6 Διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (MMI/HMI).....	27
1.5.7 Χειριστής.....	28
1.6 Κινήσεις και βαθμοί ελευθερίας.....	30
1.7 Σύστημα διαχείρισης ισχύος/ενέργειας (PMS/EMS).....	32
1.8 Ηλεκτρικοί προωθητές και έλεγχος προωθητών.....	34
1.9 Συστήματα εντοπισμού θέσης.....	36
1.9.1 Δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης.....	37
1.9.2 Υδροακουστικά συστήματα εντοπισμού θέσης.....	37
1.9.3 Ελαφρύ τεντωμένο καλώδιο (light taut wire – LTW).....	39
1.9.4 Συστήματα εντοπισμού θέσης Laser.....	41
1.9.5 Συστήματα εντοπισμού θέσης μικροκυμάτων και RADAR.....	42
1.10 Περιβαλλοντικοί αισθητήρες.....	43
1.10.1 Αισθητήρας ανέμου.....	43
1.10.2 Γυροπυξίδα.....	43
1.10.3 Μονάδα αναφοράς κίνησης (MRU).....	44
1.11 Εποπτεία και έλεγχος κινήσεων πλοίου από το DP.....	45
1.11.1 Το μαθηματικό μονέλο.....	46
1.11.2 Ο άνεμος στο μαθηματικό μοντέλο.....	47
1.11.3 Ανατροφοδότηση της θέσης του πλοίου.....	48
1.11.4 Ανατροφοδότηση του θαλάσσιου ρεύματος.....	48
1.11.5 Η λογική καθορισμού των προωθητών (TAL).....	49
1.11.6 Το φίλτρο Kalman.....	49
2 ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ.....	51
2.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική.....	51
2.2 Κλασική θεωρία συνόλων και ασαφή σύνολα.....	52
2.3 Γλωσσικές μεταβλητές και ασαφείς τελεστές.....	54
2.4 Αιτιοκρατικότητα στην ασαφή λογική.....	55
2.5 Αποασαφοποίηση.....	56
2.6 Νευρο-ασαφή συστήματα.....	57
2.7 Η αρχιτεκτονική ANFIS και ο αλγόριθμος μάθησης back-propagation.....	58
Γ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	61
3. ΡΥΘΜΙΣΗ PID ΕΛΕΓΚΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΟ-ΑΣΑΦΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	62

3.1 Ο ελεγκτής PID.....	62
3.2 Παραμετροποίηση κερδών PID ελεγκτή	64
3.3 Μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλου ANFIS.....	64
3.4 Βρόχος εκτέλεσης μοντέλου ANFIS.....	65
3.5 Βρόχος δημιουργίας εκπαιδευτικής βάσης δεδομένων.....	67
3.6 Αποθήκευση εκπαιδευτικής βάσης δεδομένων.....	68
3.7 Σχεδίαση και εκπαίδευση νευρο-ασαφούς μοντέλου.....	69
3.8 Τοπολογία ANFIS.....	73
Δ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΚΛΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ DP.....	79

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΟΝΥΜΩΝ

DP	Dynamic Positioning
ANFIS	Adaptive Network-based Fuzzy Inference System
ANN	Artificial Neural Networks
CapEx	Capital Expenditure
CoA	Center of Area
CoG	Center of Gravity
DNV	Det Norske Veritas
DARPS	Differential Absolute and Relative Positioning System
DGPS	Differential Global Positioning System
DSV	Diving Support Vessel
DPC	Dynamic Positioning Controller
DPO/SDPO/JDPO	Dynamic Positioning Operator/Senior/Junior
FMEA	Failure Mode Effects Analysis
FMECA	Failure Mode Effects and Criticality Analysis
FoM	First of Maxima
FPSO	Floating Production and Storage and Offloading
GLONASS	GLOBAL Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HiPap	High Precision Acoustic Positioning System
HPR	Hydro-acoustic Position Reference
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IMCA	International Marine Contractors Association
IMO	International Maritime Organisation
LTW	Light Taut-Wire
LBL/SBL/USBL/SSBL	Long/Short/Ultra-Short/Super-Short Base-Line
MMI/HMI	Man-Machine Interface/Human-Machine Interface
MoM	Mean of Maxima
MPC	Model Predictive Control
MRU	Motion Reference Unit
MPSV	Multi-Purpose Supply Vessel
NAVSTAR	NAVigation Satellite Timing And Ranging
OSV	Offshore Supply Vessel
OpEx	Operational Expenditure
PSV	Platform Supply Vessel
PRS	Position Reference System
PMS/EMS	Power/Energy Management System
PV	Process Value
ROT	Rate of Turn
RTC	Real Time Computer
ROV	Remote Operated vessel
SP	Set Point
TAL	Thrust Allocation Unit
VFD	Variable Frequency Drives

A ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οδεύοντας προς μία νέα εποχή για την ναυτιλία και τις μεταφορές, η πλήρης αυτοματοποίηση των πλοίων και η ψηφιοποίηση των λιμένων σε όλη την υφήλιο αποτελεί πλέον πραγματικότητα. Νέες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν και νέες εγκαταστάσεις δημιουργήθηκαν προκειμένου να φέρουν εις πέρας τις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις που έχει προκαλέσει το σύγχρονο διεθνές εμπόριο.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις, και κυρίως η ανάγκη για εξόρυξη υδρογονανθράκων σε μεγαλύτερα βάθη, είχαν ως αποτέλεσμα την εξέλιξη της τεχνολογίας της υπεράκτιας βιομηχανίας πετρελαίου. Σημαντικός τομέας αυτής της βιομηχανίας είναι οι υποθαλάσσιες μελέτες και οι γεωτρήσεις. Οι εργασίες σε θαβύτερα νερά και οι άσχημες καιρικές συνθήκες αποτέλεσαν τους κύριους λόγους για την ανάπτυξη συστημάτων δυναμικής τοποθέτησης (DP) σε πλοία και σκάφη που εμπλέκονταν στις υπεράκτιες εργασίες.

Στο πρώτο μέρος του θεωρητικού υποβάθρου της παρούσας εργασίας, επιχειρείται η συνοπτική περιγραφή των βασικών μερών και αρχών λειτουργίας της τεχνολογίας δυναμικής τοποθέτησης (DP), σύμφωνα με τις τρέχουσες εξελίξεις και δεδομένα. Βασικό εργαλείο για την ακριβή και λεπτομερή περιγραφή των επιμέρους μερών του συστήματος DP αποτέλεσε το βιβλίο *“Dynamic Positioning for Engineers - 1st Edition, 2020 by Surender Kumar”*. Άλλες πηγές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τεχνικά φυλλάδια από κατασκευαστές DP συστημάτων αλλά και οι γενικές οδηγίες του διεθνούς οργανισμού ναυτιλίας *“Maritime Safety Committee - Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems”* σχετικά με το DP. Επίσης, αναλύεται εκτενώς ο βασικός αλγόριθμος ελέγχου των DP συστημάτων, καθώς αυτό είναι το σημείο το οποίο η παρούσα εργασία επιχειρεί να απλουστεύσει με την χρήση της ασαφούς λογικής .

Στο δεύτερο μέρος του θεωρητικού υποβάθρου της εργασίας, θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει μια μικρή εισαγωγή στην ασαφή λογική και τα ασαφή σύνολα γενικότερα. Κύρια πηγή για την παρουσίαση του θέματος είναι το άρθρο *“Introduction to fuzzy logic, Franck Dernoncourt - January 2013”*. Γίνεται επίσης περιγραφή του προσαρμοστικού νευρο-ασαφούς συστήματος συμπερασμού ANFIS.

Στο τρίτο μέρος της εργασίας γίνεται περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας ενός PID ελεγκτή και παρουσιάζεται η μεθοδολογία χρήσης του προσαρμοστικού νευρο-ασαφούς συστήματος συμπερασμού ANFIS για τον αυτόματο υπολογισμό και αναπροσαρμογή των κερδών του PID ελεγκτή του συστήματος DP.

Στο τέταρτο και τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από το τρίτο μέρος καθώς και η συζήτηση σχετικά με το μέλλον της μηχανικής μάθησης στα DP συστήματα.

B ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ

1.1 Το χρονικό της αναπτυξης του DP

Στις αρχές του 1960, η δυναμική τοποθέτηση (dynamic positioning - DP), σαν μια νέα τεχνολογία στον χώρο της πλοήγησης (Εικόνα 1), έκανε την πρώτη της εμφάνιση σε εφαρμογές όπως η έρευνα για εξώρυξη υδρογονανθράκων, η υποστήριξη καταδυτικών εργασιών και η πόντιση καλωδίων. Σήμερα, έχει περάσει ήδη περισσότερος από μισός αιώνας που χρησιμοποιείται η τεχνολογία αυτή. Αρχικά, τα περισσότερα πλοία που χρησιμοποίησαν την τεχνολογία DP βασίστηκαν σε μετατροπές προηγούμενων σκαφών. Οι μετατροπές αυτές, ήταν η εγκατάσταση προωθητών (thrusters) και υπολογιστών ικανών να επεξεργάζονται τα σήματα από τους διάφορους αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένης και της θέσης του πλοίου. Ο πρώτος και πιο διαδεδομένος αισθητήρας προσδιορισμού θέσης ήταν το σύστημα τεντωμένου καλωδίου “taut wire”.

Σε πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά σκάφη με δύο πηδάλια και δύο κύριους προωθητές, στα οποία προστέθηκε ένας επιπλέον προωθητής εφαρμοσμένος εγκάρσια κάτω από την πλώρη. Αυτός ο προωθητής είναι γνωστός ως bow thruster και βοηθούσε το πλοίο να διορθώνει την κατεύθυνσή του χωρίς την χρήση των κύριων προωθητών. Το επόμενο βήμα ήταν η προσθήκη ενός επιπλέον προωθητή τοποθετημένου εγκάρσια και κοντά στην πρύμνη του πλοίου, που ονομάζεται stern thruster. Με την χρήση και των δύο αυτών προωθητών έγιναν πλέον ευκολότεροι οι ελιγμοί του πλοίου. Στην συνέχεια προστέθηκαν νέες συσκευές στην γέφυρα του πλοίου, μέσω των οποίων όλοι οι προωθητές μπορούσαν να ελέγχονται σε ξεχωριστό επίπεδο λειτουργίας. Αυτή η προσθήκη έκανε πιο εύκολο τον έλεγχο της θέσης του πλοίου, όμως ακόμα απαιτούνταν η υψηλή εξειδίκευση και εμπειρία του χειριστή του συστήματος. Αυτό είχε ως συνέπεια την ενσωμάτωση πιο εξελιγμένων συστημάτων αυτοματισμού στην γέφυρα του πλοίου, σε μια εποχή που ο αυτοματισμός των πλοίων ήταν ακόμη σχετικά άγνωστος. (S.Kumar, 2020)



Εικόνα 1: Η κεντρική κονσόλα του DP συστήματος K-Pos της Kongsberg (www.kongsberg.com)

Η επόμενη προσθήκη ήρθε με την εισαγωγή του κατευθυντήριου μοχλού (joystick), ο οποίος απλούστευσε σημαντικά την επίτευξη των ελιγμών του πλοίου και τώρα πλέον, όλες οι κινήσεις μπορούσαν να γίνουν από το ίδιο επίπεδο ελέγχου για όλους τους προωθητές και όχι ξεχωριστά όπως πριν. Αυτή η προσθήκη αποτέλεσε μια τεράστια εξέλιξη στα συστήματα DP και βοήθησε στο να γίνονται οι ελιγμοί ευκολότερα και με μεγαλύτερη ασφάλεια. Εξαιτίας δε και της αλματώδους ανάπτυξης των υπολογιστικών συστημάτων, η κεντρική μονάδα επεξεργασίας και ελέγχου αντικαταστάθηκε με πολύ πιο ευέλικτα και ισχυρα υπολογιστικά συστήματα, με δυνατότητα λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (real time computers - RTCs). Αυτοί οι υπολογιστές δέχονται ως εισόδους δεδομένα από περιβαλλοντικούς ή μετεωρολογικούς αισθητήρες και από το σύστημα εντοπισμού θέσης. (S.Kumar, 2020)

Δημιουργήθηκε έτσι ένα μονέλο αναφοράς του πλοίου ή αλλιώς μαθηματικό μοντέλο του πλοίου, το οποίο τροφοδοτείται με τα δεδομένα από το RTC. Έτσι, το RTC απέκτησε πολύ πιο αξιόπιστα δεδομένα σε συνδυασμό με την χρήση του μαθηματικού μοντέλου. Τα δεδομένα αυτά, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, αποτέσαν την κύρια έξοδο του συστήματος που είναι γνωστή ως λογική καθορισμού των προωθητών (thruster allocation logic - TAL). Η έξοδος αυτή, είναι ικανή να ελέγξει όλους τους προωθητές του πλοίου ταυτόχρονα. Κάθε προωθητής φέρει encoders, τα οποία μπορούμε να φανταστούμε ως ηλεκτρονικά μοιρογνωμόνια που μας δίνουν πίσω στο σύστημά μας την πραγματική γωνία στρέψης στην οποία βρίσκεται ο προωθητής. Μετά την σύγκριση της πραγματικής με την επιθυμητή γωνία στρέψης, ο ελεγκτής του προωθητή κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις.

Οι εργασίες σε βαθύτερα νερά και οι άσχημες καιρικές συνθήκες εποτέλεσαν τους κύριους λόγους για την ανάπτυξη συστημάτων DP σε πλοία και σκάφη που εμπλέκονταν στις υπεράκτιες εργασίες. Δυστυχώς, κάποια περιστατικά δυσλειτουργίας έγιναν αντιληπτά πάνω στα πλοία υποστήριξης καταδύσεων (DSVs – Diving Support Vessels) (Εικόνα 2) τα οποία χρησιμοποιούσαν συστήματα DP με συνέπεια να υπάρξει η ανάγκη για την υιοθέτηση ακόμα περισσότερων μέτρων προστασίας και ασφάλειας. Την δεκαετία του 1980, οι υπεράκτιες εργασίες μετεφερόταν σε όλο και βαθύτερα νερά και αυτό δημιούργησε την ανάγκη για εφεδρική στα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος DP. Επίσης, δημιουργήθηκε η ανάγκη εκπαίδευσης των χειριστών και του υπόλοιπου τεχνικού εργατικού δυναμικού που σχετιζόταν με το σύστημα DP.

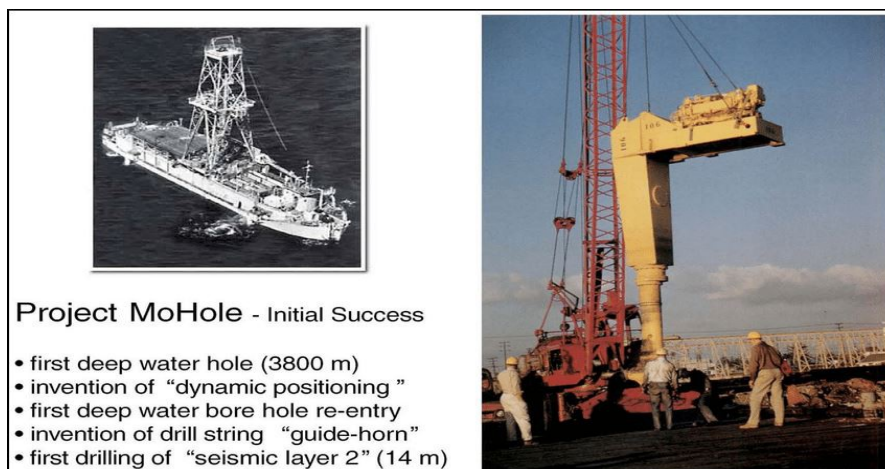


Εικόνα 2: Το πλοίο υποστήριξης καταδύσεων DSV Seven Atlantic (www.royalihc.com)

Οι νέες προδιαγραφές ασφαλείας και κατ' επέκταση οι εξελίξεις που ακολούθησαν, ήταν περισσότερο απαραίτητες στα πλοία υποστήριξης καταδύσεων (DSVs) και στα πλοία διεξαγωγής γεωλογικών μελετών και γεωτρήσεων. Αφού πρώτα αυτές οι προσθήκες εγκαταστάθηκαν επιτυχώς σε αυτού του είδους τα πλοία, στην συνέχεια εφαρμόστηκαν και στα υπόλοιπα.

Η τεχνολογία δυναμικής τοποθέτησης είναι σήμερα μία από τις πιο ταχύτατα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες στον χώρο της ναυτιλίας αλλά και γενικότερα. Παρά το γεγονός ότι αρχικά η τεχνολογία αυτή γεννήθηκε ως αποτέλεσμα της ανάγκης για εξώρυξη σε βαθιά νερά, σήμερα χρησιμοποιείται για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών και η αυξανόμενη ζήτηση για τέτοιου είδους συστήματα προέρχεται και από άλλες ναυτιλιακές εργασίες. Με το πέρασμα του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας, ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, οι εφαρμογές του DP με σκοπό την διατήρηση της θέσης ενός πλοίου για υπεράκτιες εργασίες ήταν ευρέως αποδεκτές. Υπολογίζεται ότι υπήρχαν περίπου 65 πλοία με τεχνολογία DP το 1980, ενώ ο αριθμός αυτός σήμερα ανέρχεται σε 3600 πλοία. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι οι λειτουργίες, η χρήση και η ποικιλία των συστημάτων DP τα τελευταία 40 χρόνια έχουν δεχτεί τεράστιες αλλαγές. Οι εφαρμογές πλέον δεν αφορούν μόνο πλοία εξώρυξης αλλά ακόμα και κρουαζιερόπλοια και μικρά σκάφη αναψυχής.

Στα πλαίσια του Project MoHole το 1961, το τρυπάνι Cuss 1 (Εικόνα 3) ήταν εξοπλισμένο με τέσσερις προωθητές με δυνατότητα περιστροφής. Το έργο MoHole προσπαθούσε να τρυπήσει στο βάθος MoHo (ασυνέχεια Μοχορόβιτσιτς) που είναι το όριο μεταξύ γεωφλοιού και γεωμανδύα. Το πλοίο αυτό, με τη βοήθεια της τεχνολογίας DP ήταν σε θέση να διατηρήσει τη θέση του πάνω από ένα πηγάδι πετρελαίου στην Λα Γιόλα της Καλιφόρνια, που βρισκόταν σε βάθος 948 μέτρων. Αργότερα, έξω από τις ακτές της Γουαδελούπης του Μεξικό, έγιναν πέντε γεωτρήσεις, η βαθύτερη στα 183 μέτρα κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας (και βάθος πυθμένα στα 3.500 μέτρα) διατηρώντας παράλληλα την θέση του μέσα σε ακτίνα 180 μέτρων. Ο προσδιορισμός της θέσης του πλοίου καθορίστηκε από ραντάρ που κατευθυνόταν από σημαντήρες, αλλά και σόναρ που βασιζόταν σε υποθαλάσσια σήματα. Ενώ το Cuss 1 διατηρήθηκε στη θέση του χειροκίνητα, αργότερα τον ίδιο χρόνο η Shell ξεκίνησε το πλοίο γεώτρησης Eureka που είχε ένα αναλογικό σύστημα ελέγχου συνδεδεμένο με ένα τεντωμένο σύρμα (taut wire), καθιστώντας το, το πρώτο πλοίο με σύστημα DP.



Εικόνα 3: Η πλατφόρμα CUSS I πάνω αριστερά, και ένας από τους τέσσερις προωθητές της (Benoit Ildefose, www.researchgate.com)

Το σύστημα DP δεν χρησιμοποιείται μόνο στην βιομηχανία πετρελαίου αλλά και σε διάφορους άλλους τύπους πλοίων, και δεν περιορίζεται πλέον μόνο στην διατήρηση σταθερής θέσης. Κάποιες από τις δυνατότητές του είναι η ακρίβεια στην ιστιοπλοΐα, η πόντιση καλωδίων (cablelay) και η πόντιση σωληνώσεων (rirelay), η έρευνα και χαρτογράφηση βυθού (hydrography) και άλλες εργασίες.

Ο Howard Shatto θεωρείται ο πατέρας της τεχνολογίας DP και οι προσπάθειές του συνετέλεσαν στην δημιουργία του πρώτου πλοίου με δυνατότητα DP. Το πλοίο Eureka (Εικόνα 4), που φέρει το όνομά του από την γνωστή αναφήνηση του Αρχιμήδη, τροποποιήθηκε έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η θέση του με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα σε εργασίες εξώρυξης στα ανοιχτά του κόλπου του Μεξικό από την εταιρία Shell. Έγιναν προσπάθειες που διασφάλιζαν τον ανεξάρτητο έλεγχο των κινήσεων του πλοίου σε τρεις βαθμούς ελευθερίας, την διαμήκη μετατόπιση (surge), την εγκάρσια μετατόπιση (sway), και την κάθετη περιστροφή (yaw). Τα διανυσματικά μεγέθη των δυνάμεων αυτών μετρήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου, έτσι ώστε να παραχθεί η ανάλογη πρόωση απο τους προωθητές μέσω του αλγορίθμου TAL.

Ο διεθνής οργανισμός ανάδοχων ναυτιλιακών έργων (international marine contractors association - IMCA) δίνει τον ορισμό ενός πλοίου με δυνατότητα δυναμικής τοποθέτησης ως μιας θαλάσσιας μονάδας η πλοίου, ικανού να διατηρεί την θέση του σε ένα προκαθορισμένο σημείο, ή ικανού να μετακινείται πάνω σε μία προδιαγεγραμμένη πορεία χρησιμοποιώντας ενεργό ώθηση. Η ενεργός ώθηση είναι εκείνη η ώθηση που παράγεται από τους προωθητές που είναι διαθέσιμοι στο σκάφος.



Εικόνα 4: Το Eureka (1961) ήταν το πρώτο πλοίο στον κόσμο με τεχνολογία αυτόματης τοποθέτησης. (Morten Breivik, www.researchgate.com)

1.2 Τύποι πλοίων που χρησιμοποιούν την τεχνολογία DP

Καθώς οι εφαρμογές του συστήματος DP αυξάνονται στις θαλάσσιες επιχειρήσεις, διάφοροι τύποι πλοίων εξοπλίζονται με αυτό με στόχο την ασφαλέστερη, ευκολότερη και πιο αποδοτική ικανότητα ελιγμών. Παρόλο που τα περισσότερα πλοία με σύστημα DP προορίζονται για υπεράκτιες εργασίες, το αξιοποιούν επίσης και πολλά σύγχρονα φορτηγά και επιβατηγά πλοία. Οι κυριότεροι τύποι τέτοιων πλοίων περιγράφονται στην συνέχεια του κεφαλαίου. (B. Singh, 2021)

Πλοία ανεφοδιασμού πλατφόρμας/υπεράκτιων εγκαταστάσεων (platform/offshore supply vessel – PSVs/OSVs). Τα πλοία αυτά είναι ειδικά σχεδιασμένα να ανεφοδιάζουν υπεράκτιες εγκαταστάσεις όπως πλατφόρμες και θεωρούνται ο συνηθέστερος τύπος πλοίου που χρησιμοποιεί το σύστημα DP. Το μήκος τους ποικίλει από 50 έως 100 μέτρα και είναι ικανά να φέρνουν εις πέρας πληθώρα εργασιών. Πρωταρχικός τους στόχος είναι να προμηθεύουν πλατφόρμες με τα απαραίτητα εφόδια και άλλο υλικό από την βάση τους στην στεριά.

Πλοία υποστήριξης καταδύσεων και τηλεχειριζόμενων βαθυσκαφών (diving/ROV support vessels DSVs/RSVs). Πρόκειται για ειδικά σχεδιασμένα πλοία με σκοπό την υποστήριξη εμπορικών υποθαλάσσιων καταδυτικών εργασιών όπως για παράδειγμα η συγκόλληση μετάλλων. Οι δύτες, στέλνονται στον βυθό για να επιθεωρήσουν ή να συμμετάσχουν σε εργασίες όπως εγκαταστάσεις και μετατροπές υποθαλάσσιου εξοπλισμού, να επιβλέψουν εργασίες, ή να ανασύρουν απολεσθέντα ή εγκαταλελειμμένο εξοπλισμό. Τα τηλεχειριζόμενα βαθυσκάφη (remote operated vessels - ROVs) τείνουν να αντικαταστήσουν τους δύτες στις περισσότερες υποθαλάσσιες εργασίες, όμως ακόμα εξακολουθούν να υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα έργα που απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση.

Πλοία γεωτρήσεων (Drill Ships). Για γεωτρήσεις τόσο σε ρηχά όσο και σε βαθιά νερά, η ικανότητα του πλοίου να διατηρεί την θέση του με ακρίβεια μικρότερη του ενός μέτρου από την πηγή εξώρυξης είναι ζωτικής σημασίας. Το ανυψωτικό μηχάνημα του πλοίου θα πρέπει πάντοτε να βρίσκεται ακριβώς κατακόρυφα πάνω από το πηγάδι άντλησης και για τον λόγο αυτό τα πλοία αυτού του τύπου είναι πάντοτε εξοπλισμένα με σύστημα DP. Καθ' όλην την διάρκεια της γεώτρησης, η γωνία που δημιουργεί η άκρη του ανυψωτικού μηχανήματος με το κέντρο του πηγαδιού παρακολουθείται, έτσι ώστε να γίνονται οι ανάλογες διορθώσεις και να βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια έτσι ώστε να παραμείνει συνδεδεμένο με τον άξονα. Τα πλοία αυτά μπορούν να επιχειρούν σε βάθη 3000 μέτρων ή περισσότερο, με την βοήθεια διαφορικού συστήματος εντοπισμού θέσης (differential global positioning system – DGPS) και υδροακουστικών στόχων (long baseline – LBL) ποντισμένων στον πυθμένα.

Πλοία πόντισης και επισκευής καλωδίων και αγωγών (cable/pipe lay and repair vessels). Τα νέα καλώδια τεχνολογίας οπτικών ινών είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητα σε θλάσεις και πιέσεις σε σχέση με τους παλαιότερους παραδοσιακούς χάλκινους αγωγούς. Για να αποφευχθεί η θλάση και η φυσική τους παραμόρφωση, χρησιμοποιούνται πλοία με συστήματα DP. Τα περισσότερα υποθαλάσσια καλώδια παγκοσμίως, έχουν ποντιστεί από πλοία με σύστημα DP. Το ίδιο συμβαίνει και με τα πλοία πόντισης αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτά συνήθως είναι ειδικές μαούνες, πάνω στις οποίες συναρμολογείται ο αγωγός από συγκολλητές.

Πλοία βυθοκόρησης και βραχοθραύστες (dredging vessels, rock dumping vessels). Τα περισσότερα σύγχρονα πλοία βυθοκόρησης (Εικόνα 5) χρησιμοποιούν το σύστημα DP για να φέρουν εις πέρας υποθαλάσσιες χωματοουργικές εργασίες οι οποίες απαιτούν το πλοίο να βρίσκεται πάνω από συγκεκριμένους αύλακες. Όπως ακριβώς ο χειριστής του τρακτέρ στην γη οργώνει το επόμενο αυλάκι δίπλα από το προηγούμενο χωρίς να αφήσει κενό, το ίδιο κάνει και ένα πλοίο βυθοκόρησης. Το σύστημα DP εξασφαλίζει ότι το πλοίο βρίσκεται πάντα στην κατάλληλη θέση για να γίνει η εργασία αυτή με ακρίβεια. Τα πλοία που φέρουν βραχοθραύστες χρησιμοποιούνται για την αποκόλληση βράχων και υφάλων και εναπόθεσης του αφαιρεθέντος υλικού στο πλησιέστερο ασφαλές σημείο με σκοπό να προστατεύσουν τους αγωγούς. Για να γίνεται ισόποσα η επίστρωση του εξαχθέντος υλικού, τα πλοία αυτού του τύπου είναι εξοπλισμένα με σύστημα DP, το οποίο τους επιτρέπει να διατηρούν σταθερή ταχύτητα πάνω από τον διάδρομο επίστρωσης.

Ανυψωτικά πλοία και μαούνες (crane vessels/barge). Πρόκειται για βοηθητικά πλοία που χρησιμεύουν στην κατασκευή και την απεγκατάσταση θαλάσσιων κατασκευών και άλλου εξοπλισμού κυρίως από την πετρελαϊκή βιομηχανία. Τα πλοία αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται και με σκοπό την ανάσυρση ναυαγίων και την διάσωση υποβρυχίων και αεροπλάνων.

Επιβατηγά πλοία (passenger vessels). Τα σύγχρονα επιβατηγά πλοία διαθέτουν μικρό βύθισμα, έτσι ώστε να έχουν ασφαλή πρόσβαση σε ένα μεγάλο εύρος ταξιδιωτικών προορισμών, και είναι σχεδιασμένα να δέχονται περισσότερους επιβάτες σε περισσότερα επίπεδα του καταστρώματος σε σχέση με το παρελθόν. Το μικρό τους βύθισμα και το μεγάλο τους ύψος τα κάνουν πιο δύσκολα στους ελιγμούς μέσα σε μικρούς και στενούς λιμένες. Για τον λόγο αυτό είναι εξοπλισμένα με συστήματα DP τα οποία τους επιτρέπουν τον ελιγμό, την πρόσδεση και την αγκυροβόληση με ασφαλέστερο τρόπο.

Ημι-βυθιζόμενα πλοία ανύψωσης μεγάλων βαρών (specialist/semi-submersible heavy-lift vessels). Τα πλοία αυτού του τύπου είναι σε θέση να μεταφέρουν βαρύ εξοπλισμό σε απομακρυσμένα σημεία και αντιμετωπίζουν δυσκολίες κατά την διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης. Ανάμεσά τους υπάρχουν και ημι-βυθιζόμενα πλοία τα οποία μεταβάλλουν το βύθισμά τους την ώρα της φορτοεκφόρτωσης, έτσι ώστε το βάρος να πλεύσει ελεγχόμενα πάνω από τον χώρο φόρτωσης του πλοίου και στην συνέχεια το πλοίο να αναδυθεί αφαιρώντας το νερό. Για τον ασφαλή χειρισμό του πλοίου σε αυτές τις συνθήκες ένα σύστημα DP είναι απαραίτητο. Συνήθως, το φορτίο ενός τέτοιου πλοίου είναι δομικά υλικά για πλατφόρμες ή ολόκληρες πλατφόρμες ή άλλα μικρότερα πλοία.



Εικόνα 5: Το πλοίο βυθοκόρησης Mont Mandara. (Courtesy: Royal IHC)

Δεξαμενόπλοιο υπηρεσίας (shuttle tanker). Το δεξαμενόπλοιο υπηρεσίας, χρησιμεύει για την μεταφορά πετρελαιοειδών από μία υπεράκτια κατασκευή σε κάποιο άλλο σημείο. Πρόκειται για πολύ εξελιγμένα πλοία και είναι εξοπλισμένα με ειδικά συστήματα φορτοεκφόρτωσης πετρελαιοειδών. Για την διατήρηση της θέσης του πλοίου κατά την διάρκεια της πρόσδεσής του με την υπεράκτια κατασκευή, χρησιμοποιούνται συστήματα DP, τα οποία αποτρέπουν το πλοίο από το να συγκρουστεί με την κατασκευή.

Πλωτή κατασκευή παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (floating production, storage and offloading unit – FPSO). Ο συσκευασμένος τύπος υπεράκτιας κατασκευής χρησιμοποιείται από την βιομηχανία πετρελαιοειδών για παραγωγή και αποθήκευση υδρογονανθράκων. Τα FPSO συλλέγουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο που έχει εξαχθεί από γειτονικές πλατφόρμες, το επεξεργάζονται, και στην συνέχεια το αποθηκεύουν έως ότου έρθει η ώρα της εκφόρτωσης σε κάποιο δεξαμενόπλοιο υπηρεσίας ή σε κάποιον σταθμό στην ακτή μέσω αγωγού. Αυτού του τύπου τα πλοία είναι συνήθως μετατροπές παλαιότερων δεξαμενόπλοιων ή είναι ειδικές κατασκευές για τον σκοπό αυτό.

Πολεμικά πλοία (naval vessels). Το πολεμικό ναυτικό και η ακτοφυλακή κάποιων τεχνολογικά ανεπτυγμένων χωρών, κάνει εκτενή χρήση των συστημάτων DP. Σκάφη που ασχολούνται με την ναρκοθέτηση και την ναρκαλίευση, τα αντίμετρα ενάντια στις νάρκες, την αμφίβια προσεδάφιση, την ανάσυρση υποβρυχίων αλλά και τον έλεγχο μολύνσεων αποτελούν παραδείγματα κλασικών εφαρμογών του συστήματος DP. Στην Εικόνα 6, απεικονίζονται τα πλοία γενικής υποστήριξης ΠΓΥ ΗΡΑΚΛΗΣ και ΠΓΥ ΑΤΛΑΣ Ι του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού.



Εικόνα 6: Τα πλοία γενικής υποστήριξης ΠΓΥ ΗΡΑΚΛΗΣ και ΠΓΥ ΑΤΛΑΣ Ι του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού (www.defencereview.gr)

1.3 Πλεονεκτήματα του DP

Πλεονεκτήματα της χρήσης δυναμικής τοποθέτησης (DP) - Η δυναμική τοποθέτηση δεν είναι πάντα η καλύτερη επιλογή από θέμα οικονομίας. Οι γραμμές πρόσδεσης είναι συνήθως μια καλύτερη επιλογή για ρηχά νερά ή για λειτουργία που δεν απαιτεί συχνή μετεγκατάσταση του σκάφους (π.χ. διάτρηση σε ρηχά νερά, καταδύσεις σε ρηχά νερά). Από την άλλη πλευρά, το DP είναι η καλύτερη επιλογή για εργασίες βαθένων υδάτων, για βυθούς με συμφόρηση και σε συνθήκες όπου το σκάφος χρειάζεται συχνά μετεγκατάσταση. (Nedcon, 2014) Μερικά από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα του DP είναι:

- Γρήγορη και εύκολη τοποθέτηση και ευελιξία του σκάφους. Δεν υπάρχει ανάγκη για γραμμές πρόσδεσης, ρυμουλκά σκάφη και χρονοβόρες εργασίες χειρισμού αγκυροβόλησης.
- Οι υπεράκτιες εργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν σε εξαιρετικά βαθιά νερά, όπου είναι δύσκολο να εγκατασταθούν γραμμές πρόσδεσης.
- Εύκολο να γίνει αλλαγή θέσης ή διεύθυνσης για την αποφυγή επιπτώσεων κακοκαιρίας.
- Γρήγορη αποσύνδεση και απομάκρυνση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.
- Πολύ ασφαλές για εργασίες σε κορεσμένους βυθούς με πολλούς αγωγούς, γραμμές πρόσδεσης από άλλα σκάφη ή υποθαλάσσιες κατασκευές όπως πολλαπλές κεφαλές φρεατίων, ανυψωτικά κλπ.

Σαφώς, το DP χαρακτηρίζεται και από κάποια μειονεκτήματα, όπως οι υψηλές κεφαλαιουχικές δαπάνες για το σχεδιασμό και την εγκατάστασή του (capital expenditure – CapEx), η υψηλή κατανάλωση καυσίμου και το αυξημένο κόστος συντήρησης (operational expenditure - OpEx). Έχει επίσης περιορισμούς στα πολύ ρηχά νερά και σε συνθήκες που πρέπει να γίνονται καταδύσεις κοντά στους προωθητές. Μπορούν, τέλος, να προκληθούν σοβαρές συνέπειες σε περίπτωση βλάβης του εξοπλισμού κατά την τοποθέτηση αγωγών και σωληνώσεων ή κατά τη διάρκεια λειτουργίας κοντά σε σταθερές πλατφόρμες.

1.4 Κλάσεις, αρχιτεκτονική και βαθμός εφεδρικότητας DP

Βασιζόμενοι στον κανονισμό 645 του διεθνούς οργανισμού ναυτιλίας (international maritime organisation – IMO 645), οι νηογνώμονες κάθε χώρας, θέτουν τα πρότυπα για τις κατηγορίες συστημάτων DP. Οι εφαρμογές των πλοίων με δυνατότητες DP ολοένα και αυξάνονται και νέες προοπτικές ξεπροβάλλουν στον ορίζοντα. Ιστορικά, οι εφαρμογές του συστήματος DP ξεκίνησαν από τον χώρο της εξόρυξης γαιανθράκων, σε εργασίες όπως η εξερεύνηση κοιτασμάτων και οι γεωτρήσεις. Μια άλλη εφαρμογή είναι σε πλοία εφοδιασμού πλατφορμών εξόρυξης για την βιομηχανία πετρελαίου. Τα πλοία αυτά ανήκουν σε μια μεγάλη κατηγορία και ονομάζονται πλοία ανεφοδιασμού γενικής χρήσεως (multi-purpose supply vessels – MPSVs). Άλλη χρήση του συστήματος DP είναι σε πλοία που φέρουν στο κατάστρωμά τους τηλεχειριζόμενα βαθυσκάφη (ROVs), και επιβάλλεται να ακολουθούν το καταδυτικό όχημα σε σταθερή απόσταση από την επιφάνεια της θάλασσας. Όλα αυτά τα πλοία με δυνατότητα DP, έχουν χωριστεί σε κλάσεις ανάλογα με τον βαθμό αστοχίας και εφεδρικότητας των υποσυστημάτων τους. Η κλάση ενός συστήματος DP καθορίζεται με βάση τις παρακάτω οδηγίες:

Ως *πρώτης κλάσης (DP Class 1)*, ορίζεται ένα πλοίο όταν μία και μόνη αστοχία στο σύστημα DP είναι ικανή να προκαλέσει απώλεια του ελέγχου της θέσης ή της διεύθυνσης του πλοίου ή και των δύο.

Ως *δεύτερης κλάσης (DP Class 2)*, ορίζεται ένα πλοίο όταν μία και μόνη αστοχία στο σύστημα DP δεν είναι ικανή να προκαλέσει απώλεια του ελέγχου της θέσης ή της διεύθυνσης ή και των δύο. Αυτό επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση της ιδέας της εφεδρικότητας. Κάποια *στατικά εξαρτήματα* είναι δυνατόν να αστοχήσουν, παρόλα αυτά όμως δεν θα σταθούν ικανά να προκαλέσουν απώλεια της θέσης και της διεύθυνσης του πλοίου, όπως για παράδειγμα τα συστήματα εξαερισμού. Όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα που θεωρούνται *ενεργά* θα πρέπει να βρίσκονται σε συνεχή ετοιμότητα και μία και μόνη αστοχία σε αυτά είναι ανίκανη να προκαλέσει απώλεια ελέγχου.

Σε ένα πλοίο *τρίτης κλάσης (DP Class 3)*, δεν προβλέπεται να υπάρξει καμία απώλεια του ελέγχου της θέσης και της διεύθυνσης στην περίπτωση του χειρότερου σεναρίου μοναδικής αστοχίας. Το χειρότερο σενάριο μοναδικής αστοχίας περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα που αναφέρθηκαν για την κλάση DP Class 2 και επιπρόσθετα, όλα τα *στατικά εξαρτήματα* στην περίπτωση αυτή έχουν σχεδιαστεί με ανοχή αστοχίας. Για ένα σύστημα κλάσης DP Class 3, ένα σετ εφεδρικού εξοπλισμού έχει προβλεφθεί να βρίσκεται σε ξεχωριστό διαμέρισμα του πλοίου, ασφαλές από φωτιά ή πλημμύρα (A/60). Με αυτό τον όρο εννοείται ένα διαμέρισμα του πλοίου ικανό να αντιστέκεται σε φωτιά και πλημμύρα για εξήντα λεπτά. Για τα DP συστήματα κλάσης DP Class 2 και DP Class 3, ως αστοχία, λογίζεται και ένας ακούσιος λάθος χειρισμός του χειριστή.

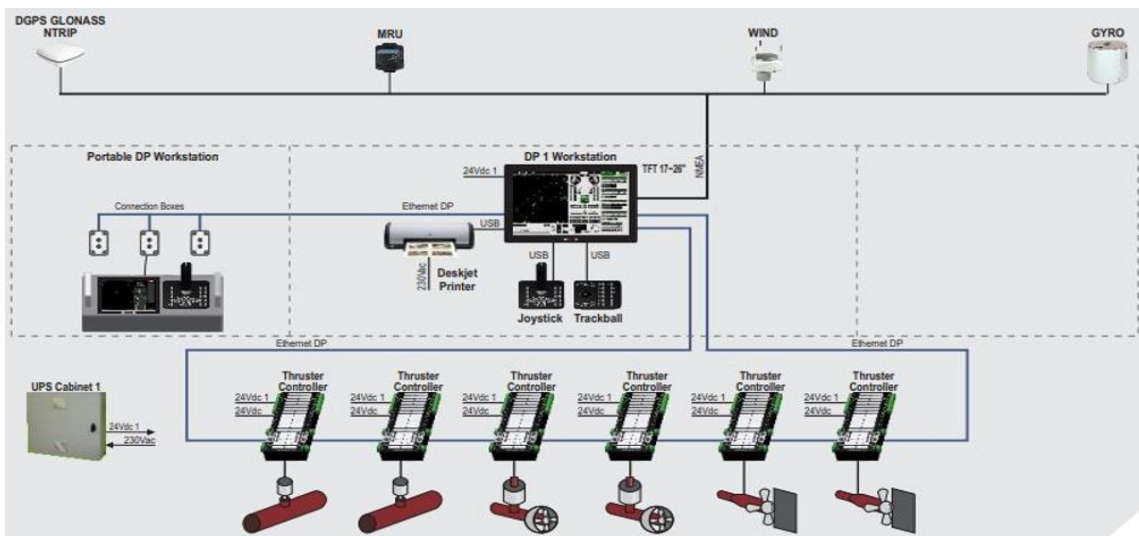
IMO Equipment Class	LR	DNV	ABS	GL	BV	KR
No equivalent	DP (CM)	No equivalent	DPS-0	No equivalent	Dynapos SAM	
No equivalent	No equivalent	DYNPOS AUTS	No equivalent	No equivalent	No equivalent	
Class 1	DP (AM)	DYNPOS AUT	DPS-1	DP 1	Dynapos AM/AT	DPS(1)
Class 2	DP (AA)	DYNPOS ATR	DPS-2	DP 2	Dynapos AM/AT R	DPS(2)
Class 3	DP (AAA)	DYNPOS AUTRO	DPS-3	DP 3	Dynapos AM/AT RS	DPS(3)

Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΚΛΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ DP** που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας απεικονίζονται οι αρχιτεκτονικές των διαφορετικών κλάσεων DP, όπως αποτυπώνονται σε μορφή μπλοκ διαγράμματος από τον κατασκευαστή DP συστημάτων Praxis Automation B.V.

1.5 Τα υποσυστήματα του DP

Ένα σύστημα δυναμικής τοποθέτησης αποτελείται στην πιο απλή του μορφή (DP Class 0) από τα παρακάτω υποσυστήματα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. (Εικόνα 7)

- Τροφοδοσία (power)
- Προωθητές (thrusters)
- Συστήματα Εντοπισμού Θέσης (position reference system – PRS)
- Περιβαλλοντικοί Αισθητήρες (gyro compass, wind sensor, motion reference unit – MRU)
- Υπολογιστής Πραγματικού Χρόνου/DP (real time computer – RTC/ DP controller - DPC)
- Διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (man-machine/human-machine interface – MMI/HMI)
- Χειριστής (operator)



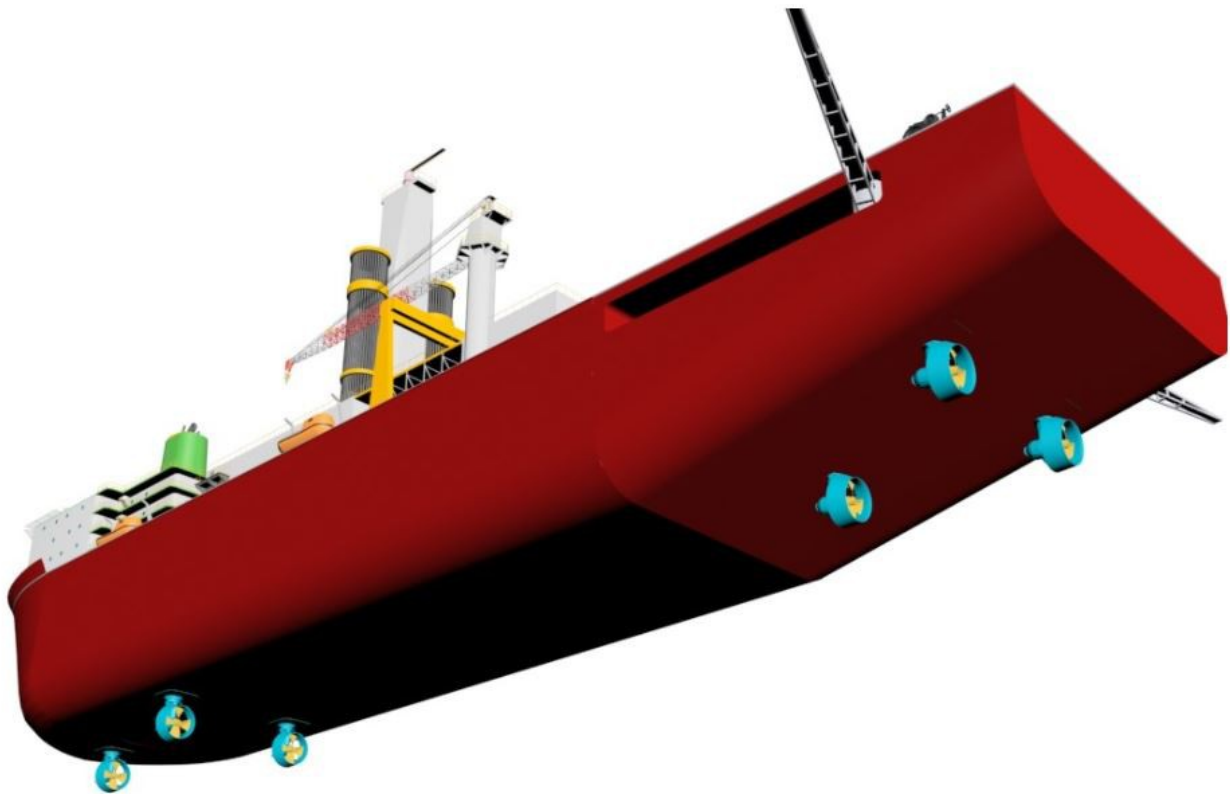
Εικόνα 7: Μπλοκ διάγραμμα με τα υποσυστήματα ενός συστήματος DP. (www.praxis-automation.nl)

1.5.1 Τροφοδοσία

Με τον όρο τροφοδοσία αναφερόμαστε αποκλειστικά σε ηλεκτρική ενέργεια μιας και είναι ο κύριος και ίσως ο μοναδικός τρόπος τροφοδοσίας των συστημάτων DP που υπάρχουν αυτή την στιγμή στην αγορά. Η ονομαστική ισχύς των συστημάτων τροφοδοσίας για τα μεγαλύτερα πλοία γεωτρήσεων που υπάρχουν στον κόσμο την δεδομένη χρονική στιγμή αγγίζουν τα 50 MW. Αυτή η ζήτηση μπορεί να καλυφθεί χάρις στον κατάλληλο αριθμό γεννητριών οι οποίες είτε δουλεύουν παράλληλα και βρίσκονται συνδεδεμένες σε έναν κοινό αγωγό ή βρίσκονται συνδεδεμένες σε απομονωμένους αγωγούς με χρήση ειδικών διακοπών (bus tie breakers). Η κατάσταση και η διάταξη των διακοπών αυτών εξαρτάται από την κλάση του DP και τις ενεργειακές απαιτήσεις τις υφιστάμενης εργασίας. Τις περισσότερες φορές, οι γεννήτριες αυτές χρησιμοποιούν πετρέλαιο ως μέσο κίνησης και έτσι είναι γνωστές ως diesel electric propulsion systems. Για να γίνει κατανοητό το διάγραμμα κατανομής ισχύος ενός πλοίου με δυνατότητα DP, απαιτείται να γνωρίζουμε τον αριθμό των γεννητριών που διαθέτει το πλοίο και την τοπολογία της μεταξύ τους σύνδεσης στον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα. (S.Kumar, 2020)

1.5.2 Προωθητές

Οι προωθητές χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό ρεύμα από τις γεννήτριες με τέτοιο τρόπο ώστε να μετατοπίζουν το πλοίο προς το επιθυμητό σημείο. Η αλληλοεξάρτηση των προωθητών με το σύστημα τροφοδοσίας εξασφαλίζει την δυνατότητα του πλοίου να διατηρεί την θέση του και έτσι τα δύο αυτά υποσυστήματα μπορούν να λογίζονται ως ένα. Μια προωθητική μηχανή η οποία έχει την δυνατότητα να μετατοπίζει το πλοίο από το πλάι εγκαθίσταται μέσα σε μία ειδικά διαμορφωμένη κυλινδρική οπή. Η οπές αυτές έχουν τοποθετηθεί κοντά στην πλώρη η μία (bow thruster) και κοντά στην πρύμνη η άλλη (stern thruster). Ο προωθητής πλώρης έχει την δυνατότητα να διευκολύνει τους ελιγμούς και την προσδεση των συμβατικών πλοίων. Σε ένα πλοίο με τεχνολογία DP όμως, ο προωθητής πλώρης δύναται να χρησιμοποιηθεί για διάφορες λειτουργίες όπως ο έλεγχος της κατεύθυνσης αλλά και ο έλεγχος της εγκάρσιας μετατόπισης (sway), σε συνδυασμό με τον προωθητή πρύμνης και τους άλλους προωθητές. Σε μεγαλύτερα πλοία (Εικόνα 8) ενδέχεται να υπάρχουν δύο ή και τρεις προωθητές πλώρης. (S.Kumar, 2020)



Εικόνα 8: Γραφική απεικόνιση DP πλοίου γεωτρήσεων με πολλαπλούς προωθητές (www.thrustmaster.net)

1.5.3 Περιβαλλοντικοί αισθητήρες

Το σύνολο των αισθητήρων αποτελείται από το υποσύνολο των περιβαλλοντικών αισθητήρων και από το υποσύνολο των αισθητήρων εντοπισμού θέσης. Οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες περιλαμβάνουν αισθητήρες ανέμου και αισθητήρες γραμμικής, γωνιακής και μαγνητικής μετατόπισης οι οποίοι είναι γνωστοί ως μονάδες αναφοράς κίνησης (motion reference unit – MRU). Ένας ακόμα αισθητήρας του υποσυνόλου των περιβαλλοντικών αισθητήρων είναι το γυροσκόπιο ή γυροπυξίδα (gyro compass), το οποίο μετράει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που επενεργούν πάνω στο πλοίο και που προκαλούν την μετατόπιση της κατεύθυνσής του. Ένα ακόμη μέγεθος που μετράται από το γυροσκόπιο είναι ο ρυθμός μεταβολής της περιστροφής (Rate of Turn – ROT). Κάθε μεταβολή της γωνίας στρέψης του πλοίου μεταφέρεται ως πληροφορία από το γυροσκόπιο προς τον ελεγκτή που βρίσκεται στην υπολογιστική μονάδα του DP, έτσι ώστε να παραχθεί αντίθετη δύναμη από τους προωθητές για την επαναφορά του πλοίου στην επιθυμητή θέση. (S.Kumar, 2020)

1.5.4 Συστήματα Εντοπισμού Θέσης

Οι σύγχρονοι τύποι συστημάτων εντοπισμού θέσης που συναντάμε είναι οι ακόλουθοι:

- Δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης (GPS/DGPS/DARPS)
- Υδρο-ακουστικά συστήματα εντοπισμού θέσης (HPR/HiPar)
- Ελαφρύ τεντωμένο καλώδιο (LTW)
- Οπτικά συστήματα εντοπισμού θέσης Laser (Fanbeam, CyScan, SceneScan)
- Συστήματα εντοπισμού θέσης μικροκυμάτων και RADAR (Artemis, RADius, RADscan)

1.5.5 Υπολογιστής πραγματικού χρόνου (RTC)

Με την έννοια υπολογιστής σε αυτό το σύστημα πρέπει να αντιλαμβανόμαστε την υπολογιστική μονάδα πραγματικού χρόνου πάνω στην οποία εδράζεται ο αλγόριθμος ελέγχου DP, και τα τερματικά εισόδων και εξόδων του συστήματος. Αυτός αποτελεί το κεντρικό νευρικό σύστημα του συστήματος DP, μέσω του οποίου γίνεται η ανάγνωση των εισόδων από τους αισθητήρες, συγκρίνονται οι τιμές αυτές με τις επιθυμητές που έχουν εξαχθεί από το μαθηματικό μοντέλο, και τέλος, δίνονται τα σήματα για τις απαραίτητες διορθώσεις από τον αλγόριθμο χειρισμού των προωθητών (TAL) στις εξόδους με τελικό προορισμό το σύστημα των προωθητών.

1.5.6 Διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (MMI/HMI)

Ο υλικοτεχνικός εξοπλισμός που απαιτείται για την εισαγωγή των δεδομένων από τους αισθητήρες, την εξαγωγή και απεικόνιση των ενδείξεων του συστήματος και την προσπέλαση του αλγορίθμου ελέγχου είναι γνωστός ως διεπαφή ανθρώπου μηχανής (man/human-machine interface – MMI/HMI). Το HMI παίζει σημαντικό ρόλο στην αποδοτική και ασφαλή λειτουργία του συστήματος παρέχοντας στον χειριστή την δυνατότητα να επηρεάζει εισόδους με στόχο την βέλτιστη απόδοση. Οι περισσότεροι κατασκευαστές DP συστημάτων, έχουν δημιουργήσει έτσι την αρχιτεκτονική του HMI, ώστε να υποβοηθούν την λογική λειτουργία και την απεικόνιση των απαιτούμενων δεδομένων του συστήματος. (Εικόνα 9) Τα υλικά αλλά και η απεικόνιση έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα την φιλικότητα προς τον χρήστη και κάθε υλικό έχει επιλεγεί με τρόπο που να αποφεύγεται οποιοσδήποτε επικίνδυνος ή ακούσιος λάθος χειρισμός. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση διπλού κλικ στο πλήκτρα και συνδιασμός πλήκτρων για εισαγωγή. Για εύκολη πρόσβαση, τα πλήκτρα είναι συνήθως ομαδοποιημένα και τοποθετημένα έτσι, ώστε ο χειριστής να μπορεί να τα εντοπίσει γρήγορα. Για παράδειγμα, όλα τα πλήκτρα ενεργοποίησης των προωθητών είναι ομαδοποιημένα στο ίδιο σημείο της οθόνης ή του πάνελ.



Εικόνα 9: Σταθμός εργασίας χειριστή DP με οθόνη γραφικών και Trackball. (www.praxis-automation.nl)

1.5.7 Χειριστής

Ο χειριστής αποτελεί το τελευταίο συστατικό ενός DP συστήματος και είναι εκπαιδευμένος να χρησιμοποιεί τα υπόλοιπα υποσυστήματα έτσι ώστε να διασφαλίζει τον ομαλό και ασφαλή έλεγχο της θέσης του πλοίου. Η εκπαίδευση των χειριστών DP (Εικόνα 10) διεξάγεται και ελέγχεται από το Ναυτικό Ινστιτούτο του Λονδίνου (Nautical Institute, London), όμως τελευταία υπάρχει μεγάλη ζήτηση για την υιοθέτηση και διεξαγωγή παρόμοιων εκπαιδευτικών προγραμμάτων και από τον Νορβηγικό νηογνώμονα (Det Norske Veritas -DNV). Κατά την διάρκεια της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, στο γραφείο του DP χειριστή βρίσκονται ο χειριστής (DP operator - DPO) και ο ανώτερος/παλαιότερος χειριστής (senior DP operator – SDPO). Σε άλλη περίπτωση μπορεί να είναι ο χειριστής (DPO) και ο νέος χειριστής (junior DP operator - JDPO). (Captain D. Bray, 2020)

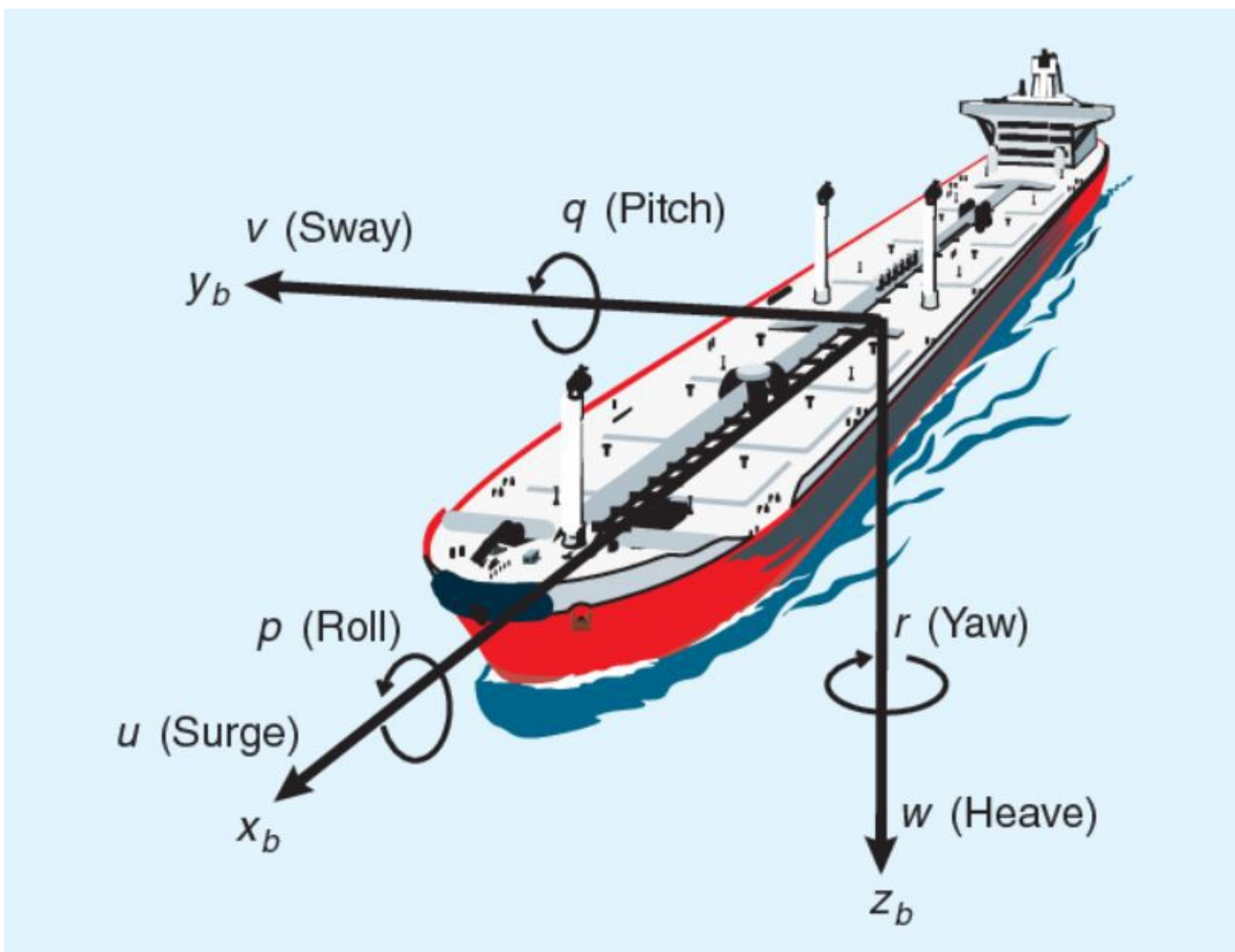
Για τον ασφαλή χειρισμό των συστημάτων DP, απαιτείται όλοι οι χειριστές να έχουν ολοκληρώσει επιτυχώς την εκπαίδευσή τους και να είναι επαρκώς εξοικειωμένοι με το σύστημα. Κάθε χειριστής οφείλει να είναι ενημερωμένος σχετικά με τις ικανότητες του πλοίου, τις αστοχίες και τις προβλεπόμενες συνέπειες των αστοχιών αυτών (failure mode effects analysis - FMEA, failure mode effects and criticality analysis – FMECA), καθώς και σχετικά με την ετήσια αναφορά δοκιμών του πλοίου. Επιπλέον, βάσει εμπειρίας αποδुकνείται ότι, οι χειριστές εκείνοι που είναι εξοικειωμένοι με τα υποσυστήματα της τροφοδοσίας, των προωθητών και των αισθητήρων είναι πολύτιμοι για το πλοίο. Απαιτείται επίσης από όλες τις εταιρείες, να συμπληρώνεται φύλλο εργασιών για όλες τις εργασίες που αφορούν το σύστημα DP. Τέλος, κάθε μηχανικός του πλοίου θα πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρει βοήθεια στους χειριστές του συστήματος DP, με το να εξασφαλίζει ότι τα όλα τα υποσυστήματα δουλεύουν άψογα.



Εικόνα 10: Κέντρο εκπαίδευσης χειριστών DP μέσω προσομοιωτή της εταιρείας Kongsberg. (www.kongsberg.com)

1.6 Κινήσεις και βαθμοί ελευθερίας

Ένα σώμα που αφήνεται ελεύθερο να κινείται στην θάλασσα έχει δυνατότητα κίνησης και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Οι κινήσεις αυτές χωρίζονται σε γραμμικές και περιστροφικές. (Εικόνα 11) Στις γραμμικές κινήσεις έχουμε την διαμήκη (ως προς την άτρακτο του πλοίου) κίνηση, την εγκάρσια κίνηση και την κατακόρυφη κίνηση. Αντίστοιχα στα αγγλικά οι τρεις αυτές κινήσεις ονομάζονται surge, sway και heave. Αν συμπεριλάβουμε και την δυνατότητα περιστροφής γύρω από κάθε έναν από αυτούς τους άξονες, τότε έχουμε και τις τρεις περιστροφικές κινήσεις και έτσι καταλλήγουμε σε έξι συνολικά βαθμούς ελευθερίας. Οι τρεις περιστροφικές κινήσεις είναι γνωστές στα αγγλικά ως roll, pitch και yaw αντίστοιχα. Ένα σύστημα DP ασχολείται μόνο με τον έλεγχο των κινήσεων που ανήκουν στο οριζόντιο επίπεδο και είναι τρεις (surge, sway, yaw). Οι υπόλοιπες τρεις κινήσεις (pitch, roll, heave), αν και δεν γίνεται ο έλεγχός τους από το σύστημα DP, καταγράφονται κανονικά για να βοηθήσουν στο να έχουμε ένα πιο ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο της κινητικής κατάστασης του πλοίου. (S.Kumar, 2020)



Εικόνα 11: Γραφική απεικόνιση των βαθμών ελευθερίας ενός πλοίου που βρίσκεται στην θάλασσα. (www.semantis scholar.org)

Διαμήκης μετατόπιση (Surge) - Με τον όρο αυτό εννοούμε την μετατόπιση της ατράκτου του πλοίου ως προς τον διαμήκη του άξονα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το πλοίο ουσιαστικά μετατοπίζεται προς τα μπροστά και προς τα πίσω, ή αλλιώς προς την πλώρη και την πρύμνη αντίστοιχα. Η κίνηση αυτή ανήκει στο οριζόντιο επίπεδο, και όπως αναφέραμε νωρίτερα επιθυμούμε τον έλεγχο της μέσω του DP.

Εγκάρσια μετατόπιση (Sway) - Με τον όρο αυτό εννοούμε την μετατόπιση της ατράκτου του πλοίου ως προς τον εγκάρσιο άξονα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το πλοίο μετατοπίζεται προς το πλάι, άλλοτε προς τα δεξιά, και άλλοτε προς τα αριστερά. Η κίνηση αυτή ανήκει στο οριζόντιο επίπεδο, και όπως αναφέραμε νωρίτερα επιθυμούμε τον έλεγχο της μέσω του DP.

Κατακόρυφη μετατόπιση (Heave) - Με τον όρο αυτό εννοούμε την μετατόπιση της ατράκτου του πλοίου ως προς τον κατακόρυφο άξονα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Όταν το πλοίο βρίσκεται σε θαλασσοταραχή και η άτρακτός του είναι πάνω σε ένα κύμα τότε το πλοίο σηκώνεται ψηλότερα και όταν το κύμα αποτραβιέται το πλοίο κατεβαίνει χαμηλότερα. Η κίνηση αυτή δεν ανήκει στο οριζόντιο επίπεδο και άρα δεν μας ενδιαφέρει ο έλεγχός της. Εντούτοις, η μετατόπιση αυτή μετράται κανονικά από τον αισθητήρα MRU και αποτελεί είσοδο του μαθηματικού μοντέλου που τρέχει ο υπολογιστής.

Διαμήκης περιστροφή (Roll) - Όταν το πλοίο δέχεται δυνάμεις από το πλάι, όπως για παράδειγμα οι ριπές του ανέμου ή το κύμα που προσκρούει στην άτρακτο, τότε αυτό έχει ως συνέπεια την περιστροφή του πλοίου γύρω από τον διαμήκη του άξονα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η κίνηση αυτή δεν ανήκει στο οριζόντιο επίπεδο και επομένως δεν μας ενδιαφέρει ο έλεγχός της, όμως γίνεται η καταγραφή της από τον αισθητήρα MRU και δίδεται στην μονάδα ελέγχου ώστε να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση του σφάλματος του αισθητήρα εντοπισμού θέσης.

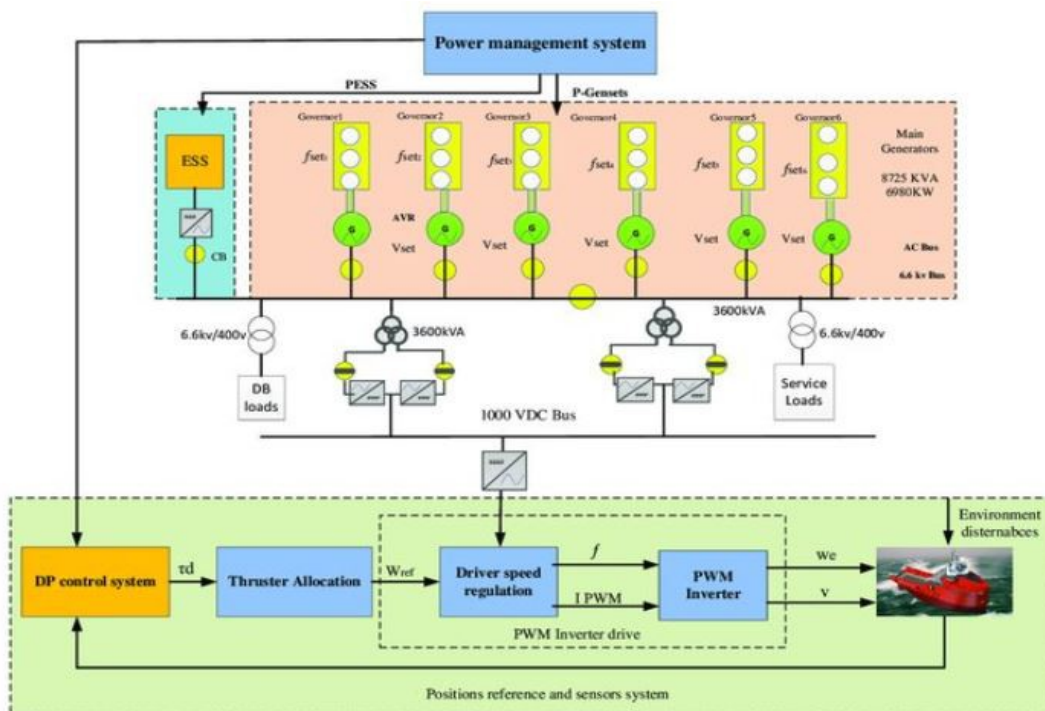
Εγκάρσια περιστροφή (Pitch) - Όπως ακριβώς και για την διαμήκη περιστροφή, έτσι και για την εγκάρσια, μπορούμε να πούμε ότι οι εξωτερικές δυνάμεις που επενεργούν στο πλοίο, προκαλούν την περιστροφή του γύρω από τον εγκάρσιο άξονα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ούτε η κίνηση αυτή ανήκει στο οριζόντιο επίπεδο και επομένως δεν μας ενδιαφέρει ο έλεγχός της, όμως γίνεται η καταγραφή της από τον αισθητήρα MRU και δίδεται στην μονάδα ελέγχου ώστε να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση του σφάλματος του αισθητήρα εντοπισμού θέσης.

Κατακόρυφη περιστροφή (Yaw) - Όταν το πλοίο περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονά του, προκαλείται μεταβολή στην κατεύθυνσή του όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η μεταβολή αυτή γίνεται αντιληπτή από το γυροσκόπιο. Το γυροσκόπιο αποτελεί ασφαλέστερη είσοδο από το MRU για την συγκεκριμένη κίνηση και είναι ένα ανεξάρτητο και πιο εξειδικευμένο όργανο.

1.7 Σύστημα διαχείρισης ισχύος/ενέργειας (PMS/EMS)

Για την απρόσκοπτη και ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και συστημάτων ενός πλοίου απαιτείται ένα αξιόπιστο σύστημα διαχείρισης ενέργειας (power management system – PMS). (Εικόνα 12) Τα περισσότερα σύγχρονα πλοία διαθέτουν ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (γεννήτριες), τα οποία παράγουν το απαιτούμενο ρεύμα. Η δυνατότητές των γεννητριών ποικίλουν αναλόγως με τον σκοπό και τον τύπο του πλοίου που είναι σχεδιασμένες να υπηρετούν. Τα περισσότερα πλοία διαθέτουν γεννήτριες οι οποίες τροφοδοτούνται με μηχανική ενέργεια από τον κύριο άξονα της μηχανής, όμως είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα ύπαρξης και ο τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος διαχείρισης της ενέργειας αυτής. (I. Sørfonn, 2007)

Στις υπεράκτιες κατασκευές και στα πλοία με ενσωματωμένο σύστημα DP γίνεται εκτενής χρήση ηλεκτρικών κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι και υπακούουν στις εντολές των οδηγών μεταβλητής συχνότητας (variable frequency drives – VFDs), οι οποίοι καταναλώνουν πολύ μεγάλη ενέργεια. Ο υπολογισμός της ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία των κινητήρων και των λοιπών εξαρτημάτων ενός συστήματος DP γίνεται πολύ προσεκτικά, βάσει των ακραίων συνθηκών λειτουργίας του συστήματος. Οι ακραίες συνθήκες λειτουργίας καθορίζουν την μέγιστη απαιτούμενη ισχύ που χρειάζονται οι προωθητές για να κρατήσουν το πλοίο εντός ορισμένων ορίων. Ο άνεμος, το θαλάσσιο ρεύμα και τα κύματα αποτελούν τους παράγοντες για τον υπολογισμό της μέγιστης απαιτούμενης ισχύος η οποία πρέπει να εξασφαλιστεί από το πλήρωμα του πλοίου, έτσι ώστε να αποφευχθεί μια απότομη διακοπή ρεύματος (blackout). Ο γενικός κανόνας για τα συστήματα DP είναι ότι θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελέσουν κανονικά όλες τους τις λειτουργίες, καταναλώνοντας περίπου το 80% της διαθέσιμης ενέργειας, σε συνθήκες όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι 61 κόμβοι ή 31 m/s.



Εικόνα 12: Μπλοκ διάγραμμα της συνδεσμολογίας του υποσυστήματος διαχείρισης ενέργειας με το σύστημα ελέγχου DP. (Motjaba Mehrzadi, www.researchgate.com)

Ο ρόλος του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι να ρυθμίζει την ποσότητα της παραγόμενης ισχύος γρήγορα και αποδοτικά, έτσι ώστε να ταιριάζει με την τρέχουσα απαιτούμενη ισχύ. Εάν η παραγόμενη ισχύς είναι μικρότερη από την απαιτούμενη τότε θα υπάρξει διακοπή ρεύματος και για αυτόν τον λόγο οι κατασκευαστές DP συστημάτων φροντίζουν να υπάρχει επαρκής εφεδρική ισχύς. Σε κρίσιμες περιπτώσεις που η απαιτούμενη ισχύς είναι πολύ μεγάλη, για να αποφευχθεί η διακοπή ενέργειας, υπάρχει η τακτική της αποσύνδεσης των μη-απαραίτητων ηλεκτρικών φορτίων του πλοίου με την βοήθεια διακοπών.

Οι πρωταρχικές λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι η διασφάλιση της διαθέσιμης ισχύος και η ανάκτηση της ισχύος όσο το δυνατόν πιο γρήγορα έπειτα από την ανίχνευση διακοπής. Άλλες λειτουργίες είναι η παρακολούθηση της κατάστασης των γεννητριών και του φόρτου, ο ισόποσος διαμοιρασμός του φόρτου στις γεννήτριες (load sharing) και η αποφυγή διακοπής ενέργειας μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις. Ο τρόπος διαμοιρασμού του φόρτου προς τις γεννήτριες μπορεί να είναι χειροκίνητος, αυτόματος, σταθερός, συμμετρικός ή ασύμμετρος.

Τέλος, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπως το σύστημα εντοπισμού θέσης, ο υπολογιστής ελέγχου, η διεπαφή ανθρώπου-μηχανής και οι αισθητήρες, είναι σημαντικό να υποστηρίζονται και από απρόσκοπτη παροχή ενέργειας (uninterruptible power supply – UPS). Αναλόγα με την DP κλάση του πλοίου καθορίζεται και η εφεδρικότητα των UPS, έτσι τα συστήματα DP Class 2 και DP Class 3 θα πρέπει πάντα να έχουν εφεδρικά UPS ικανά να τροφοθήσουν το σύστημα για 30 λεπτά ύστερα από διακοπή ενέργειας.

1.8 Ηλεκτρικοί προωθητές και έλεγχος προωθητών

Τα περισσότερα πλοία με σύστημα DP είναι εξοπλισμένα με πετρελαιο-ηλεκτρική πρόωση (diesel-electric). Με αυτό τον όρο εννοούμε πως οι πετρελαιοκινητήρες κινούν τις γεννήτριες και αυτές με την σειρά τους παράγουν το ρεύμα που τροφοδοτεί τους ηλεκτρικούς προωθητές. Ακόμη, πολλά πλοία χρησιμοποιούν σε συνδυασμό τους κύριους προωθητές τους με τον απαιτούμενο αριθμό βοηθητικών προωθητών. Οι κύριοι προωθητές βρίσκονται τοποθετημένοι κάτω από την πρύμνη του πλοίου. Αυτή η διάταξη συνήθως υποβοηθάται από έναν ή περισσότερους βοηθητικούς προωθητές με αποτέλεσμα να ελίσσεται πιο εύκολα το πλοίο. Οι προωθητές αυτοί μπορεί να έχουν προκαθορισμένη κατεύθυνση, όπως στην περίπτωση των προωθητών πλώρης και πρύμνης (bow thruster, stern thruster) που βρίσκονται εγκατεστημένοι μέσα σε σύραγγα (tunnel thrusters), εγκάρσια, μέσα ή λίγο πάνω από την καρίνα του πλοίου. Ακόμα, μπορεί οι προωθητές αυτοί να είναι αζιμουθιακοί, τοποθετημένοι κάτωθεν της ατράκτου του πλοίου, και με δυνατότητα περιστροφής τριακοσίων εξήντα μοιρών. Γενικότερα, αυτού του τύπου οι προωθητικές μηχανές λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια. (S.Kumar, 2020)

Ένα σύγχρονο πλοίο με σύστημα DP μπορεί να έχει διάφορους συνδυασμούς πρόωσης ανάλογα με την λειτουργία στην οποία βρίσκεται και το σκοπό που εξυπηρετεί. Έχουμε αρχικά τον χειροκίνητο έλεγχο, μέσω του οποίου ο χειριστής είναι σε θέση να ελέγχει κάθε προωθητή ξεχωριστά ή σε συνδυασμό της επιλογής του.

Στην συνέχεια, υπάρχει ο αυτόματος έλεγχος πορείας με τις διάφορες λειτουργίες του όπως π.χ. η λειτουργία με την χρήση του κατευθυντήριου μοχλού (joystick), η λειτουργία αυτόματου πιλότου, η διατήρηση θέσης και διεύθυνσης και άλλες. Μπορεί ακόμα, ένα πλοίο, να χρησιμοποιεί το σύστημα DP μόνο για τον ελιγμό κατά την πρόσδεση ή την απόδεσή του (mooring).

Σε κάθε πλοίο, η πρόωση και οι προωθητικές συσκευές ευρύτερα, παίζουν σπουδαίο ρόλο για την ασφαλή λειτουργία του, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ισχύ και περιστροφή. Όταν το πλοίο βρίσκεται σε αυτόματη ή DP λειτουργία, τότε η απόφαση για την κατάρτιση του πίνακα της λογικής καθορισμού των προωθητών (thruster allocation logic – TAL) παίρνεται από τον ψηφιακό ελεγκτή του DP. Ο σχεδιασμός ενός αξιόπιστου συστήματος ελέγχου των προωθητών είναι ασφαλώς πολύ σημαντικός, όμως ίσης και πλέον σημασίας είναι και η ικανότητα του πληρώματος του πλοίου να κατανοήσει την λειτουργικότητα και τις δυνατότητες της ηλεκτρο-μηχανολογικής αυτής διάταξης. Οι εντολές ελέγχου προς τους προωθητές αποτελούνται από δύο κύρια σήματα, την επιθυμητή ισχύ και την επιθυμητή διεύθυνση. Κάποια επιπλέον σήματα είναι η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του κάθε προωθητή και επίσης τα σήματα της τρέχουσας ισχύως και τρέχουσας διεύθυνσης. (S.Kumar, 2020)

Στην συνέχεια θα απαριθμήσουμε ορισμένα είδη προωθητικών συσκευών που συναντώνται στα περισσότερα πλοία με σύστημα DP. Αυτά είναι οι κύριοι προωθητές, τα πηδάλια, οι προωθητές σύραγγας και οι αζιμουθιακοί προωθητές, αλλά και κάποια πιο εξειδικευμένα προωθητικά συστήματα όπως τα Gill thrusters και οι πρεπέλες Voith-Schneider (Εικόνα 13) που απεικονίζονται παρακάτω. Στην πετρελαίο-ηλεκτρική πρόωση γενικά, ένας ηλεκτρικός κινητήρας μεταβλητής ταχύτητας δίνει κίνηση στον άξονα της προπέλας. Αν ο κινητήρας είναι τοποθετημένος οριζόντια σε σχέση με την προπέλα του πλοίου, τότε είναι εύκολη η σύνδεση των δύο με έναν απλό άξονα. Αυτή όμως η διάταξη προϋποθέτει την ύπαρξη μεγάλου διαθέσιμου χώρου. Εάν αυτός ο χώρος δεν υπάρχει, τότε ο κινητήρας τοποθετείται κάθετα και για την σύνδεσή του με την προπέλα χρησιμοποιείται ένα κουτί με γρανάζια (gearbox).

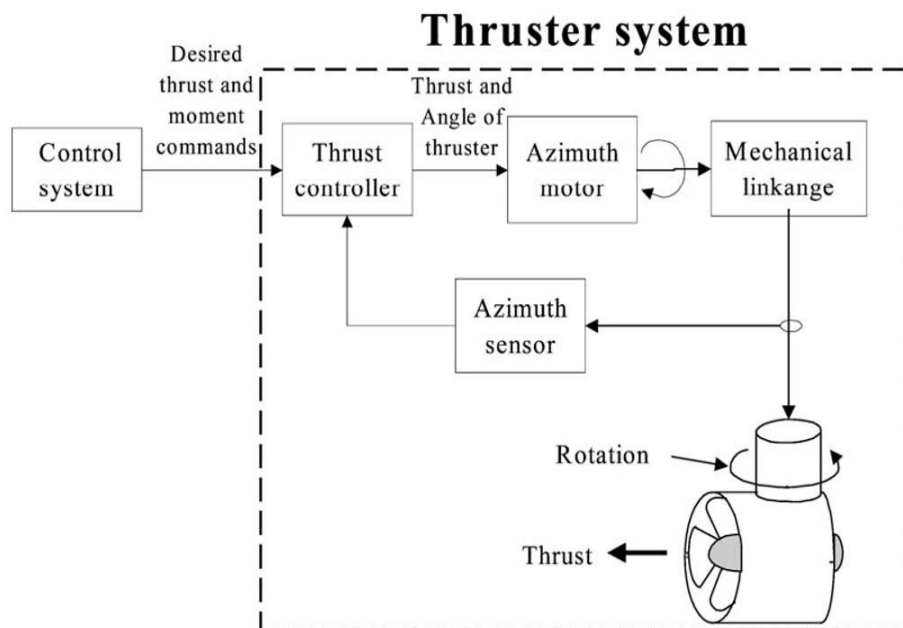


Εικόνα 13: Προωθητές τύπου Voith-Schneider. (www.boschrexroth.com)

Τα σύγχρονα πλοία DP, έχουν την δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου του κάθε προωθητή από ξεχωριστό μοχλό για τον καθένα. Ο χειροκίνητος έλεγχος περιλαμβάνει λειτουργίες όπως έναρξη/παύση, επιλογή στροφών και γωνίας περιστροφής κατά βούληση. Να σημειωθεί ότι, η λειτουργία χειροκίνητου ελέγχου είναι μια λειτουργία ελέγχου κλειστού βρόχου, που θα πει πως τα σήματα ανατροφοδότησης των τρέχουσων τιμών θέσης και διεύθυνσης του κινητήρα συγκρίνονται με τα επιθυμητά σήματα και στέλνονται οι κατάλληλες διορθωτικές εντολές στους προωθητές. (S.Kumar, 2020)

Η χειροκίνητη λειτουργία είναι απαραίτητη για όλους τους τύπους προωθητικών συσκευών και θα πρέπει πάντοτε να ελέγχεται η ομαλή της λειτουργία πριν την διενέργεια οποιασδήποτε εργασίας του πλοίου που αφορά το σύστημα DP. Το σύστημα ελέγχου του προωθητή είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε σε περίπτωση αστοχίας να καταλήξει σε μια κατάσταση ασφαλείας (fail-safe situation). Το πέρασμα σε κατάσταση ασφαλούς λειτουργίας εξασφαλίζει ότι αυτή η αστοχία δεν θα σταθεί ικανή να εκτρέψει το πλοίο από την θέση του ή την διεύθυνσή του ή και τα δύο, αλλά αντιθέτως θα τα διατηρήσει για ένα μικρό χρονικό διάστημα και θα εκπέμψει το ανάλογο σήμα κινδύνου.

Η παρακολούθηση των προωθητών γίνεται από τον επιβλέποντα χειριστή, ο οποίος έχει συνεχώς το βλέμμα του στραμμένο στην κεντρική κονσόλα του DP, στην οποία απεικονίζονται τα σήματα ελέγχου και κινδύνου. Κάποιες από τις παράμετρος που επεικονίζονται, είναι τα σήματα ελέγχου και ανατροφοδότησης των προωθητών, οι ενδείξεις θερμοκρασίας, πίεσης και στάθμης του συστήματος ψύξης των προωθητών, η θερμοκρασία, η διαθέσιμη ισχύς και η κατάσταση λειτουργίας του προωθητή, η ένδειξη βραχυκυκλώματος κ.α. (Εικόνα14) Μόνο ύστερα από την ενεργοποίησή του (enable), μπορεί ο προωθητής να δεχτεί εντολές από το TAL. Τα σήματα ελέγχου και ανατροφοδότησης είναι αναλογικά σήματα συνήθως 4-20mA, ενώ τα σήματα ετοιμότητας (ready), ενεργούς λειτουργίας (running) και ενεργοποίησης (enabled) είναι ψηφιακά σήματα δύο καταστάσεων (on/off).



Εικόνα 14: Μπλοκ διάγραμμα του υποσυστήματος ελέγχου του προωθητή. (C. Liang, W. Cheng, 2004)

1.9 Συστήματα εντοπισμού θέσης

Τα συστήματα DP, για να λειτουργήσουν, απαιτούν την ακριβή, αξιόπιστη και απρόσκοπτη είσοδο δεδομένων από το σύστημα εντοπισμού θέσης και ορισμένα εξ' αυτών, ενδέχεται να απαιτούν ακρίβεια θέσης μικρότερη του ενός μέτρου. Ο ρυθμός ανανέωσης των δεδομένων σε ένα σύστημα DP, θα πρέπει να ισούται ή να υπερβαίνει την μία φορά το δευτερόπτο (60Hz) ώστε αυτό να θεωρείται υψηλής ακριβείας. Στις υπεράκτιες εργασίες όπου τα μέτρα ασφαλείας είναι υψηλότερα, η αξιοπιστία των δεδομένων θεωρείται υψίστης σημασίας και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα συστήματα εντοπισμού θέσης. Οι εφαρμογές και η διαθεσιμότητα των συστημάτων αυτών εξαρτώνται από τον τύπο εργασίας και το βάθος του νερού. Τα πιο συνηθισμένα συστήματα που χρησιμοποιούνται στις ναυτιλιακές εργασίες περιγράφονται στην συνέχεια του κεφαλαίου. (IMCA, 2022)

1.9.1 Δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης

Η θέση που λαμβάνεται από το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού (global positioning system - GPS) δεν είναι αρκετά ακριβής για χρήση από την τεχνολογία DP. Η θέση βελτιώνεται με τη χρήση σταθερού επίγειου σταθμού αναφοράς (differential station) που συγκρίνει τη θέση από GPS με τη γνωστή θέση του σταθμού. Η διόρθωση αποστέλλεται στον δέκτη DGPS του πλοίου με ραδιοσυχνότητα μεγάλου κύματος. Για χρήση σε συστήματα DP απαιτείται ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Εταιρείες όπως η Veripos, η Fugro και η C-Nav παρέχουν διαφορικά σήματα μέσω δορυφόρου, επιτρέποντας τον συνδυασμό πολλών σταθμών και άρα περισσότερων σημείων που χρησιμοποιούνται στις τριγωνομετρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της θέσης. Το πλεονέκτημα του DGPS είναι η σχεδόν απρόσκοπτη και συνεχής διαθεσιμότητά του. Στα μειονεκτήματά του είναι η υποβάθμιση του σήματος από ιοντοσφαιρικές ή ατμοσφαιρικές διαταραχές, ο αποκλεισμός του δορυφορικού σήματος από γερανούς ή δομές από σίδηρο και σκυρόδεμα και φθορά του σήματος σε μεγάλα υψόμετρα. Υπάρχουν επίσης συστήματα εγκατεστημένα σε σκάφη που χρησιμοποιούν διάφορα συστήματα αύξησης της ποιότητας του σήματος, καθώς και συνδυασμό θέσης GPS με GLONASS ή άλλων παρόχων. Μέσω ενός ψηφιακά υλοποιημένου συγκριτή μπορεί με αυτό τον τρόπο να υπολογιστεί ο μέσος όρος των τιμών των δύο αυτών ανεξάρτητων δορυφορικών παρόχων. Οι χώρες οι οποίες έχουν αναπτύξει δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης είναι οι παρακάτω:

- Η.Π.Α. – NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging)
- Ρωσία - GLONASS (GLObal Navigation Satellite System)
- Κίνα – BeiDou/Compass
- Ε.Ε. – Galileo
- Ιαπωνία – Quasi-Zenith
- Ινδία – IRNSS/NavIC (Indian Regional Navigation Satellite System)

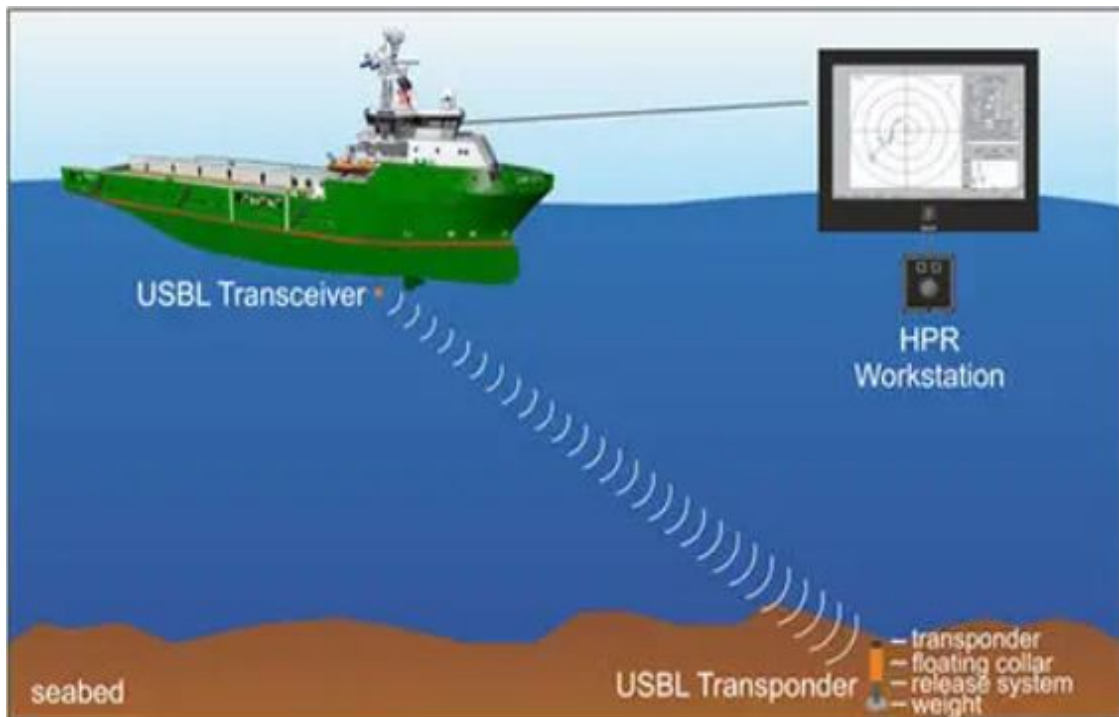
Από τα παραπάνω δορυφορικά δίκτυα, το NAVSTAR, το GLONASS και το Beidou/Compass παρέχουν ήδη παγκόσμια κάλυψη για πολιτικούς αλλά και στρατιωτικούς σκοπούς, ενώ το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Galileo δεν έχει ολοκληρώσει ακόμα την αποστολή των δορυφόρων του στο διάστημα. Το ιαπωνικό σύστημα δορυφόρων Quasi-Zenith, έχει περιορισμένη γεωγραφική κάλυψη καθώς κινείται πάνω από τις ασιατικές ακτές του Ειρηνικού Ωκεανού και την Ιαπωνία και το δίκτυο IRNSS καλύπτει τις περιοχές γύρω από τον Ινδικό Ωκεανό.

1.9.2 Υδροακουστικά συστήματα εντοπισμού θέσης

Αυτού του είδους τα συστήματα αποτελούνται από έναν ή περισσότερους αναμεταδότες (transponders) τοποθετημένους στο βυθό και έναν μορφομετατροπέα (transducer), που μετατρέπει την ενέργεια από ηλεκτρική σε κυματική, τοποθετημένο στην καρίνα του πλοίου και προσανατολισμένο προς τον πυθμένα. (Εικόνα 15) Ο μορφομετατροπέας αυτός, στέλνει ένα ακουστικό σήμα μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στον αναμεταδότη, ο οποίος ενεργοποιείται για να απαντήσει. Καθώς η ταχύτητα του ήχου μέσω του νερού είναι γνωστή, είναι εύκολο να υπολογιστεί και η απόσταση. Επειδή υπάρχουν πολλά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία στον μορφομετατροπέα, και είναι τοποθετημένα με διαφορετικές κλίσεις το ένα από το άλλο σε μορφή σφαίρας, μπορεί να προσδιοριστεί και η κατεύθυνση του σήματος απάντησης από τους αναμεταδότες. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του πλοίου σε σχέση με τους αναμεταδότες. (IMCA, 2022)

Μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι η πρόκληση θορύβου από τους προωθητές του πλοίου ή άλλα κοντινά ακουστικά σήματα ή θορύβους λόγω εργασιών. Η χρήση είναι περιορισμένη σε ρηγά νερά λόγω του φαινομένου της κάμψης των ακτινών (ray bending) που συμβαίνει όταν ο ήχος ταξιδεύει οριζόντια μέσω του νερού. Χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις τύποι συστημάτων υδροακουστικού εντοπισμού θέσης (hydro-acoustic position reference – HPR) ή αλλιώς ακουστικού εντοπισμού υψηλής ακριβείας (high precision acoustic positioning - HiPAP):

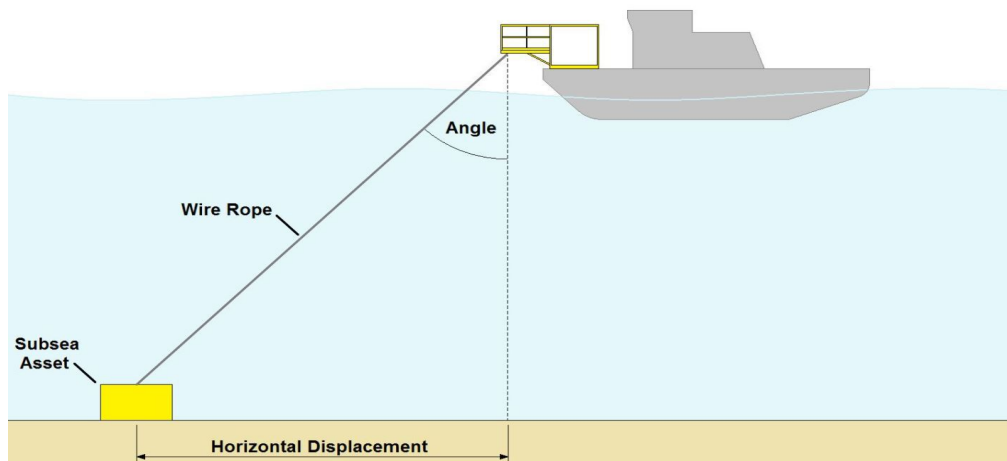
- Ultra – or - Super – Short Base Line ή USBL ή SSBL
- Long base line ή LBL
- Short base line ή SBL



Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των υδροακουστικών συστημάτων εντοπισμού θέσης (www.praxis-automation.nl)

1.9.3 Ελαφρύ τεντωμένο καλώδιο (light taut wire – LTW)

Το παλαιότερο και το κατά γενική ομολογία φιλικότερο προς τον χρήστη σύστημα αναφοράς θέσης που χρησιμοποιείται στα συστήματα DP. Το σύστημα αυτό (Εικόνα 16) είναι επίσης πολύ ακριβές σε σχετικά ρηγά νερά. Ένα βαρίδι ορισμένης μάζας ποντίζεται στο βυθό. Μετρώντας το μήκος του καλωδίου που ποντίστηκε και την γωνία που σχηματίζει από τον νοητό κατακόρυφο άξονα από το σημείο πόντισης, μπορεί να υπολογιστεί η σχετική θέση του πλοίου από το βαρίδι. Απαιτείται προσοχή κατά την πόντιση του βαριδιού ώστε να μην δημιουργηθεί τόξο μεταξύ πλοίου και βαριδιού λόγω του συρσίματος στον βυθό, αλλά να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο τεντωμένο. Για βαθύτερα νερά το σύστημα αυτό είναι λιγότερο ευνοϊκό, καθώς το ρεύμα θα κάμπτε το καλώδιο. Υπάρχουν, ωστόσο, συστήματα που το εξουδετερώνουν με μια κεφαλή αντίβαρου (counterweight). Τέλος, υπάρχουν και οριζόντια LTW, τα οποία χρησιμοποιούνται όταν το πλοίο βρίσκεται κοντά σε κάποια κατασκευή (πλατφόρμα πετρελαίου, FPSO). (IMCA, 2022)



Εικόνα 16: Σχηματική επεικόνιση της τεχνικής του τεντωμένου καλωδίου για τον εντοπισμό θέσης. (www.smt-ab.com)

1.9.4 Συστήματα εντοπισμού θέσης Laser

Τα συστήματα Fanbeam (Techmak, 2019) και CyScan (Wärtsila, 2020) είναι δύο από τα επικρατέστερα συστήματα αναφοράς θέσης με βάση την τεχνολογία laser της ενίσχυσης του οπτικού σήματος. (Εικόνα 17) Πρόκειται για πολύ απλά συστήματα, καθώς πρέπει να εγκατασταθεί μόνο μία συστάδα πρισμάτων (prism-cluster) ή ταινίας-στόχου σε μια κοντινή κατασκευή ή σε ένα πλοίο έτσι ώστε να ανακλάται το προσπίπτων σήμα. Στα συστήματα αυτού του τύπου υπάρχει ο κίνδυνος το σήμα να χαθεί λόγω της πρόσπτωσης σε άλλα ανακλώμενα αντικείμενα και να έχει ως αποτέλεσμα την σκέδαση του οπτικού σήματος. Η εμβέλεια εξαρτάται από τον καιρό, αλλά είναι συνήθως πάνω από 500 μέτρα. Η τεχνολογική πρόοδος οδήγησε στην ανάπτυξη του αισθητήρα SceneScan (Wärtsila), ο οποίος είναι ένα laser PRS χωρίς την ανάγκη στόχων, που αξιοποιεί τον αλγόριθμο ταυτόχρονου εντοπισμού και χαρτογράφησης (simultaneous localization and mapping – SLAM). Ο αλγόριθμος αυτός υλοποιεί και επιλύει το υπολογιστικό πρόβλημα της κατασκευής και ενημέρωσης του χάρτη ενός άγνωστου περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα παρακολουθεί την θέση ενός σημείου (agent) μέσα σε αυτό.



*Εικόνα 17: Το σύστημα εντοπισμού θέσης CyScan με τεχνολογία Laser.
(www.wartsila.com)*

1.9.5 Συστήματα εντοπισμού θέσης μικροκυμάτων και RADAR

Το ARTEMIS (Wartsila, 2020) είναι ένα σύστημα που βασίζεται σε τεχνολογία ραντάρ 9GHz. Αυτό το σύστημα εντοπισμού θέσης σχεδιάστηκε για ειδικές εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων, και κυρίως για εργασίες φορτοεκφόρτωσης πετρελαιοειδών. Μια μονάδα τοποθετείται σε έναν πλωτό σταθμό παραγωγής και αποθήκευσης (FPSO) και μια δεύτερη μονάδα στο δεξαμενόπλοιο που εξυπηρετεί τον σταθμό (shuttle tanker). Πρόκειται για ένα radar τεχνολογίας τριών εκατοστών (3cm radar) με την εμβέλεια της νεότερης έκδοσης Mk6 να αγγίζει τα 10 χιλιόμετρα. Το πλεονέκτημα είναι η αξιόπιστη, παντός καιρού απόδοση. Μειονέκτημα του συστήματος είναι ότι η μονάδα είναι βαριά και δαπανηρή. Η τρέχουσα έκδοση είναι το Artemis Mk6.

Το διαφορικό, απόλυτο και σχετικό σύστημα εντοπισμού θέσης (differential, absolute and relative positioning system – DARPS), κατασκευάστηκε από την Kongsberg και χρησιμοποιείται συνήθως σε δεξαμενόπλοια μεταφοράς κατά τη φόρτωση από πλωτό σταθμό παραγωγής και αποθήκευσης (FPSO). Και τα δύο μέρη θα πρέπει να έχουν δέκτη GPS. Δεδομένου ότι τα σφάλματα είναι τα ίδια και για τους δύο δέκτες, το σήμα δεν χρειάζεται να διορθωθεί. Τα δεδομένα σχετικά με την θέση του FPSO μεταδίδεται στο δεξαμενόπλοιο, και έτσι οι τιμές των συντεταγμένων του στην συνέχεια μπορούν να τροφοδοτηθούν στο σύστημα DP.

Τα συστήματα RADius και RadaScan που κατασκευάστηκαν από τις εταιρείες Kongsberg και Wärtsila Guidance Marine, UK αντίστοιχα. Πρόκειται για συστήματα ραντάρ που λειτουργούν με την χρήση μικροκυμάτων μεταβλητής συχνότητας (frequency modulated continuous wave - FMWC). Ενώ το RADius δεν έχει κινούμενα μέρη, το RadaScan διαθέτει περιστρεφόμενη κεραία κάτω από τον θόλο. Αυτά τα συστήματα έχουν συνήθως ανταποκριτές οι οποίοι είναι ενεργοί στόχοι που στέλνουν το σήμα πίσω στον αισθητήρα μέσω των οποίων εντοπίζονται οι πολικές συνεταγμένες του στόχου. Η εμβέλεια των συστημάτων αυτών είναι συνήθως έως 600 μέτρα.

1.10 Περιβαλλοντικοί αισθητήρες

Οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες ενός συστήματος DP είναι συνήθως τρεις, ο αισθητήρας ανέμου, η γυροπυξίδα, και η μονάδα αναφοράς κίνησης (MRU). Σχεδόν πάντοτε, οι αισθητήρες αυτοί έχουν διπλή ή και τριπλή εφεδρική ανάλυση ανάλογα με την κλάση του DP συστήματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση τριπλής εφεδρικότητας, τρεις αισθητήρες του ίδιου είδους συνυπάρχουν και διαβάζονται από τον υπολογιστή πραγματικού χρόνου (RTC), αλλά μόνο ο ένας συνήθως λαμβάνεται ως πηγή εισόδου δεδομένων στον αλγόριθμο ελέγχου.

1.10.1 Αισθητήρας ανέμου

Ο άνεμος είναι ίσως ο πιο βασικός παράγοντας που συμβάλει στην εκτροπή του πλοίου από την αρχική του θέση. Για τον λόγο αυτό, είναι σκόπιμο να γίνεται η μέτρηση της έντασης και της διεύθυνσής του με μεγάλη ακρίβεια. Τα δεδομένα εισόδου του αισθητήρα ανέμου ή αλλιώς ανεμόμετρου, θα καθορίσουν το αποτέλεσμα της εξόδου του υπολογιστή προς τους προωθητές. Κάνοντας χρήση της μέσης τιμής των δεδομένων αυτών υπολογίζεται ο ανεμοδείκτης (weathervane) ο οποίος ουσιαστικά καθορίζει την ελάχιστη ισχύ πρόωσης προς την εντίθετη του ανέμου κατεύθυνση, την οποία πρέπει να διατηρούν οι προωθητές, έτσι ώστε το πλοίο να βρίσκεται εντός των ικανοτήτων του συστήματος DP. Οι συνηθέστεροι τύποι ανεμόμετρων είναι τα ανεμόμετρα με ανακυκλούμενα δοχεία (rotating cups) και τα ανεμόμετρα τεχνολογίας υπερήχων (ultra-sonic). Στα δεύτερα (Εικόνα 18), η μέθοδος μέτρησης του ανέμου γίνεται μέσω της διαφοράς χρόνου μεταξύ της αποστολής και της λήψης του υπερηχητικού σήματος και λόγω της απλής κατασκευής του, απαιτεί ελάχιστη η καθόλου συντήρηση. Αυτό τον κάνει ιδανικό για εφαρμογές όπως το σύστημα DP. (S.Kumar, 2020)



Εικόνα 18: Ανεμόμετρο τεχνολογίας υπερήχων. (www.biral.com)

1.10.2 Γυροπυξίδα

Η γυροπυξίδα είναι ο αισθητήρας που υπολογίζει την διεύθυνση και τον ρυθμό περιστροφής του πλοίου. Είναι συνήθως τοποθετημένες σε ζεύγη ή τριάδες, έτσι ώστε τυχόν απόκλιση της μιας από την άλλη να συναθροίζεται στο σήμα που λαμβάνει ως είσοδο ο υπολογιστής. Στα DP Class 3 συστήματα, έχουμε σχεδόν πάντα τρεις γυροπυξίδες τοποθετημένες στο πλοίο. Οι γυροπυξίδες νεότερης τεχνολογίας, συνήθως είναι συνδεδεμένες και με το σύστημα εντοπισμού θέσης με σκοπό να λαμβάνονται τα δεδομένα γεωγραφικού πλάτους και να γίνονται διορθώσεις.

1.10.3 Μονάδα αναφοράς κίνησης (MRU)

Όπως είδαμε και στους βαθμούς ελευθερίας παραπάνω, το σύστημα DP, ασχολείται με τους χειρισμούς διόρθωσης του σφάλματος σε τρεις βασικές κινήσεις, την διαμήκη και εγκάρσια μετατόπιση (surge, sway) και την κατκόρυφη περιστροφή (yaw). Αλλά και οι υπόλοιπες τρεις κινήσεις, η κατακόρυφη μετατόπιση (heave) και η διαμήκης και εγκάρσια περιστροφή (roll, pitch), καταγράφονται από την μονάδα αναφοράς κίνησης για να χρησιμοποιηθούν για την διόρθωση της ακρίβειας θέσης και διεύθυνσής του πλοίου. Στην πιο απλή της μορφή, στην καρδιά μιας μονάδας αναφοράς κίνησης (Εικόνα 19) υπάρχει ένας θάλαμος και στο κέντρο του βρίσκεται μια εκκρεμής μάζα. Η μάζα αυτή περιβάλλεται από υγρό και σφαιρικά γύρω της υπάρχουν τοποθετημένοι αισθητήρες μέτρησης απόστασης. Με βάση την μέτρηση της απόστασης, γίνεται και ο υπολογισμός των παράγωγων μεγεθών, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, τοπικά μέσα στην μονάδα και στέλνονται όλα στην είσοδο του υπολογιστή. (Kongsberg, 2020)



Εικόνα 19: Μονάδα αναφοράς κίνησης Kongsberg Seatex για χρήση στην ναυτιλία. (www.kongsberg.com)

1.11 Εποπτεία και έλεγχος κινήσεων πλοίου από το DP

Η θέση και η διεύθυνση του πλοίου ελέγχονται από την ενεργό πρόωση που προσφέρουν στο πλοίο οι προωθητές. Το σύστημα, είναι διαρκώς απασχολημένο με την διόρθωση των τριών μεγεθών που είδαμε πιο πάνω, δηλαδή της διαμήκους και της εγκάρσιας μετατόπισης (surge, sway) που ορίζουν την θέση, και της κατακόρυφης περιστροφής που ορίζει την διεύθυνση (yaw). Αυτό επιτυγχάνεται με τον αυτόματο έλεγχο του κάθε μεγέθους ξεχωριστά. Η θέση του πλοίου ελέγχεται μετρώντας την διαμήκη και εγκάρσια μετατόπιση με την χρήση του συστήματος εντοπισμού θέσης (PRS) και εξειδικευμένων οργάνων για την μέτρηση της απόκλισης της διεύθυνσης. Τα δεδομένα για την τρέχουσα θέση του πλοίου από το σύστημα εντοπισμού θέσης συγκρίνονται με τις επιθυμητές τιμές (x,y) που έχουμε ορίσει ως επιθυμητό σημείο και υπολογίζεται το σφάλμα (error). (S.Kumar, 2020)

Το σφάλμα αναλύεται από τον ελεγκτή και στέλνει ένα σήμα εξόδου προς τους προωθητές. Κατ' ανάλογο τρόπο, η διεύθυνση του πλοίου ελέγχεται μετρώντας την γωνία περιστροφής με την χρήση του γυροσκοπίου. Τα δεδομένα από το γυροσκόπιο στην συνέχεια οδηγούνται σε έναν συγκριτή υλοποιημένο με ψηφιακό τρόπο στο λογισμικό του υπολογιστή και αυτός με την σειρά του, αφού αναλύσει το σφάλμα της απόκλισης από την επιθυμητή διεύθυνση, στέλνει το σήμα εξόδου στους προωθητές.

Οι άλλες τρεις κινήσεις του πλοίου αφορούν το κατακόρυφο επίπεδο και δεν απαιτείται διόρθωση. Αυτές είναι, η διαμήκης περιστροφή, η εγκάρσια περιστροφή και η κατακόρυφη μετατόπιση. Η διαμήκης περιστροφή ενός πλοίου είναι η κίνηση γύρω από τον διαμήκη του άξονα. Η εγκάρσια περιστροφή ενός πλοίου είναι η κίνηση γύρω από τον εγκάρσιο άξονά του. Καμία από τις δύο αυτές κινήσεις δεν ελέγχεται από το σύστημα DP, αν και για την διαμήκη περιστροφή υπάρχει τρόπος απόσβεσης μέσω ειδικού σταθεροποιητή. Πρέπει όμως να γίνει η μέτρηση και η καταγραφή τους με ακρίβεια για να έχουμε καλύτερο προσδιορισμό του σφάλματος του συστήματος εντοπισμού θέσης. Η κατακόρυφη μετατόπιση είναι μια λιγότερο σημαντική μεταβλήτη, γιατί αν και μπορούμε να την μετρήσουμε, δεν είναι δυνατός ο έλεγχός της. Μπορεί να φανεί όμως χρήσιμη για κάποιες ειδικές εφαρμογές όπως η κατάδυση με κώδωνα.

Τα περισσότερα σύγχρονα DP συστήματα έχουν και κατευθυντήριο μοχλο (joystick) ενσωματωμένο στην κονσόλα τους για την αλλαγή από αυτόματο σε χειροκίνητο έλεγχο. Σε αυτόματη λειτουργία, όλες οι ελεγχόμενες κινήσεις βρίσκονται υπό καθεστώς αυτόματης διόρθωσης. Σε χειροκίνητη λειτουργία, οι γραμμικές μετατοπίσεις του πλοίου (surge,sway) υπακούουν στην διεύθυνση του μοχλού, ενώ η περιστροφική του (yaw) υπακούει σε ένα περιστρεφόμενο πλήκτρο που βρίσκεται στην κορυφή του μοχλού. Ο χειριστής μπορεί να επιλέξει συνδυασμούς αυτόματης και χειροκίνητης λειτουργίας, όπως για παράδειγμα χειροκίνητο surge και sway και αυτόματο yaw, η οποιονδήποτε άλλο συνδυασμό αυτών των τριών.

Στην αγορά σήμερα υπάρχουν δύο τύποι DP συστημάτων, τα συστήματα με PID ελεγκτή και τα συστήματα με model-predictive ή model-based ελεγκτή. Οι ελεγκτές PID βασίζονται στον κλασικό πλέον τριπλο αναλογικό-ολοκληρωτικό-διαφορικό έλεγχο κάνοντας χρήση του μηχανισμού ανατροφοδότησης κλειστού βρόχου. Αυτή η διάταξη ονομάζεται ελεγκτής σε ένα DP σύστημα και χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία ήδη από την δεκαετία του 1970. Αρχικά, η τιμή του σφάλματος μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής τιμής υπολογίζεται σε ένα μέρος του

προγράμματος που ονομάζεται προεπεξεργαστής (preprocessor) και συνήθως βρίσκεται αμέσως μετά την ανάγνωση των ειδόδων. Στην συνέχεια, επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για τις μεταβλητές κέρδους για κάθε έναν όρο του ελεγκτή (K_p , K_i , K_d), διαμορφώνουμε το προφίλ που θα ακολουθήσει η απόσβεση του σφάλματος κατά την διάρκεια του απαιτούμενου χρόνου.

Οι ελεγκτές model predictive βασίζονται σε μαθηματικό μοντέλο ελέγχου. Καθώς οι εξωτερικές δυνάμεις επιδρούν στην άτρακτο του πλοίου, διάφορες παράμετροι μεταβάλλονται και με αυτόν τον τρόπο χτίζεται ένα μοντέλο πρόβλεψης. Ακριβώς επειδή μπορεί να προβλέψει τις συνθήκες που θα επικρατούν στο άμεσο μελλοντικό χρονικό διάστημα, ο ελεγκτής αυτός είναι σε θέση να ελέγχει το πλοίο για δεκαπέντε ολόκληρα λεπτά ακόμα και αν χαθεί εντελώς το σήμα από το σύστημα εντοπισμού θέσης. Αυτός ο τύπος ελεγκτή είναι και ο πιο διαδεδομένος στα σύγχρονα DP συστήματα. Στα συστήματα αυτής της τεχνολογίας, οι επιθυμητές τιμές θέσης και διεύθυνσης εισάγονται από τον χειριστή και στην έξοδο, παίρνουμε αυτό που είναι γνωστό ως λογική καθορισμού πρόωσης (TAL) που στην ουσία είναι ένας πίνακας με τις τιμές της ισχύως και της διεύθυνσης της πρόωσης για κάθε ένα προωθητή.

1.11.1 Το μαθηματικό μοντέλο

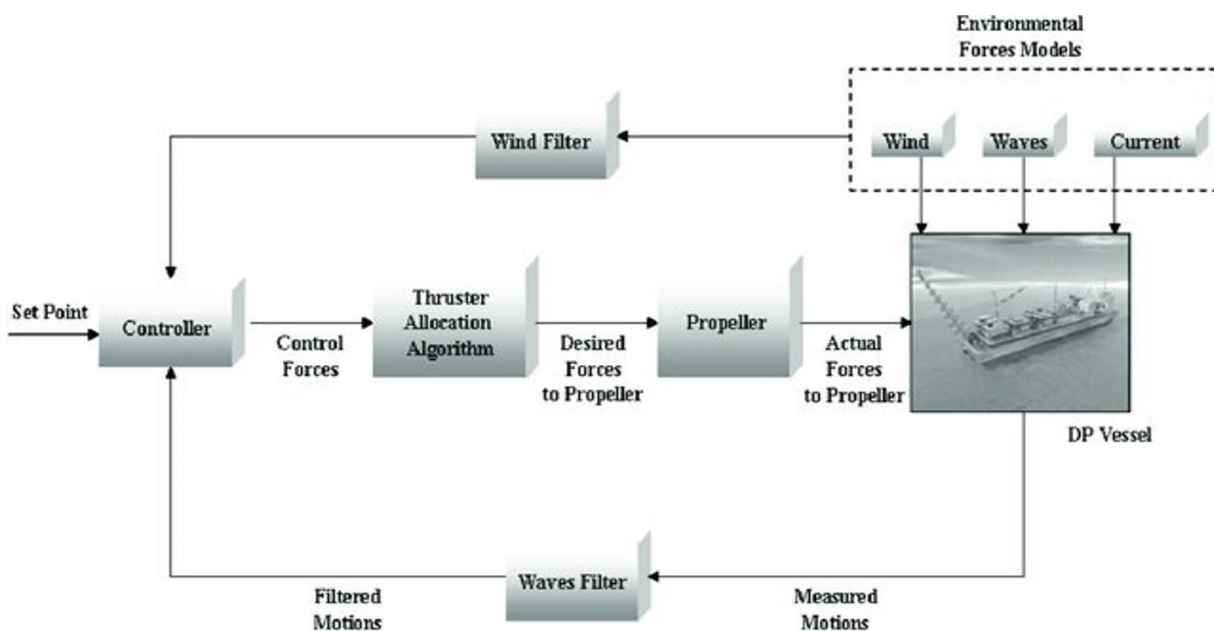
Ο αέρας, τα κύματα και το θαλάσσιο ρεύμα, σε συνδυασμό με άλλες εξωτερικές δυνάμεις που συνυπάρχουν κατά την διάρκεια της λειτουργίας DP, έχουν την τάση να εκτρέπουν το πλοίο από το επιθυμητό σημείο. Οι κινήσεις αυτές καταγράφονται από την γυροπυξίδα, το σύστημα εντοπισμού θέσης, τον αισθητήρα ανέμου και την μονάδα αναφοράς κίνησης (MRU). Το μαθηματικό μοντέλο είναι ένα εργαλείο υπολογισμού της διαφοράς μεταξύ πραγματικού και επιθυμητού σημείου που αποκαλείται σφάλμα. Το σφάλμα στην συνέχεια τροφοδοτείται στον ελεγκτή για τον υπολογισμό του TAL και αυτό εν συνεχεία τροφοδοτείται στους προωθητές οι οποίοι ωθούν το πλοίο προς την επιθυμητή θέση και διεύθυνση. Το μαθηματικό μοντέλο εμπεριέχει την αεροδυναμική και την υδροδυναμική περιγραφή του πλοίου, και με βάση αυτή, υπολογίζεται η αντίδραση του πλοίου στις εξωτερικές διαταραχές όπως φαίνεται στο σχήμα. Το μαθηματικό μοντέλο ενός DP συστήματος ορίζεται ως το η μαθηματική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο το πλοίο αντιδρά στις περιβαλλοντικές δυνάμεις που επενεργούν στην άτρακτό του. Σε αυτό παίζουν ρόλο τα φυσικά χαρακτηριστικά του πλοίου όπως το σχήμα του, η μάζα του και η οπισθέλκουσα δύναμη (drag). Κατά την δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να διασφαλιστεί με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο η ακρίβεια των δυνάμεων αντίδρασης. (S.Kumar, 2020)

Το μαθηματικό μοντέλο επηρεάζεται από τις δυνάμεις που επενεργούν στο πλοίο σε συνεχή βάση. Οι δυνάμεις του ανέμου υπολογίζονται απευθείας, ως συνάρτηση της έντασης και της διεύθυνσης που καταγράφονται από τα όργανα μέτρησης και είναι γνωστό ως διάνυσμα δύναμης. Για να καταφέρει το σύστημα DP να κρατήσει το πλοίο σε σταθερή θέση, πρέπει να δώσει εντολή στους προωθητές να παράξουν μια ίση σε ένταση αλλά αντίθετη σε διεύθυνση δύναμη. Το διάνυσμα ενεργού πρόωσης (thrust vector) ως συνάρτηση του TAL εκφράζεται σε στροφές ανά λεπτό (revolutions per minute – RPM) στους προωθητές και στις προπέλες. Μια σειρά παραμέτρων, όπως η μάζα του πλοίου, το βύθισμα, το σχήμα της καρίνας, ο τύπος και η διαταξη του συστήματος πρόωσης και άλλα, λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του μαθηματικού μοντέλου.

Κατα την ενημέρωση του μοντέλου, χρησιμοποιείται συνήθως ένα φίλτρο Kalman. Η μέθοδος αυτή παρέχει το απαραίτητο φιλτράρισμα του θορύβου στις μετρήσεις θέσης και διεύθυνσης. Ο αλγόριθμος κάνει χρήση των μετρητικών δεδομένων από τα συστήματα εντοπισμού θέσης και τους αισθητήρες σε συνδυασμό με τα δεδομένα που προέβλεψε το μοντέλο. Έτσι υπολογίζεται το σφάλμα θέσης και διεύθυνσης και εφαρμόζεται στην ενημέρωση του μοντέλου. Το μοντέλο παρέχει και την δυνατότητα “τυφλού υπολογισμού” (dead reckoning), η οποία επιτρέπει την συνέχεια των υπολογισμών ακόμη και αν για κάποιο λόγο χαθεί το σήμα των δεδομένων εισόδου για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Σε περίπτωση σοβαρής βλάβης που χαθεί εντελώς η θέση και η διεύθυνση του πλοίου από το σύστημα, το μαθηματικό μοντέλο διατηρεί τις τιμές των εξόδων στους προωθητές.

1.11.2 Ο άνεμος στο μαθηματικό μοντέλο

Ο άνεμος είναι η μόνη από τις εξωτερικές δυνάμεις που η μέτρησή της γίνεται με την χρήση αισθητήρων. Η μέτρηση του ανέμου πρέπει να γίνεται γρήγορα και με ακρίβεια, έτσι ώστε η αντίδραση από τους προωθητές να στρέφεται προς την σωστή διεύθυνση για να αντισταθεί στην εκτροπή του πλοίου. Όσο πιο γρήγορα γίνει η αντίδραση, τόσο λιγότερη ισχύς απαιτείται από τους προωθητές, και αυτό συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα καλύτερα περιθώρια κέρδους (margins) για την διατήρηση της θέσης του πλοίου. Για τον γρηγορότερη απόκριση του συστήματος στο κέλευσμα του χρόνου χρησιμοποιείται μια τεχνική που είναι γνωστή ως *προσοτροφοδότηση* (feed-forward) στον κόσμο του συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Η τεχνική αυτή τροφοδοτεί ένα μέρος των δεδομένων εισόδου του ανέμου απευθείας στον ελεγκτή για να παράξει την αντίδραση σε πραγματικό χρόνο, και το υπόλοιπο μέρος των δεδομένων οδηγείται στο μαθηματικό μοντέλο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. (Εικόνα 20)



Εικόνα 20: Μπλόκ διάγραμμα DP συστήματος με προσοτροφοδότηση των δεδομένων του ανέμου (Eduardo A. Tannuri, 2010, www.researchgate.com)

1.11.3 Ανατροφοδότηση της θέσης του πλοίου

Ο ελεγκτής DP δέχεται ως είσοδο από τον χειριστή τις τιμές των επιθυμητών σημείων θέσης και διεύθυνσης. Αυτά τα σημεία προσδιορίζονται μέσω των τιμών που εισάγονται από τον χειριστή, των φιλτραρισμένων δεδομένων του συστήματος εντοπισμού θέσης (PRS), και σε συνδιασμό με τις διαφορές μεταξύ ζητούμενης ταχύτητας και τρέχουσας ταχύτητας. Αυτή η πληροφορία προσδιορίζει και το μέγεθος της δύναμης πρόωσης που απαιτείται. Αυτή η έξοδος, στην συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τις τιμές κέρδους εκείνες, που θα παράξουν την απαιτούμενη ισχύ στον προωθητικό μηχανισμό. Η ένδειξη της τιμής αυτής της εξόδου, απεικονίζεται στην οθόνη του χειριστή του DP συστήματος. Με παρόμοιο τρόπο, η έξοδος αυτή μεταβάλλεται σε περίπτωση που το πλοίο πρέπει να ελλατώσει ταχύτητα επειδή η τρέχουσα ταχύτητα υπερβαίνει την επιθυμητή τιμή. (S.Kumar, 2020)

Αφού γίνει ο υπολογισμός του διανύσματος της ενεργού πρόωσης (thrust vector) εξετάζεται ο επηρεασμός του από κάποιους ακόμα παράγοντες. Πρώτον, το μέγεθος της ισχύος που απαιτείται για την αποκατάσταση της θέσης του πλοίου. Το μέγεθος αυτό είναι ανάλογο του σφάλματος μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής τιμής θέσης και διεύθυνσης. Δεύτερον, ο ρυθμός μεταβολής της διαφοράς μεταξύ απαιτούμενης και τρέχουσας ταχύτητας που είναι γνωστή και ως απαίτηση αποσβενύμενης ισχύος (damping thrust demand). Τρίτον, για την προσαρμογή της απαιτούμενης ισχύος, γίνεται ρύθμιση των κερδών του ελεγκτή, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η ικανότητα ανάκτησης θέσης και να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση καυσίμου. Τέλος, εάν κατά την διάρκεια του συστήματος DP σε αυτόματη λειτουργία (auto mode), το πλοίο κυνηγάει ασταμάτητα το επιθυμητό σημείο, τότε κατά πάσα πιθανότητα η τιμή του κέρδους (gain) που έχει ρυθμιστεί είναι λάθος.

1.11.4 Ανατροφοδότηση του θαλάσσιου ρεύματος

Η ιδέα της ανατροφοδότησης του θαλάσσιου ρεύματος αποτελεί ακόμη μία πρόκληση για τους κατασκευαστές συστημάτων DP. Πολλές φορές το αίτιο της μετόπισης του πλοίου από την θέση του είναι ένταση και η διεύθυνση των μη μετρούμενων δυνάμεων όπως τα κύματα και το θαλάσσιο ρεύμα. Με έναν σχετικά απλό τρόπο, όλες οι δυνάμεις αυτές προστίθενται στο σύνολο των αγνώστων δυνάμεων που επενεργούν στην άτρακτο του πλοίου και το διάνυσμα που προκύπτει ονομάζεται "DP current". Το διάνυσμα αυτό παράγεται από το μαθηματικό μοντέλο και συμμετέχει στον αλγόριθμο της λογικής καθορισμού των προωθητών.

1.11.5 Η λογική καθορισμού των προωθητών (TAL)

Μόλις ο ελεγκτής παραλάβει τα σήματα εισόδου που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα προχωρήσει στον υπολογισμό της εξόδου. Το σήμα εξόδου, γνωστό και ως λογική καθορισμού των προωθητών (TAL), χρησιμεύει στο να ενημερώνει τους προωθητές για την δύναμη και την διεύθυνση που πρέπει να δημιουργηθεί, έτσι ώστε να υπερνικηθεί το διάνυσμα του συνόλου των αντίρροπων δυνάμεων. Αυτό είναι και το σημείο στο οποίο γίνεται η χειραγώγηση των ελεγχόμενων μεταβλητών και των βαθμών ελευθερίας (surge, sway, yaw). Η λογική καθορισμού των προωθητών κατατείνει στην βέλτιστη αξιοποίηση της προωθητικής ισχύος και κατ' επέκταση και της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό έχει ως συνέπεια και την ελαχιστοποίηση της φθοράς και του κόστους συντήρησης των μηχανημάτων. (S.Kumar, 2020)

1.11.6 Το φίλτρο Kalman

Ο αλγόριθμος ελέγχου των βαθμών ελευθερίας του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο, χρησιμοποιεί ορισμένες παραμέτρους. Κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου, είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι παράμετροι του θαλάσσιου ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι αυτοί είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ρεύματος σε σχέση με την άτρακτο του πλοίου.

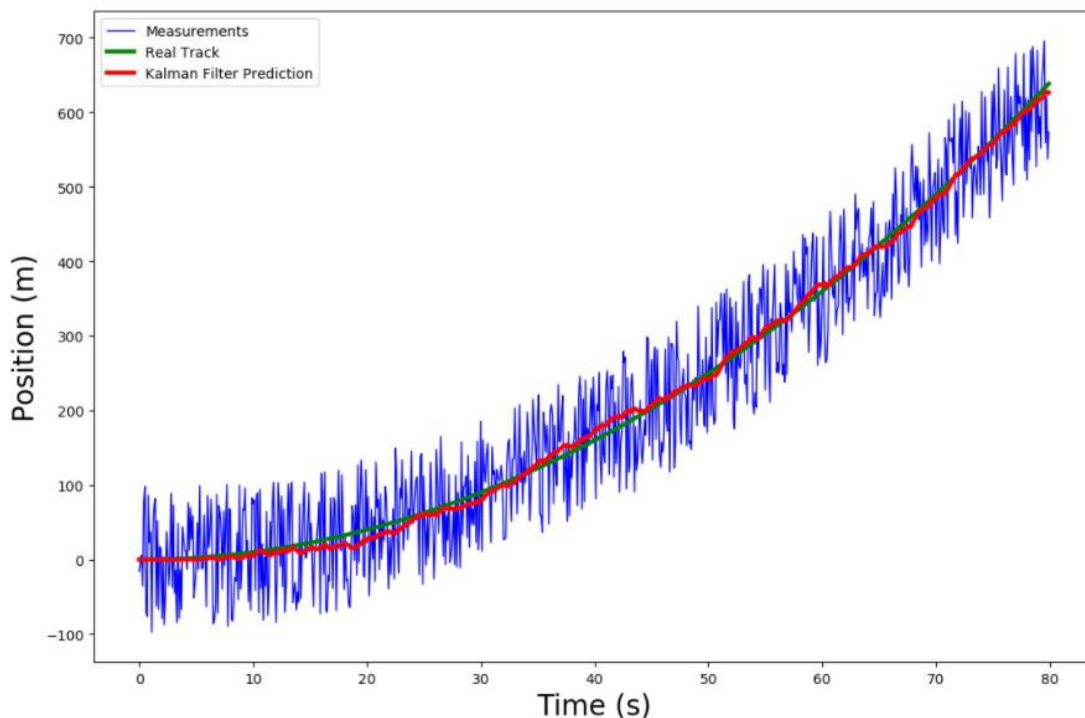
Ωστόσο, επειδή δεν είναι εύκολο να μετρηθούν αυτές οι παράμετροι, θα πρέπει ο υπολογισμός τους να γίνει μέσω κάποιου μηχανισμού πρόβλεψης. Η πρόβλεψη αυτή γίνεται βάσει του μαθηματικού μοντέλου για το οποίο έγινε λόγος νωρίτερα. Οι διαταραχές που προκαλούν τα κύματα, αποτελούν ακόμα έναν παράγοντα ο οποίος δεν μπορεί να μετρηθεί, πρέπει όμως να προβλεφθεί. Η κυματική διαταραχή συνυπολογίζεται μέσω ειδικών φίλτρων.

Παρά τον λεπτομερή σχεδιασμό του, το μαθηματικό μοντέλο δεν είναι τέλειο. Χάριν ακριβείας, γίνεται συνυπολογισμός των δεδομένων που παράγονται από το μαθηματικό μοντέλο με τα δεδομένα που φτάνουν από της μετρήσεις των αισθητήρων και όλα μαζί οδηγούνται προς επεξεργασία από τον αλγόριθμο του φίλτρου Kalman.

Εκείνο που κάνει το φίλτρο, είναι να χρησιμοποιεί το μαθηματικό μοντέλο για να κάνει υπολογισμούς πάνω στις μετρήσεις. Τα ακατέργαστα δεδομένα (raw data) για τον εντοπισμό της θέσης του πλοίου έρχονται από διάφορα συστήματα εντοπισμού θέσης (PRSS). Αυτά στην συνέχεια περνάνε μέσα από φίλτρα τα οποία ορίζουν τον βαθμό συμμετοχής στο τελικό σήμα εξόδου ή αλλιώς το ειδικό τους βάρος (weight), ανάλογα με τα επίπεδα θορύβου που εμπεριέχουν. Το φίλτρο Kalman βοηθάει στην πρόβλεψη των παραμέτρων που σχετίζονται με την κινητική κατάσταση του πλοίου και αν για κάποιο λόγο χαθεί η ροή δεδομένων από τους αισθητήρες, το σύστημα δύναται να προβέψει τις επικρατούσες συνθήκες για το άμεσο μελλοντικό χρονικό διάστημα.

Πλεονέκτημα του φίλτρου αυτού είναι ότι συναθροίζει δεδομένα από πολλές πηγές για τον εντοπισμό θέσης και έτσι η έξοδος έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια. Επίσης, μπορεί να αναγνωρίζει και να εξαιρεί τιμές δεδομένων που έχουν μεγάλη απόκλιση από τις προηγούμενες διότι προφανώς πρόκειται για λάθος τιμές που προκαλούνται λόγω θορύβου. Και τέλος, παρέχει στο σύστημα την δυνατότητα ελέγχου του πλοίου για μικρο χρονικό διάστημα σε περίπτωση απώλειας των σημάτων εισόδου.

Example of Kalman filter for tracking a moving object in 1-D

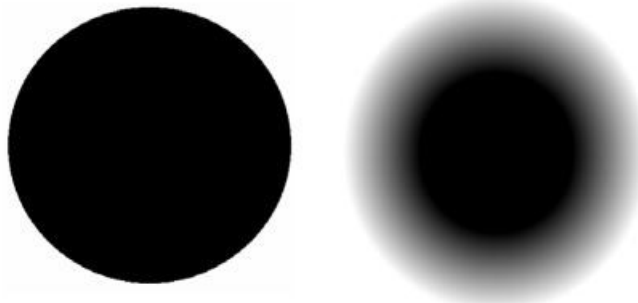


Εικόνα 21: Παράδειγμα φιλτραρίσματος των ακατέργαστων μπλε δεδομένων με την χρήση ψηφιακού φίλτρου Kalman. Η έξοδος του φίλτρου παριστάνεται με κόκκινο χρώμα. (Rahmad Sadli, 2020, www.machinelearningpace.com)

2 ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ

2.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική

“Όσο η πολυπλοκότητα αυξάνεται, οι ακριβείς δηλώσεις χάνουν το νόημά τους και οι γεμάτες νόημα δηλώσεις χάνουν την ακρίβειά τους”— Lotfi A. Zadeh



Εικόνα 22: Γραφική απεικόνιση ενός κλασσικού (διακριτού) συνόλου και ενός ασαφούς συνόλου. (F. Dernoicourt, 2013)

Η ασαφής λογική είναι μία προέκταση της άλγεβρας Bool από τον Lotfi Zadeh και βασίζεται στην μαθηματική θεωρία των ασαφών συνόλων, η οποία είναι γενίκευση της κλασσικής θεωρίας συνόλων. Με την εισαγωγή της ιδέας της κλιμάκωσης της βεβαιότητας μιας κατάστασης, στην ουσία καθιστούμε την κατάσταση ικανή να βρίσκεται σε θέσεις άλλες πέρα από την αληθή και της ψευδή. Αυτή η ευελίξια της ασαφούς λογικής όσον αφορά την αιτιοκρατικότητα (reasoning), της επιτρέπει να διαχειρίζεται ανακρίβειες και αβεβαιότητες. Ένα πλεονέκτημα της ασαφούς λογικής που αποσκοπεί στην μίμηση της ανθρώπινης αιτιοκρατικότητας είναι το ότι οι κανόνες του τρόπου λήψης αποφάσεων εισάγονται σε φυσική γλώσσα. Για παράδειγμα, πιο κάτω υπάρχει ένας πίνακας με κανόνες τους οποίους ακολουθεί ένας οδηγός έτσι ώστε να μην χάσει το δίπλωμα οδήγησής του. Όπως φαίνεται στο παράδειγμα, οι μεταβλητές εισόδου υπολογίζονται από τον ανθρώπινο νου προσεγγιστικά, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που συμβαίνει και με την κλιμάκωση βεβαιότητας στην ασαφή λογική. (Zadeh L. 1965)

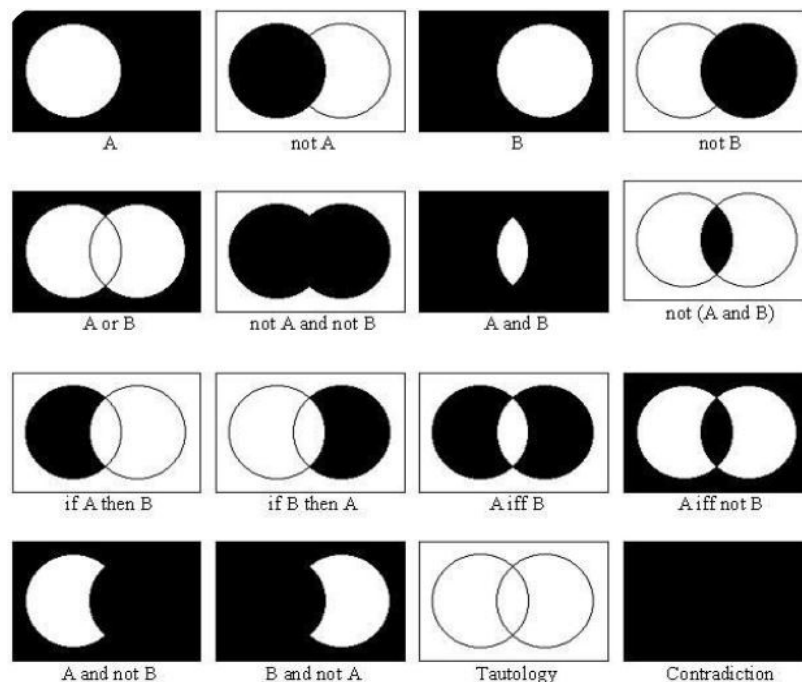
Είσοδος 1	Είσοδος 2	Είσοδος 3	Έξοδος
Αν το φανάρι είναι κόκκινο...	...αν η ταχύτητά μου είναι μεγάλη...	...και αν το φανάρι είναι κοντά...	...τότε φρενάρω απότομα.
Αν το φανάρι είναι κόκκινο...	...αν η ταχύτητά μου είναι μικρή...	...και αν το φανάρι είναι μακριά...	...τότε διατηρώ την ταχύτητά μου.
Αν το φανάρι είναι πορτοκαλι...	...αν η ταχύτητά μου είναι μεσαία...	...και αν το φανάρι είναι μακριά...	...τότε φρενάρω μαλακά.
Αν το φανάρι είναι πράσινο...	...αν η ταχύτητά μου είναι μικρή...	...και αν το φανάρι είναι κοντά...	...τότε επιταχύνω.

2.2 Κλασσική θεωρία συνόλων και ασαφή σύνολα

“Σύνολο είναι ένα πλήθος που επιτρέπει στον εαυτό του να αυτοπροσδιορίζεται σαν μονάδα.”
-Georg Cantor.

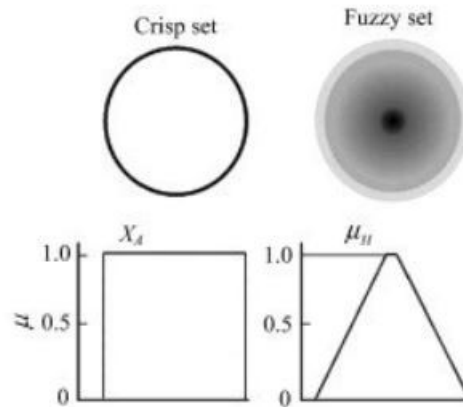
Η κλασσική θεωρία συνόλων είναι εκείνο το τμήμα των μαθηματικών επιστημών που μελετά τα σύνολα. Για παράδειγμα, τα 7, 8, 1, 9 είναι ένα σύνολο ακεραίων αριθμών, ενώ τα φ, ξ, ε, λ, ζ, δ είναι ένα σύνολο αλφαβητικών χαρακτήρων. Με την ίδια λογική τα 7, 8, 1, 9, φ, ξ, ε, λ, ζ, δ είναι ένα σύνολο αλφαριθμητικών χαρακτήρων και τα “γοργόνα”, “αστερίας”, “δελφίνι”, “κρύσταλλο” είναι ένα σύνολο λέξεων. Τα σύνολα συνήθως σηματοδοτούνται από ένα κεφαλαίο γράμμα του αλφαβήτου και το περιεχόμενό τους ακολουθεί μετά την ισότητα (όπως π.χ. $A = [8, 3, 5, 7]$). Όταν ένα σύνολο δεν περιέχει κανένα στοιχείο τότε σηματοδοτείται με \emptyset , κάτι που εκ πρώτης όψεως μοιάζει ανούσιο, όμως στην πράξη είναι πολύ χρήσιμο. Η απεικόνιση των συνόλων γίνεται με τρόπο σχηματικό και συνήθως είναι ένας κύκλος που μέσα περιέχει τα στοιχεία. (Dernoncourt, 2013)

Η ιδέα της συμμετοχής είναι πολύ σημαντική για την θεωρία συνόλων και καθορίζει το εάν ένα στοιχείο αποτελεί μέρος του συνόλου ή όχι. Για παράδειγμα, ο ακέραιος αριθμός 7 ανήκει στο σύνολο 4, 7, 10, ενώ αντίθετα ο ακέραιος αριθμός 5 δεν ανήκει στο σύνολο 4, 7, 10. Η συμμετοχή ή μη ενός στοιχείου σε ένα σύνολο σηματοδοτείται από τα παρακάτω σύμβολα. Η συνάρτηση συμμετοχής είναι μια συνάρτηση η οποία αποδίδει συμμετοχή η όχι σε ένα σύνολο. Η ιδέα της συμμετοχής είναι καθοριστική για την θεμελίωση της ασαφούς λογικής, ακριβώς επειδή βασίζεται στην ασαφή συμμετοχή ενός στοιχείου σε ένα σύνολο. Αυτό σημαίνει ότι στην ασαφή λογική μπορεί ένα στοιχείο να συμμετέχει με συντελεστή 0.7 σε ένα σύνολο σε αντίθεση με τα κλασσικά σύνολα που είτε συμμετέχει εξολοκλήρου (1), είτε δεν συμμετέχει καθόλου (0).



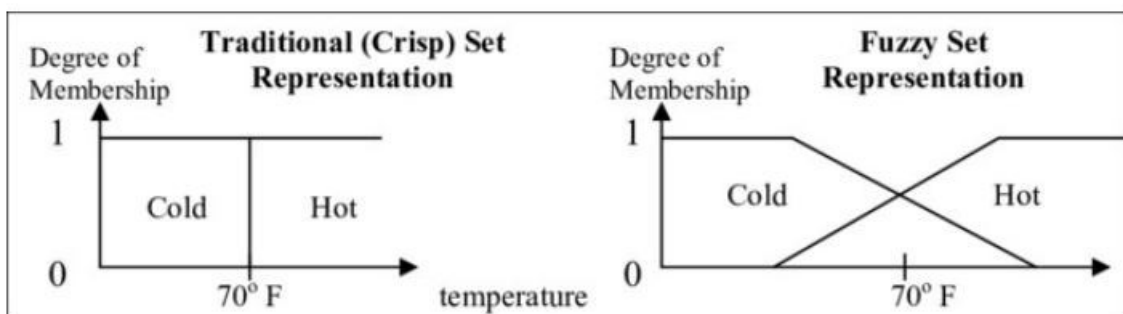
Εικόνα 23: Έννοιες και τελεστές τις θεωρίας των κλασσικών συνόλων

Η ασαφής λογική βασίζεται στην θεωρία των ασαφών συνόλων, τα οποία αποτελούν γενίκευση της κλασσικής θεωρίας συνόλων, κάτι που σημαίνει ότι τα κλασσικά σύνολα είναι ένα υποσύνολο των ασαφών συνόλων (Zadeh, 1965). Τα κλασσικά σύνολα αποκαλούνται και “διακριτά” σύνολα, και σε αυτό το πεδίο ορίζεται και η άλγεβρα Bool, η οποία έχει δύο καταστάσεις βεβαιότητας, τις τιμές 0 και 1.



Εικόνα 24: Βαθμοί βεβαιότητας διακριτού και ασαφούς συνόλου. (Quora)

Παίρνοντας ως παράδειγμα το πρόβλημα του υπολογισμού του φιλοδωρήματος που θα δίναμε σε έναν σερβιτόρο, θα ορίσουμε συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε μεταβλητή που συνυπολογίζεται στην διαδικασία αυτή της επιβράβευσης. Έτσι, θα καταλήγαμε με τρεις συνολικά μεταβλητές, την ποιότητα των υπηρεσιών (χαμηλή, μεσαία, υψηλή), την ποιότητα του φαγητού (καλή, κακή), και το ποσό της ανταμοιβής (μικρό, μεσαίο, μεγάλο). Το σχήμα της συνάρτησης συμμετοχής επιλέγεται αυθαίρετα ακολουθώντας τους κανόνες στατιστικής για την ανάλυση των κριτικών που άφησαν οι πελάτες. Οι συνηθέστεροι τύποι σχημάτων είναι η σιγμοειδής (sigmoid), η υπερβολή (hyperbolic), η εφαπτομενική (tangent), η εκθετική (exponential), το κωδωνόσχημο (Gauss) αλλά μπορεί να είναι τριγωνικά, τραπέζια και οποιοσδήποτε συνδυασμός όλων των παραπάνω.



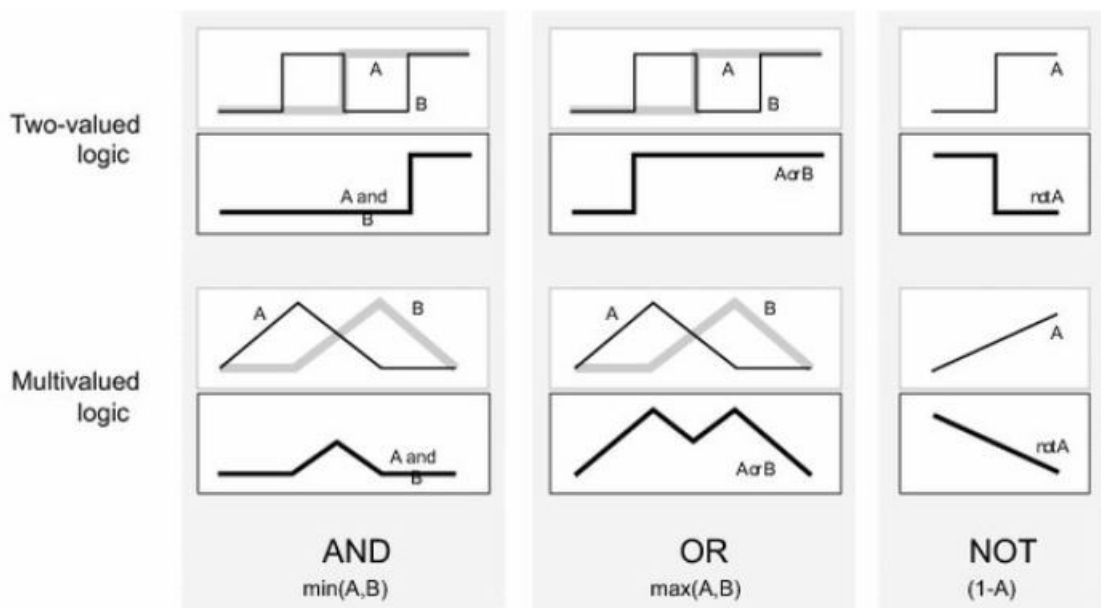
Εικόνα 25: Παράδειγμα συναρτήσεων συμμετοχής κλασσικού (διακριτού) και ασαφούς συνόλου. (Vincent William Porto, www.researchgate.com)

2.3 Γλωσσικές μεταβλητές και ασαφείς τελεστές

Η ιδέα της συνάρτησης συμμετοχής μας επιτρέπει να ορίσουμε τα ασαφή σύνολα σε φυσική γλώσσα. Κατά τον ορισμό των συνόλων των μεταβλητών προσπαθούμε να μην τα υπερπροσδιορίσουμε, αλλά αντιθέτως να τα απλουστεύσουμε, όπως θα κάναμε και στον πραγματικό κόσμο. Έχοντας κατά νου αυτόν τον γενικό κανόνα, θα γίνει απλή και εύκολη η διαδικασία ορισμού των κανόνων που ακολουθεί. Εξάλλου, η βασική ιδέα πίσω από την επινόηση των ασαφών συνόλων είναι η απλή και εύκολη υλοποίησή τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι μεταβλητές που συμμετέχουν στην συνάρτηση μεταφοράς με λογικά ανάλογο τρόπο αποτελούνται από δύο ή τρία σύνολα, και μόνο εάν υπάρχουν μεταβλητές που θεωρούνται κρίσιμης σημασίας ή συμμετέχουν στην συνάρτηση μεταφοράς με ανόμοιο ή δυσανάλογο τρόπο αποτελούνται από περισσότερα σύνολα χάριν μεγαλύτερης αξιοπιστίας. (Dernoncourt, 2013)

Προκειμένου να γίνει εύκολος ο χειρισμός των ασαφών συνόλων, θα πρέπει να επαναπροσδιοριστούν οι τελεστές των κλασικών συνόλων έτσι ώστε να ταιριάζουν στις ειδικές συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς λογικής για τιμές ανάμεσα από το 0 και το 1. Σε αντίθεση με τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των κλασικών συνόλων οι οποίες είναι πάντοτε σταθερές, στα ασαφή σύνολα γίνεται επιλογή του προσδιορισμού των ιδιοτήτων τους. Οι συνηθέστεροι τελεστές στα ασαφή σύνολα είναι ο συμπληρωματικός (NOT), η τομή (AND) και η ένωση (OR).

Οι ιδιότητες της αντιμετάθεσης, της διασποράς και της συσχέτισης που ισχύουν στα κλασικά σύνολα, ισχύουν και στα ασαφή, αλλά υπάρχουν και δύο σημαντικές εξαιρέσεις. Αφενός, ο κανόνας του αποκλειστικού μέσου είναι αντιφατικός στα ασαφή σύνολα καθώς όταν έχουμε την ένωση ενός συνόλου A με το συμπληρωματικό του να είναι διάφορη του X, τότε η συνάρτηση συμμετοχής της ένωσης είναι διάφορη του 1. Αφετέρου, στην ασαφή λογική, ένα στοιχείο δύναται να ανήκει στο σύνολο A και στο συμπληρωματικό του ταυτόχρονα.



Εικόνα 26: Σύγκριση διακριτών και ασαφών τελεστών. (Rogaia M Mhemed, 2015)

2.4 Αιτιοκρατικότητα στην ασαφή λογική

Στην κλασσική λογική (Zadeh 1965), ισχύει η παραδοχή “Αν α τότε β , και αν α αληθές τότε β αληθές”. Στην ασαφή λογική, εισάγεται η έννοια της ασαφούς αιτιοκρατικότητας (fuzzy reasoning) ή αλλιώς προσεγγιστικής αιτιοκρατικότητας (approximate reasoning), η οποία βασίζεται στους κανόνες ασάφειας που εισάγονται με την χρήση φυσικής γλώσσας. Ένα παράδειγμα κανόνα ασάφειας έχει συνήθως την ακόλουθη μορφή:

**“Εάν το στοιχείο x ανήκει στο σύνολο A
και το στοιχείο y στο σύνολο B ,**

τότε το στοιχείο z ανήκει στο σύνολο Γ .”

Κατά όμοιο τρόπο, αναφερόμενοι στο παράδειγμα υπολογισμού του φιλοδώρηματος που αναφέρθηκε προηγουμένως έχουμε:

**“Εάν η ποιότητα υπηρεσιών ήταν υψηλή
και η ποιότητα φαγητού ήταν καλή,**

τότε το φιλοδώρημα θα είναι μεγάλο”

Η μεταβλητή εξόδου “φιλοδώρημα” συμμετέχει στο ασαφές σύνολο “μεγάλο” σε βαθμό ανάλογο με την βεβαιότητα των ανωτέρω συνθηκών, όπως για παράδειγμα, ο βαθμός συμμετοχής της μεταβλητής “ποιότητα φαγητού” στο ασαφές σύνολο “καλή”. Η βασική ιδέα είναι, ότι όσες περισσότερες συνθήκες εξεταστούν, τόσο καλύτερη θα είναι και η εξαγωγή του συμπεράσματος της εξόδου. Οι δύο επικρατέστερες μέθοδοι συμπερασμού βάσει των κανόνων ασάφειας, είναι ο τρόπος Mamdani και ο τρόπος Takagi-Sugeno και περιγράφονται στην συνέχεια. Το σύνολο των κανόνων ενός ασαφούς συστήματος προσδιορίζεται και έχει την μορφή ενός πίνακα σαν αυτόν που απεικονίζεται στην συνέχεια και δείχνει την σχέση της εξόδου ενός ανεμιστήρα με τις εισόδους υγρασία και θερμοκρασία σε ένα δωμάτιο. (Εικόνα 27)

Humidity	Dry	Moderate	Fast	Fast
	Normal	Slow	Moderate	Fast
	Wet	Slow	Slow	Moderate
		Cold	Medium	Hot
		Temperature		

Εικόνα 27: Παράδειγμα πίνακα κανόνων ασάφειας (fuzzy rule matrix).

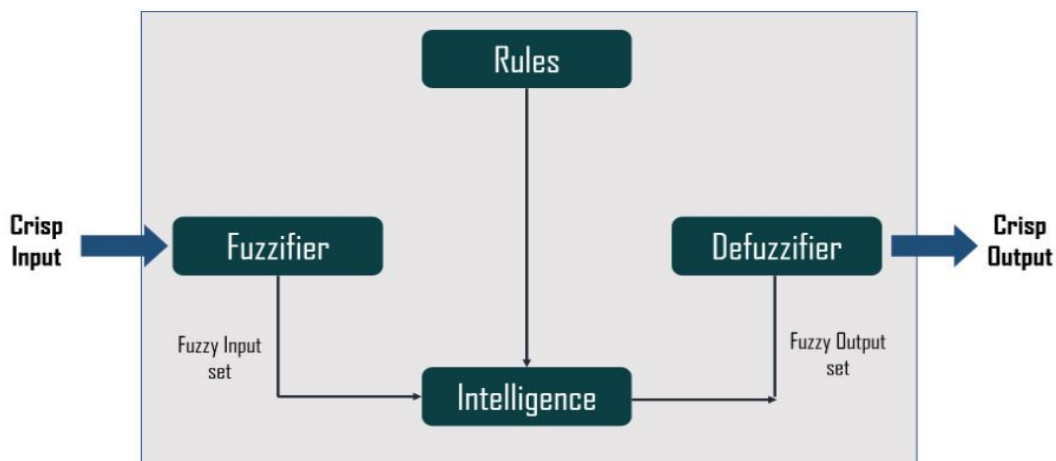
2.5 Αποασαφοποίηση

Η διαδικασία της αποασαφοποίησης μετατρέπει τις ασαφείς τιμές ελέγχου σε διακριτές, αντιστοιχίζοντας ένα σημείο του συνόλου με το ασαφές σύνολο στο οποίο ανήκει. Υπάρχουν πολλές τεχνικές αποασαφοποίησης, με τις επικρατέστερες να είναι το κέντρο περιοχής (center of area - CoA) και το κέντρο βάρους (center of gravity - CoG). Άλλες τεχνικές είναι η μέθοδος των πρώτων μεγίστων τιμών (first of maxima - FoM) και της μέσης τιμής των μεγίστων τιμών (mean of maxima - MoM). Υπάρχουν διάφορα συμπερασματικά μοντέλα τα οποία κάνουν χρήση ασαφών συνόλων για τον υπολογισμό των εξόδων σε συστήματα δεδομένων εισόδων. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος υλοποιήθηκε από τον καθηγητή Abe Mamdani σε μια προσπάθεια να χρησιμοποιήσει ασαφή σύνολα για τον έλεγχο μιας ατμομηχανής. Ακόμη ένα επιτυχημένο μοντέλο προτάθηκε από τους καθηγητές Tomohiro Takagi και Michio Sugeno. (Dernoncourt, 2013)

Στην μέθοδο συμπερασμού Mamdani, τα ορίσματα και η έξοδος ενός κανόνα ασάφειας είναι ασαφή σύνολα. Ο συμπερασμός αυτός βασίζεται στον κανόνα *Modus Ponens*, ο οποίος ορίζει ότι ο βαθμός αληθείας του αποτελέσματος ενός ασαφούς κανόνα ισούται με τον βαθμό αληθείας των ορισμάτων του. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο ένα όρισμα στην είσοδο, οι βαθμοί συμμετοχής ενώνονται χρησιμοποιώντας έναν τελεστή *min t-norm* (ή αλλιώς Gödel t-norm), ενώ στην περίπτωση που έχουμε πολλούς κανόνες, η έξοδός τους συναθροίζεται χρησιμοποιώντας έναν τελεστή *max s-norm*. Η αποασαφοποίηση είναι απαραίτητη έτσι ώστε η έξοδος του συστήματος να μπορεί να εκφραστεί ως διακριτή τιμή. Στην μέθοδο συμπερασμού Takagi-Sugeno το αποτέλεσμα είναι συναρτήσεις οι οποίες αντιστοιχίζουν διακριτές τιμές στην διακριτή έξοδο του κανόνα. Με αυτόν τον τρόπο, οι ασαφείς κανόνες είναι της μορφής:

$$\text{AN } x \text{ EINAI } X \text{ KAI } y \text{ EINAI } Y \text{ TOTE } z=f(x,y)$$

όπου η f συνήθως είναι μια γραμμική συνάρτηση. Σε αντίθεση, στον συμπερασμό Mamdani, οι κανόνες δεν συναθροίζονται βάσει ενός τελεστή *max*, αλλά με τον υπολογισμό μιας βαρυκεντρισμένης μέσης τιμής, όπου η βαρύτητα ενός κανόνα ισούται με τον βαθμό συμμετοχής του ορίσμάτος του. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ολόκληρη η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω. (Εικόνα 28)

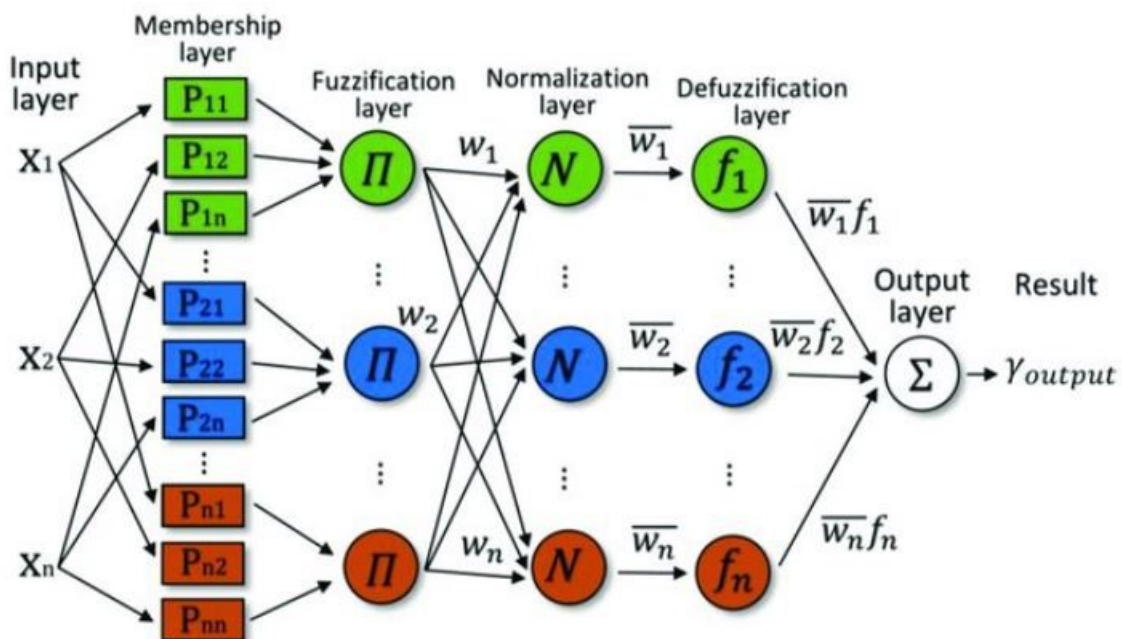


Εικόνα 28: Γραφική απεικόνιση της πλήρους διαδικασίας που ακολουθείται κατά την επίλυση ασαφών προβλημάτων. (www.edureka.com)

2.6 Νευρο-ασαφή συστήματα

Τα προσαρμοστικά νευρο-ασαφή συστήματα συμπερασμού (adaptive network-based fuzzy inference systems – ANFIS) (Jangi, 1992) πρωτοεμφανίστηκαν το 1992. Χρησιμοποιούν τον φορμαλισμό των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (artificial neural networks - ANN) και μπορούν να εκφράζουν την δομή ενός ασαφούς συστήματος με την μορφή ενός πολυεπίπεδου δικτύου που λέγεται Αντίληπτρο ή Perceptron. Το επίπεδο εισόδου τροφοδοτείται με ένα διανυσματικό δίκτυο και αφού περάσει μέσα από το ενδιάμεσο “κρυφό” επίπεδο, επιστρέφει ένα διάνυσμα στο επίπεδο εξόδου. Ανάμεσα από το επίπεδο εισόδου και το επίπεδο εξόδου, τα στοιχεία του διανύσματος εισόδου “ζυγίζονται” από τα βάρη των συνδέσμων (weights) και αναμιγνύονται στους κρυφούς νευρώνες του κρυφού επιπέδου. (Εικόνα 29)

Υπάρχουν πολλοί τύποι συναρτήσεων ενεργοποίησης για το επίπεδο εξόδου, μεταξύ των οποίων οι πιο δημοφιλείς είναι η γραμμική, η λογιστική και η softmax που αποτελεί γενίκευση της λογιστικής συνάρτησης για την περίπτωση πολλαπλών εισόδων. Υπάρχουν επίσης και διάφοροι αλγόριθμοι για την διόρθωση του σφάλματος των βαρών (error back-propagation algorithms) που τροφοδοτούνται αντίθετα από την φορά του σήματος στα επίπεδα. Η διαδικασία αυτή βελτιστοποιεί τις τιμές των βαρών κάνοντας τις απαραίτητες διορθώσεις με βάση τα λάθη που εντοπίζονται ανάμεσα στις τιμές που υπολογίστηκαν από το δίκτυο και στις πραγματικές. Μερικοί τέτοιοι αλγόριθμοι είναι οι Quasi-Newton, Conjugate Gradient, Scaled Conjugate Gradient και άλλοι.



Εικόνα 29: Η δομή του νευρο-ασαφούς συστήματος συμπερασμού ANFIS (Stefano Frizzo Stefenon, 2020)

2.7 Η αρχιτεκτονική ANFIS και ο αλγόριθμος μάθησης back-propagation

Η αρχιτεκτονική ANFIS, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 30), αποτελείται από 5 επίπεδα, το επίπεδο ασαφοποίησης, το επίπεδο συμπερασμού, το επίπεδο κανονικοποίησης, το επίπεδο συμμετοχής και το επίπεδο συνολικής εξόδου και αποασαφοποίησης. (Jangi, 1992)

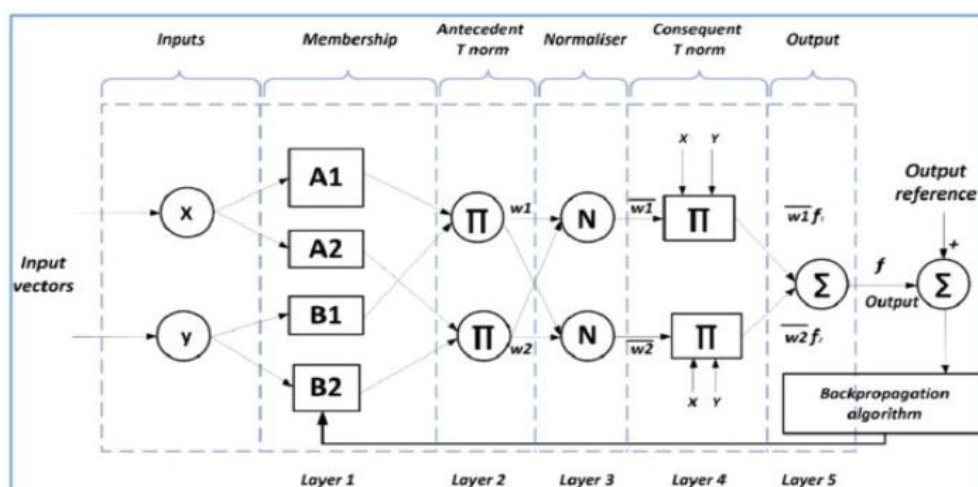
Επίπεδο Ασαφοποίησης: Στο επίπεδο αυτό γίνεται η μετατροπή της αριθμητικής εισόδου της μετρούμενης μεταβλητής σε γλωσσική μεταβλητή σύμφωνα με την επιλεγμένη συνάρτηση συμμετοχής. Στην έξοδο του κάθε κόμβου παράγεται μια τιμή ίση με τον βαθμό συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου στο ασαφές σύνολο που σχετίζεται με τον νευρώνα.

Επίπεδο Συμπερασμού: Σε αυτό το επίπεδο, καθορίζονται οι κανόνες και οι τιμές που εισέρχονται εξετάζονται παράλληλα. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει έναν κανόνα και η έξοδος του κάθε κόμβου είναι το γινόμενο του βαθμού συσχέτισης του κανόνα. Η έξοδος αυτή ονομάζεται και δύναμη πυροδότησης του κανόνα ή βάρος (weight).

Επίπεδο Κανονικοποίησης: Στο επίπεδο αυτό κάθε κόμβος σχετίζεται με έναν κανόνα του προηγούμενου επιπέδου και κανονικοποιεί την δύναμη πυροδότησής του. Λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος των κανόνων που συμμετέχουν στο σύστημα, υπολογίζεται το ειδικό βάρος κάθε κανόνα.

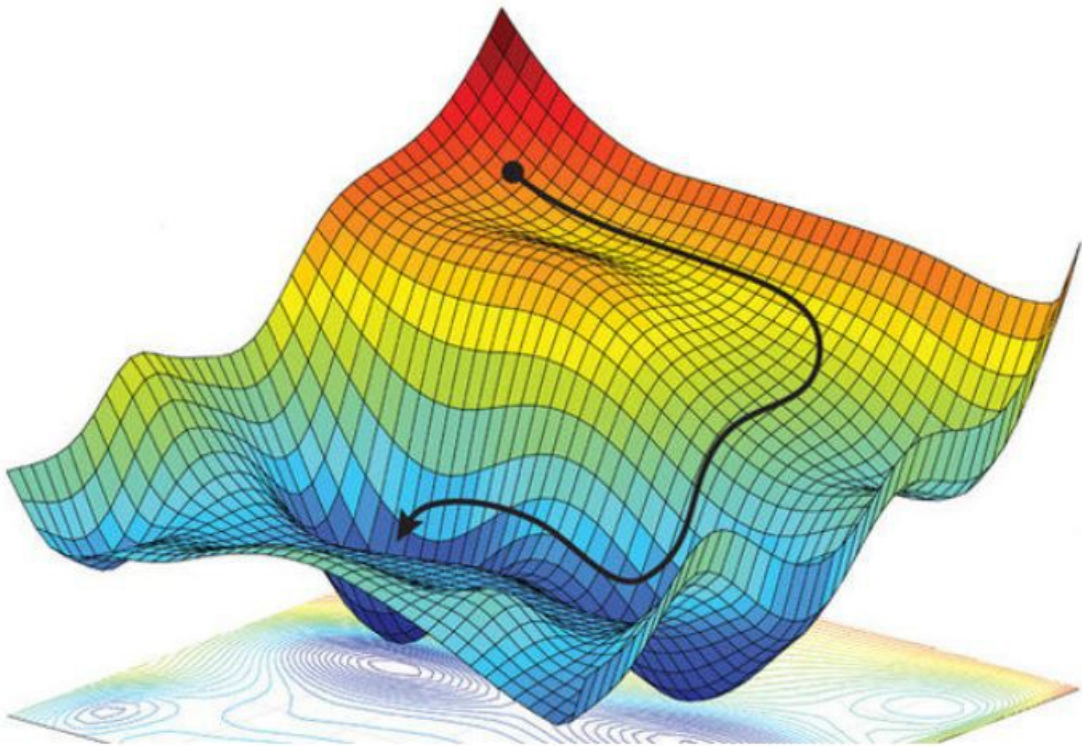
Επίπεδο Συμμετοχής: Σε αυτό το επίπεδο, κάθε κόμβος περιέχει μια συνάρτηση συμμετοχής η οποία υποδεικνύει την συμμετοχή του κανόνα στη συνολική έξοδο. Η συνάρτηση αυτή διαρκώς επαναπροσαρμόζεται στα νέα δεδομένα και άρα είναι δυναμική. Τα προηγούμενα επίπεδα βοηθούν στον προσδιορισμό της συνάρτησης αυτής, ενώ σε αυτό το επίπεδο γίνεται η ουσιαστική της χρήση και υπολογίζονται οι σταθμισμένες συναρτήσεις συμμετοχής κάθε κανόνα.

Επίπεδο Συνολικού Αθροιστή και Αποασαφοποίησης: Στο επίπεδο αυτό υπάρχει μόνο ένας κόμβος που υπολογίζει το άθροισμα όλων των εξόδων των κανόνων. Η συνολική έξοδος του αθροιστή αποτελεί την τελική συνάρτηση, βάση της οποίας υπολογίζεται η διόρθωση του ελεγκτή.



Εικόνα 30: Τα επιμέρους επίπεδα της αρχιτεκτονικής ANFIS

Η αρχιτεκτονική ANFIS χρησιμοποιεί στις περισσότερες περιπτώσεις τον αλγόριθμο μάθησης back-propagation, ο οποίος δουλεύει σύμφωνα με τον ακόλουθο τρόπο. Ένα σύνολο από σήματα εισόδου εμφανίζεται στο επίπεδο εισόδων, και στην συνέχεια τα σήματα αυτά ακολουθούν τον δρόμο τους προς την έξοδο σύμφωνα με τα βάρη των κανόνων που έχουν οριστεί κατά την αρχικοποίηση του αλγορίθμου. Όταν τα σήματα φτάσουν στην έξοδο, ο αλγόριθμος συγκρίνει την επιθυμητή έξοδο με το σήμα που έλαβε στην είσοδο και έτσι υπολογίζει το σφάλμα για κάθε τιμή της εισόδου. Το σφάλμα αυτό στην συνέχεια μεταφέρεται αντίστροφα (δηλαδή από το τελευταίο επίπεδο του αλγορίθμου προς το πρώτο) και με βάση αυτό γίνεται η διόρθωση των βαρών. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς για κάθε νέο σύνολο εισόδων που περνάει μέσα από το σύστημα ANFIS. Η μέθοδος ελαχιστοποίησης του τελικού σφάλματος των βαρών που εφαρμόζεται από τον αλγόριθμο είναι η αποκαλούμενη “κλίση κατάβασης” (gradient descent), η οποία ουσιαστικά υπολογίζει το τοπικό ελάχιστο μιας διαφορικής συνάρτησης (Εικόνα 31).



Εικόνα 31: Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της κλίσης κατάβασης με μαύρη γραμμή. Η κλίση κατάβασης είναι η πιο ομαλή πορεία από ένα τυχαίο σημείο της συνάρτησης προς το τοπικό ελάχιστο (Alexander Amini, 2018)

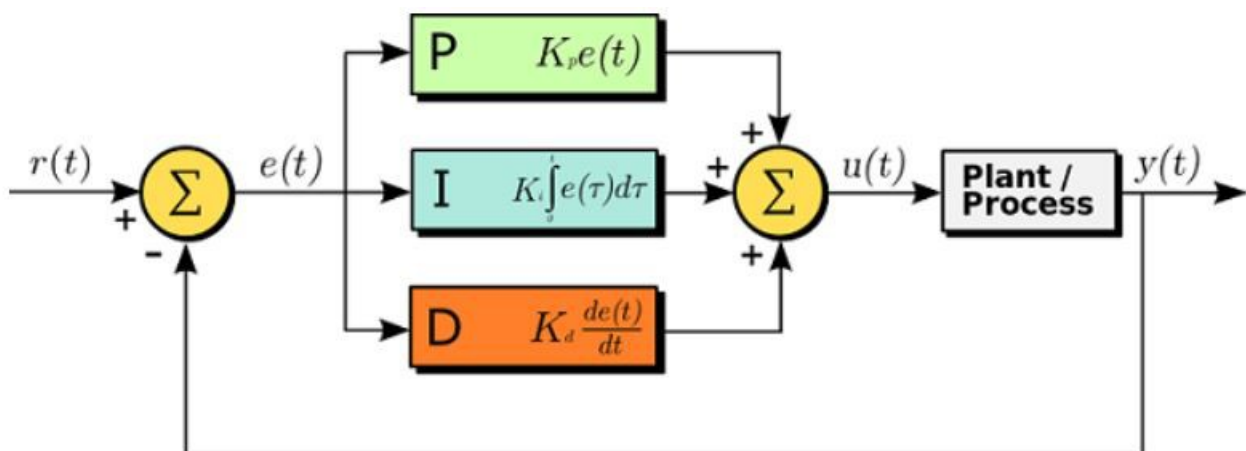
Γ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3. ΡΥΘΜΙΣΗ PID ΕΛΕΓΚΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΟ-ΑΣΑΦΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

3.1 Ο ελεγκτής PID

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής (ελεγκτής PID ή ελεγκτής τριών όρων) είναι ένας μηχανισμός ελέγχου που χρησιμοποιεί σήματα ανάδρασης και χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου και σε μια ποικιλία άλλων εφαρμογών που απαιτούν τον συνεχή έλεγχο κάποιας διεργασίας. Ένας ελεγκτής PID υπολογίζει συνεχώς μια τιμή σφάλματος $e(t)$ ως τη διαφορά μεταξύ ενός επιθυμητού σημείου ρύθμισης (set point - SP) και μιας μετρούμενης μεταβλητής της διεργασίας (process value - PV) και εφαρμόζει μια διόρθωση που βασίζεται σε αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό όρο και που συμβολίζονται με P, I και D αντίστοιχα. Η πρώτη θεωρητική ανάλυση και πρακτική εφαρμογή του PID ήταν στον τομέα των αυτόματων συστημάτων διεύθυνσης για πλοία, που αναπτύχθηκε από τις αρχές της δεκαετίας του 1920 και μετά. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για τον αυτόματο έλεγχο διεργασιών στη μεταποιητική βιομηχανία, όπου εφαρμόστηκε ευρέως αρχικά σε πνευματικούς και στη συνέχεια ηλεκτρονικούς ελεγκτές. Σήμερα η ιδέα PID χρησιμοποιείται παγκοσμίως σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή και βελτιστοποιημένο αυτόματο έλεγχο. (Åström K.J. and Hägglund T., 1995)

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του ελεγκτή PID είναι η δυνατότητα χρήσης των τριών όρων ελέγχου για την διαμόρφωση της εξόδου του και την εφαρμογή ακριβούς και βέλτιστου ελέγχου. Στο μπλοκ διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 32), απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται και εφαρμόζονται αυτοί οι όροι. Ο ελεγκτής PID, υπολογίζει συνεχώς μια τιμή σφάλματος $e(t)$ ως τη διαφορά μεταξύ ενός επιθυμητού σημείου ρύθμισης $SP = r(t)$ και μιας μετρούμενης μεταβλητής $PV = r(t) - y(t)$, και εφαρμόζει μια διόρθωση που βασίζεται σε αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό όρο. Ο ελεγκτής προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου προσαρμόζοντας μια μεταβλητή ελέγχου $u(t)$, όπως π.χ. το άνοιγμα μιας βαλβίδας ελέγχου, σε μια νέα τιμή που καθορίζεται από το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους όρων ελέγχου. Οι όροι αυτοί εξηγούνται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην συνέχεια.



Εικόνα 32: Το μπλοκ διάγραμμα του κλασσικού PID ελεγκτή ή αλλιώς ελεγκτή τριών όρων (www.wikipedia.org)

Αναλογικός Όρος (P). Ο όρος P (proportional) είναι ανάλογος με την τρέχουσα τιμή του σφάλματος $e(t)$ μεταξύ της επιθυμητής και της τρέχουσας τιμής (SP -PV). Για παράδειγμα, εάν το σφάλμα είναι μεγάλο και θετικό, η έξοδος ελέγχου θα είναι αναλογικά μεγάλη και θετική, λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα απολαβής "K" ή αλλιώς κέρδος του ελεγκτή. Η χρήση μόνο του αναλογικού όρου ελέγχου θα οδηγήσει σε σφάλμα μεταξύ του επιθυμητού σημείου και της πραγματικής τιμής διεργασίας, επειδή απαιτεί την ύπαρξη σφάλματος για την δημιουργία της αναλογικής απόκρισης. Εάν δεν υπάρχει σφάλμα, δεν υπάρχει διορθωτική απάντηση.

Ολοκληρωτικός Όρος (I). Ο όρος I (Integral) λαμβάνει υπόψη τις προηγούμενες τιμές του σφάλματος $e(t) = SP - PV$ και τις ενσωματώνει με την πάροδο του χρόνου για να παράγει τον όρο I. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει ένα υπολειπόμενο σφάλμα μετά την εφαρμογή του αναλογικού ελέγχου, ο ολοκληρωτικός όρος επιδιώκει να εξαλείψει το υπολειπόμενο σφάλμα προσθέτοντας ένα αποτέλεσμα ελέγχου λόγω της ιστορικής αθροιστικής τιμής του σφάλματος. Όταν εξαλειφθεί το σφάλμα, ο ολοκληρωτικός όρος θα πάψει να αυξάνεται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του αναλογικού αποτελέσματος καθώς μειώνεται το σφάλμα, αλλά αυτό αντισταθμίζεται από το αυξανόμενο ολοκληρωτικό αποτέλεσμα.

Διαφορικός Όρος (D). Ο όρος D (derivative) είναι η καλύτερη εκτίμηση της μελλοντικής τάσης του σφάλματος $e(t) = SP - PV$, με βάση τον τρέχοντα ρυθμό μεταβολής του. Μερικές φορές αποκαλείται «προληπτικός έλεγχος», καθώς επιδιώκει ουσιαστικά να μειώσει την επίδραση του σφάλματος ασκώντας μια επιρροή ελέγχου που δημιουργείται από τον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος. Όσο πιο γρήγορη είναι η αλλαγή, τόσο μεγαλύτερο είναι το αποτέλεσμα του αποσβεστικού ελέγχου (dumping).

3.2 Παραμετροποίηση κερδών PID ελεγκτή

Η ισορροπία αυτών των τριών όρων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, επιτυγχάνεται με την επιλογή κατάλληλων ρυθμίσεων συντονισμού βρόχου (loop tuning) για την παραγωγή της βέλτιστης λειτουργίας ελέγχου. Οι σταθερές συντονισμού (K_p , K_i , K_d) πρέπει να ορίζονται για κάθε εφαρμογή ελέγχου, καθώς εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά απόκρισης του πλήρους βρόχου εκτός του ελεγκτή. Αυτά εξαρτώνται από τη συμπεριφορά του αισθητήρα μέτρησης, το τελικό στοιχείο ελέγχου (όπως μια βαλβίδα ελέγχου), τυχόν καθυστερήσεις σήματος ελέγχου και την ίδια τη διαδικασία. Οι τιμές των σταθερών αυτών εισάγονται αρχικά προσεγγιστικά, γνωρίζοντας τον τύπο της εφαρμογής, αλλά αυτό που συνήθως συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι να επαναλαμβάνεται πειραματικά η διαδικασία έτσι ώστε να βρεθούν οι τιμές που κάνουν το σύστημα να συμπεριφέρεται καλύτερα στην πράξη. (Åström K.J. and Hägglund T., 1995)

3.3 Μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλου ANFIS

Όπως έχει αποδειχθεί σε προηγούμενη εργασία (F.A. De Oliveira, 2016), η μεθοδολογία που ακολουθείται για την μηχανική μάθηση του νεωρώνα ANFIS, περιγράφεται στην συνέχεια.

Οι ανεξάρτητοι βαθμοί ελευθερίας μας δίνουν την δυνατότητα να μελετήσουμε την διόρθωση κάθε κίνησης ξεχωριστά. Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε μόνο με την διαμήκη μετατόπιση (surge) για λόγους οικονομίας, όμως ακριβώς η ίδια διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί και για τους άλλους δύο βαθμούς ελευθερίας (sway, yaw).

Για την δημιουργία της βάσης δεδομένων εκπαίδευσης του νευρο-ασαφούς συστήματος, είναι απαραίτητη η κατασκευή μιας δομής επανάληψης η οποία θα συσσωρεύει τα δεδομένα.

Αφού κατασκευαστεί η δομή επανάληψης, γίνονται αρκετές προσομοιώσεις αλλάζοντας τα κέρδη του PID ελεγκτή και τις καιρικές συνθήκες.

Με βάση τις απαιτήσεις απόδοσης του συστήματος, επιλέγονται δεδομένα που να τις ικανοποιούν και αυτά είναι που θα αποτελέσουν την βάση δεδομένων για την εκπαίδευση του νευρο-ασαφούς συστήματος. Το μοντέλο του νευρο-ασαφούς συστήματος βασίζεται στην αρχιτεκτονική ANFIS.

Τέλος, για την επαλήθευση της αποδοτικότητας του νευρο-ασαφούς συστήματος, εκτελούνται νέες προσομοιώσεις με δεδομένα που δεν ανήκουν στην βάση δεδομένων εκπαίδευσης, για να δούμε κατά πόσο ο νευρώνας μπορεί να προβλέψει το αποτέλεσμα της εξόδου με το ελάχιστο σφάλμα.

3.4 Βρόχος εκτέλεσης μοντέλου ANFIS

Η δομή του προγράμματος που θα πρέπει συνεχώς να εκτελείται στο περιβάλλον MATLAB περιλαμβάνει τρεις πράξεις.

- Η πρώτη πράξη είναι η ανάγνωση των τιμών των εισερχόμενων μεταβλητών (ταχύτητα ανέμου, ταχύτητα θαλάσσιου ρεύματος, ύψος κύματος).
- Η δεύτερη πράξη είναι η προσπέλαση του μοντέλου ANFIS που έχουμε δημιουργήσει στο περιβάλλον Simulink, το οποίο είναι ένα εργαλείο προσωμοίωσης σε γραφικό περιβάλλον μπλοκ διαγράμματος.
- Η τρίτη και τελευταία πράξη είναι η εξαγωγή των εξόδων (K_r , K_i , K_d).

Ο βρόχος εκκίνησης του προσωμοιωτή θα έχει ως εξής:

```
load_system('modelo_tese.mdl');
try
    set_param('modelo_tese','SimulationCommand','start');
catch E
    if isa(E, 'MSLException')
        errHndls = E.handles{1}
    end
end
while strcmp(get_param('modelo_tese', 'SimulationStatus'), 'running') > 0
    pause(1)
end
```

3.5 Βρόχος δημιουργίας εκπαιδευτικής βάσης δεδομένων

Για την δημιουργία της βάσης δεδομένων ήταν απαραίτητο να αλλάζουν οι τιμές των κερδών του ελεγκτή και οι τιμές των εισερχόμενων μεταβλητών με ψευδοτυχαίο τρόπο σε κάθε επανάληψη. Οι εισερχόμενες μεταβλητές θα είναι οι εξής:

vel_vento = Ταχύτητα ανέμου (με εύρος τιμών από 0 έως 26m/s)
 U = Ταχύτητα θαλάσσιου ρεύματος (με εύρος τιμών από 0 έως 1.8 m/s)
 Hs = Ύψος κύματος (με εύρος τιμών από 0 έως 5.5 m)

Για κάθε είσοδο ενός σετ περιβαλλοντικών τιμών γίνονται 30 προσπάθειες με διαφορετικές τιμές κερδών (Kp, Ki, Kd). Το εύρος τιμών των κερδών είναι από 0 έως 10.

Η εντολή *randi* επιστρέφει ψευδοτυχαίους ακέραιους αριθμούς που προέρχονται από τη διακριτή ομοιόμορφη κατανομή.

```
%_Dimiourgia Pseudotyxaioy pinaka metavlitwn eisodou
for idg=1:300

    vel_vento=randi([0, 26]);
    U=(randi([0, vel_vento]))/10;
    if U > 1.8
        U = 1.8;
    end
    Hsaux=randi([0, fix(vel_vento/2)]);
    Hs=(randi([Hsaux, vel_vento]))/2;
    if Hs > 5.5
        Hs = 5.5;
    end

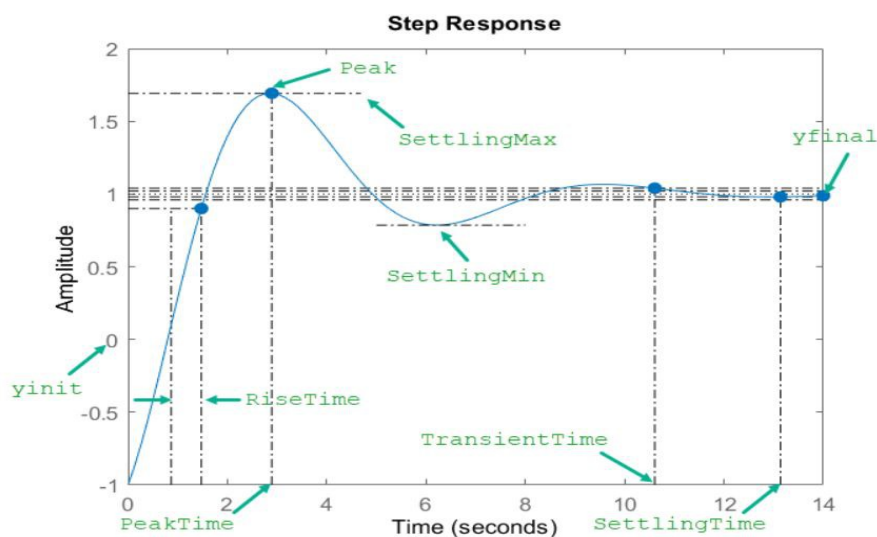
    VARU = [0; U]';
    VARV = [0; vel_vento]';
    VARH = [0; Hs]';
end
```

3.6 Αποθήκευση εκπαιδευτικής βάσης δεδομένων

Για την αποθήκευση της εκπαιδευτικής βάσης δεδομένων σε ένα λογιστικό φύλλο (spreadsheet) θα χρησιμοποιήσουμε τις ακόλουθες γραμμές κώδικα, σε συνδυασμό με την εντολή *stepinfo*.

```
XL = {idg,U,vel_vento,Hs,P_surge,I_surge,D_surge,S.Overshoot,S.RiseTime,S.SettlingTime,
S.SettlingMin, S.SettlingMax, S.Undershoot, S.Peak, S.PeakTime};
TXL = [TXL;XL];
XLref = {S2ref.Overshoot,S2ref.RiseTime,S2ref.SettlingTime, S2ref.SettlingMin,
S2ref.SettlingMax, S2ref.Undershoot, S2ref.Peak, S2ref.PeakTime};
filename = 'testdataNF.xlsx';
xlswrite(filename,XLref,1,'H1');
xlswrite(filename,TXL,1,'A2');
```

Η εντολή *stepinfo* μάς επιτρέπει να υπολογίζουμε χαρακτηριστικά βηματικής απόκρισης για ένα δυναμικό μοντέλο συστήματος ή για μια σειρά δεδομένων απόκρισης βήματος. Για μια απόκριση βήματος $y(t)$, το *stepinfo* υπολογίζει χαρακτηριστικά σχετικά με το y_{init} και το y_{final} , όπου το y_{init} είναι η αρχική μετατόπιση, δηλαδή η τιμή πριν από την εφαρμογή του βήματος και το y_{final} είναι η τιμή σταθερής κατάστασης της απόκρισης. (Εικόνα 33)



Εικόνα 33: Επεξήγηση των όρων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της βηματικής απόκρισης (*step response*) του σήματος διόρθωσης ενός PID ελεγκτή

Overshoot = Διαφορά τιμής υπερκέρρασης και επιθυμητής τιμής

RiseTime = Χρόνος έλευσης στην επιθυμητή τιμή

SettlingTime = Χρόνος αποκατάστασης

SettlingMin = Απόκλιση αποκατάστασης

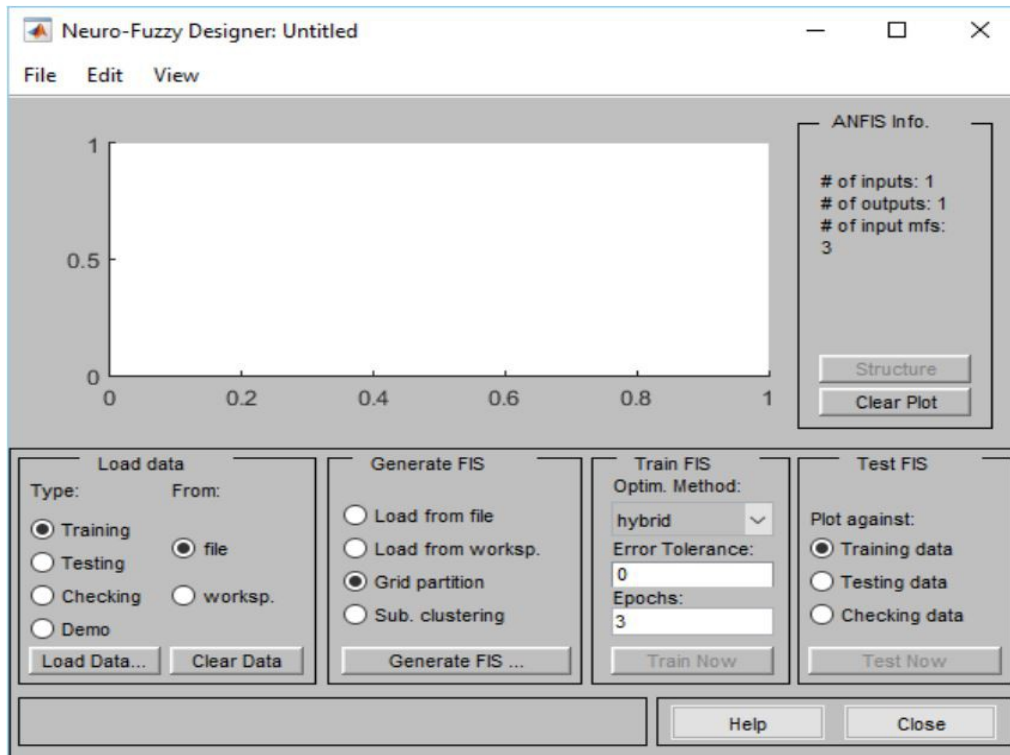
Undershoot = Διαφορά τιμής υποκέρρασης και επιθυμητής τιμής

Peak = Κορυφή υπερκέρρασης

PeakTime = Χρόνος έλευσης στην κορυφή της υπερκέρρασης

3.7 Σχεδίαση και εκπαίδευση νευρο-ασαφούς μοντέλου

Το περιβάλλον Matlab περιέχει την εφαρμογή Neuro-Fuzzy Designer η οποία επιτρέπει στον χρήστη να σχεδιάσει και να αναπτύξει το μοντέλο ANFIS που επιθυμεί (Εικόνα 34).

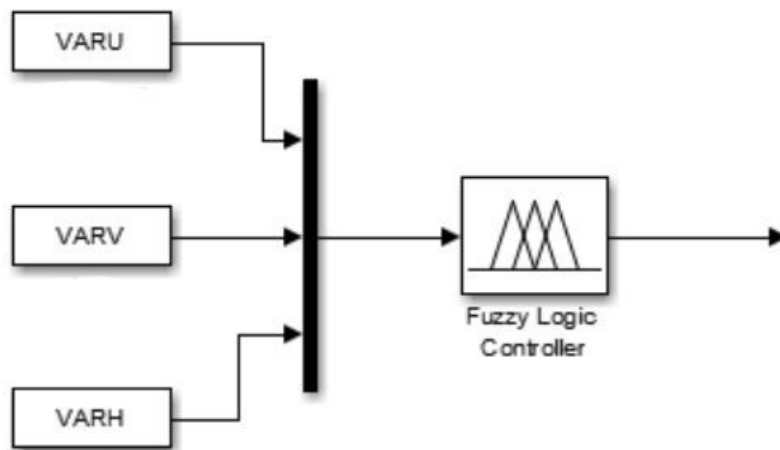


Εικόνα 34: Το γραφικό περιβάλλον σχεδιασμού νευρο-ασαφών συστημάτων του MATLAB

Συνεχίζουμε την διαδικασία φορτώνοντας την εκπαιδευτική βάση δεδομένων που παρήχθη προηγουμένως κάνοντας *Load Data* και προχωράμε στην δημιουργία του συστήματος συμπερασμού πατώντας *Generate FIS*.

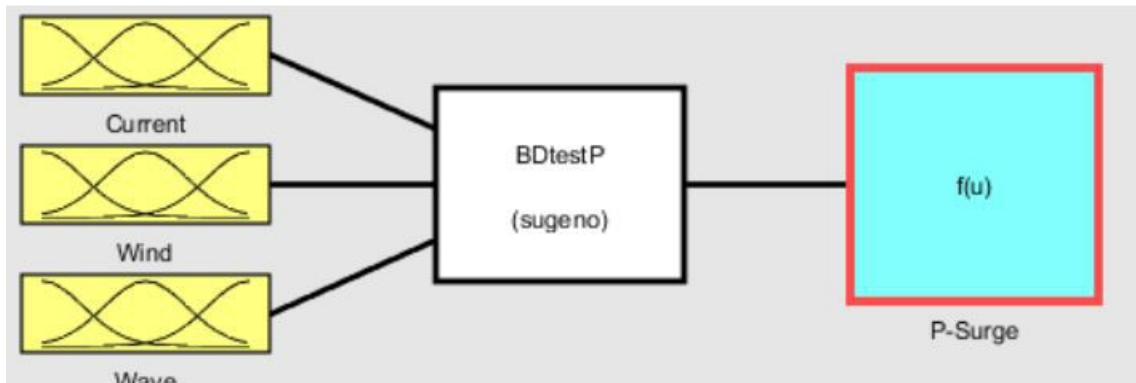
Στο σημείο αυτό επιλέγουμε αλγόριθμο μάθησης *back-propagation* και στην συνέχεια *Train Now* και αμέσως μετά *Test Now*.

Το σύστημα ANFIS έχει δημιουργηθεί. Για να το χρησιμοποιήσουμε ανοίγουμε το Simulink, εισάγουμε ένα μπλοκ διάγραμμα του τύπου *Fuzzy Logic Controller* και φορτώνουμε το μοντέλο FIS που πριν λίγο δημιουργήσαμε.



3.8 Τοπολογία ANFIS

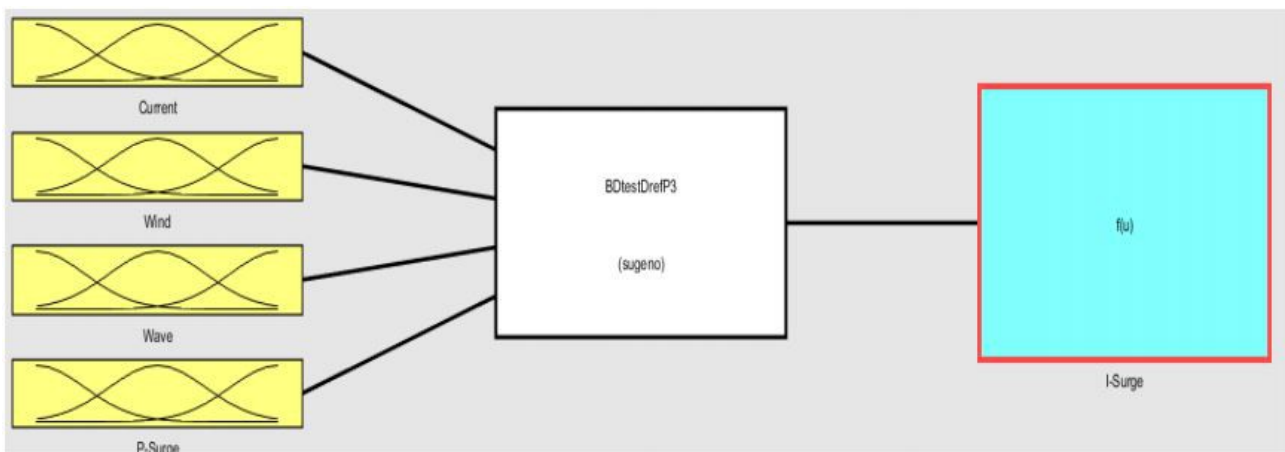
Για κάθε έναν από τους τρεις όρους του PID ελεγκτή έγινε ξεχωριστό μοντέλο ANFIS επειδή πρόκειται για σύστημα πολλαπλών εισόδων – μοναδικής εξόδου (multiple input single output - MISO), άρα καταλλήγουμε με 3 μοντέλα παρόμοια με το παρακάτω.



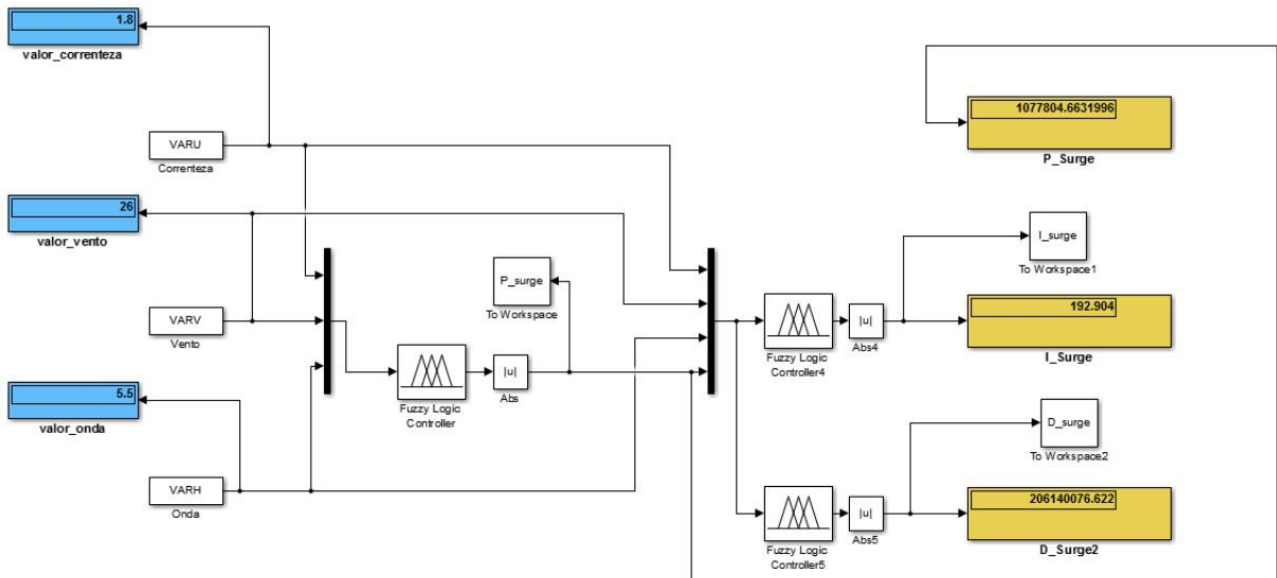
Με τον ίδιο τρόπο δημιουργούμε 3 μοντέλα, έναν για κάθε όρο του PID ελεγκτή. Στην συνέχεια συναθροίζουμε τα σήματα των 3 μοντέλων σε μία κοινή έξοδο.

Έπειτα από παρατήρηση των αποτελεσμάτων, φάνηκε ότι το ANFIS κάθε όρου δίνει διαφορετικές τιμές εξόδου για το ίδιο σετ εισόδων, και άρα υπήρξε ανάγκη για μια εσωτερική επικοινωνία μεταξύ των τριών όρων. Με την εμπειρική μέθοδο Ziegler-Nichols, ρυθμίζεται σε πρώτη φάση το κέρδος του αναλογικού όρου (K_p) και στην συνέχεια γίνεται έλεγχος απόκρισης του συστήματος για τον καθορισμό των υπόλοιπων δύο όρων.

Επομένως, το νέο σύστημα που προκύπτει θα περιέχει τέσσερις εισόδους (θαλάσσιο ρεύμα, άνεμο, κύμα και το αποτέλεσμα του αναλογικού όρου, P) και δύο εξόδους (I και D).



Το μπλοκ διάγραμμα που προκύπτει έπειτα από την τελευταία αλλαγή στην μεθοδολογία εύρεσης των κερδών με την χρήση του εμπειρικού κανόνα Ziegler-Nichols, απεικονίζεται παρακάτω:



Δ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της εργασίας θα πρέπει αρχικά να γίνει κατανοητή η σημαντική προσπάθεια και συνεισφορά όλων εκείνων των ανθρώπων, επιστημόνων, μηχανικών και τεχνικών που συνέβαλλαν στην σημαντική ανακάλυψη και εξέλιξη του συστήματος δυναμικής τοποθέτησης.

Έχοντας αναλύσει εκτενώς στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας το θεωρητικό υπόβαθρο των συστημάτων δυναμικής τοποθέτησης (DP) και της ασαφούς λογικής, στο τρίτο μέρος έγινε μια προσπάθεια παρουσίασης της μεθοδολογίας για την κατασκευή του νευρο-ασαφούς συστήματος ANFIS. Παρουσιάστηκε δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο μπορεί κανείς να υπολογίσει τα βέλτιστα κέρδη των όρων του PID ελεγκτή της συγκεκριμένης εφαρμογής μέσω της χρήσης ασαφούς λογικής.

Ενδεικτικά, με παρόμοιο τρόπο ο Shengwen Xu από το Shanghai Jiao Tong University, στην εργασία “A Fuzzy Rule Based PID Controller for Dynamic Positioning of Vessels in Variable Environmental Disturbances, 2019” αναπτύσσει παρόμοιο τρόπο για την επίλυση του ίδιου προβλήματος.

Επίσης, οι Hu Xin και Jialu Du ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη προσαρμοστικού νευρο-ασαφούς συστήματος για τον αλγόριθμο ελέγχου DP στην εργασία τους με θέμα “Adaptive fuzzy controller design for dynamic positioning system of vessels “, Jiwei Shi School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, China.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις άνωθεν μελέτες και έχοντας κατά νου την απλότητα του ANFIS, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι στο μέλλον θα φανεί μια εξαιρετικά χρήσιμη τεχνολογία με πραγματικά ανυπολόγιστες εφαρμογές.

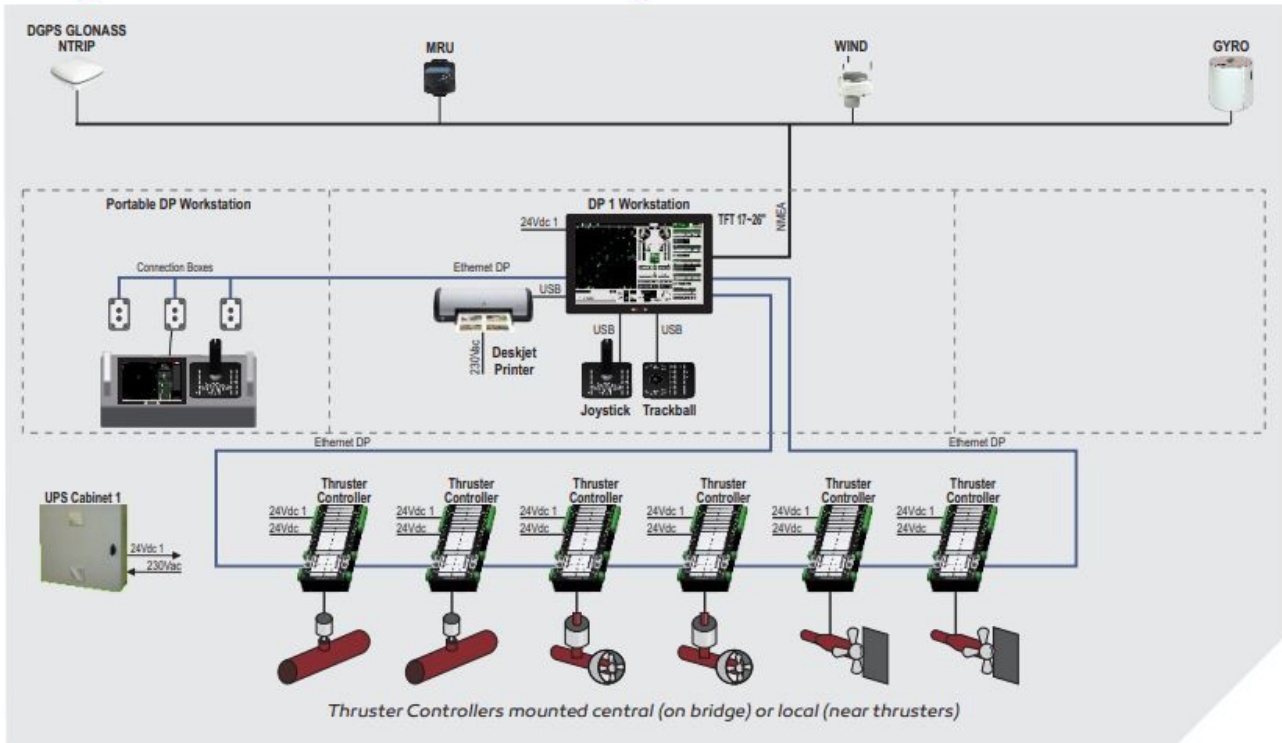
Κλείνοντας, θα ήθελα να σας ευχαριστήσω που φτάσατε μέχρι αυτές τις γραμμές, ελπίζοντας πως η παρούσα εργασία είτε πρόσθεσε επιπλέον γνώση, είτε διαλεύκανε πιθανά σκοτεινά σημεία στην ήδη υπάρχουσα γνώση σας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- “14 Types of Ships with Dynamic Positioning System” 2021 By Bikram Singh Marine Insight
- “DP Operator’s Handbook”, Third edition, 2020 by Captain David Bray FNI Captain John Daniels, Captain Glenn Fiander, Captain Dane Foster – The Nautical Institute
- “Dynamic Positioning for Engineers - 1st Edition”, 2020 by Surender Kumar
- “Fuzzy sets. Information and Control” , 1965, by Zadeh L.
- “Guidance on position reference systems and sensors for DP operations” 2022 – Rev 0.2, IMCA
- “Introduction to fuzzy logic”, January 2013, by Franck Dernoncourt
- “Neuro-Fuzzy Application in a PID Tuning of a Dynamic Positioning System of a Vessel”, May 2016 by Fabricio Aguiar de Oliveira
- “Neuro-Fuzzy Modeling: Architecture, Analysis and Application”, PhD thesis, University of California, Berkeley, 1992, by Jangi, R.
- "IMCA M 141, Guidelines on the Use of DGPS as a Position Reference in DP Control Systems". London: International Marine Contractors Association. October 1997.
- "IMCA M 170, A Review of Marine Laser Positioning Systems".
- "IMCA M 174, A Review of the Artemis Mk V Positioning System". London: International Marine Contractors Association.
- "IMO MSC/Circ.645, Guidelines for vessels with dynamic positioning systems" (PDF). 6 June 1994. Archived from the original (PDF) on 2007-06-10.
- “PID Controllers: Theory, Design and Tuning”, 343pp. Instrument Society of America, 1995, by Åström K.J. and Hägglund T.
- “Power Management Control of Electrical Propulsion Systems ” DYNAMIC POSITIONING COMMITTEE October 9-10, 2007 Ingve Sørfohn Wärtsilä N.A. Inc.
- "RADIUS relative positioning system", 15 August 2011, Konsberg Gruppen.
- "What is dynamic positioning?". The Nautical Institute. Archived from the original on 2013-01-25. Retrieved 2013-01-24.

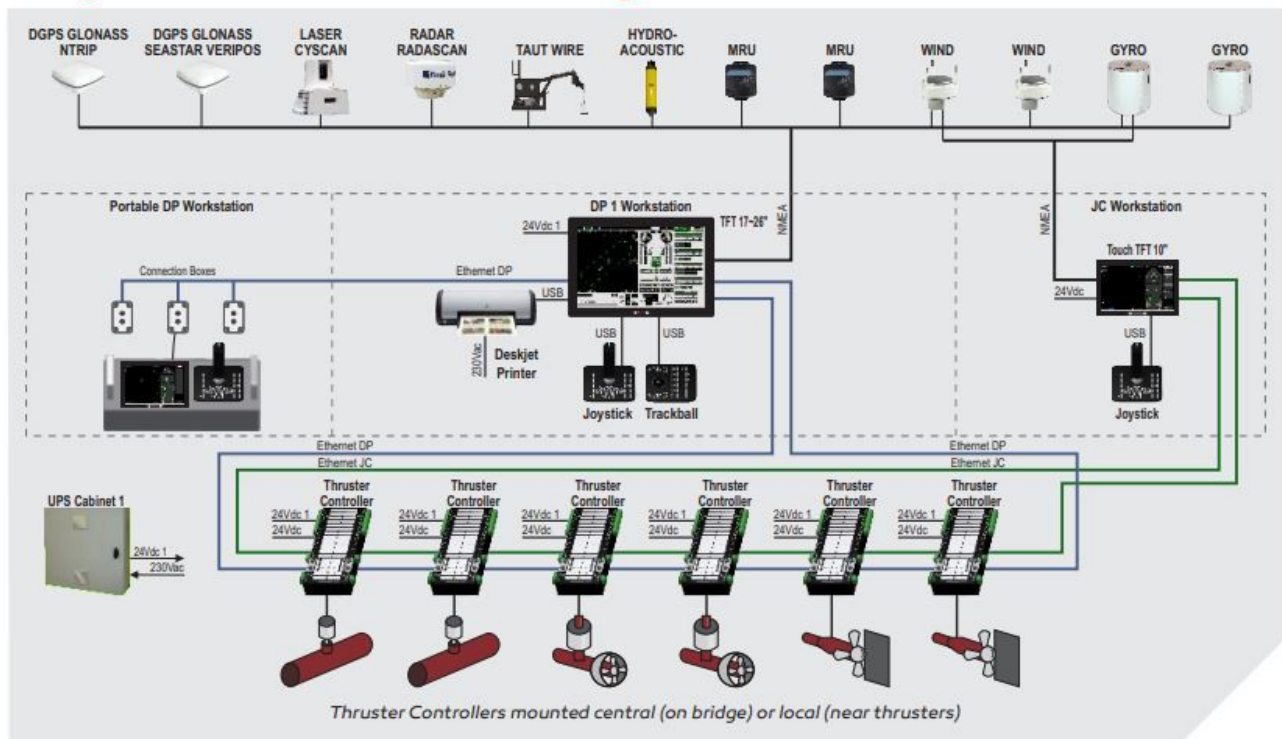
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΚΛΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ DP

Mega-Guard DPO Block Diagram



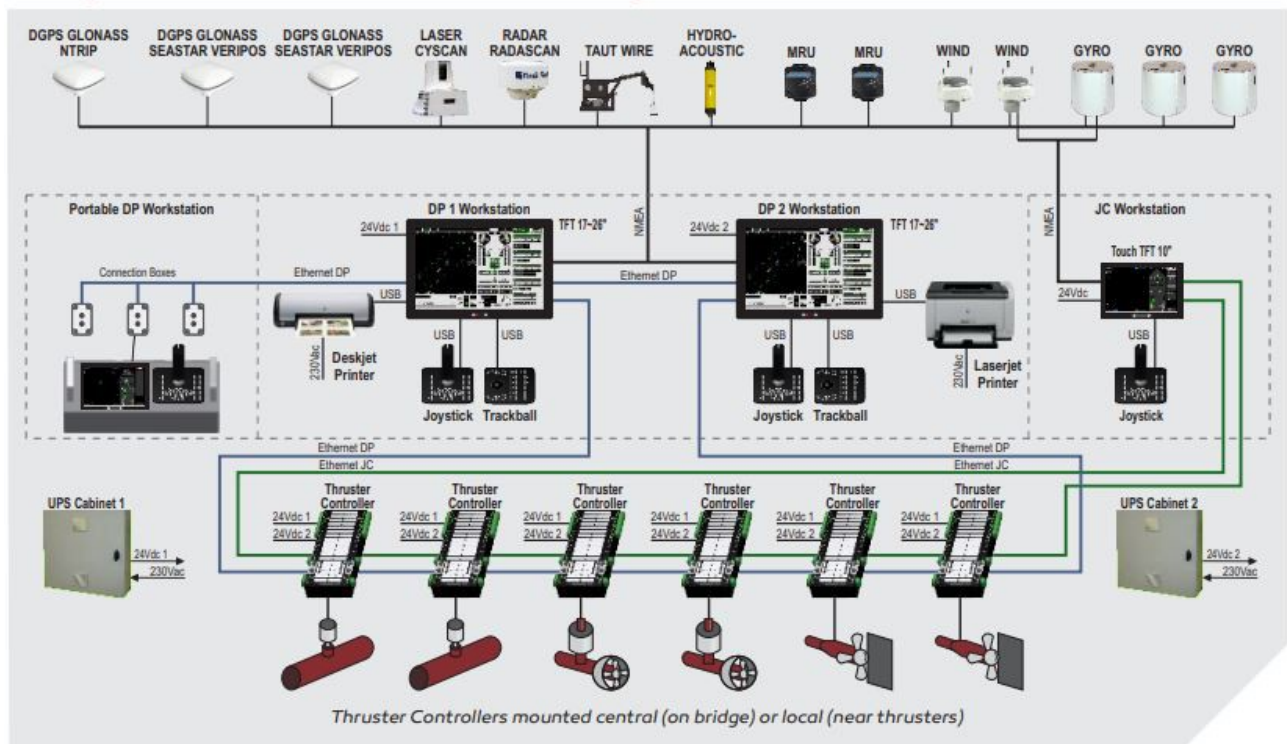
Εικόνα 35: Μπλοκ διάγραμμα DP συστήματος κλάσης 0 (www.praxis-automation.nl)

Mega-Guard DP1 Block Diagram



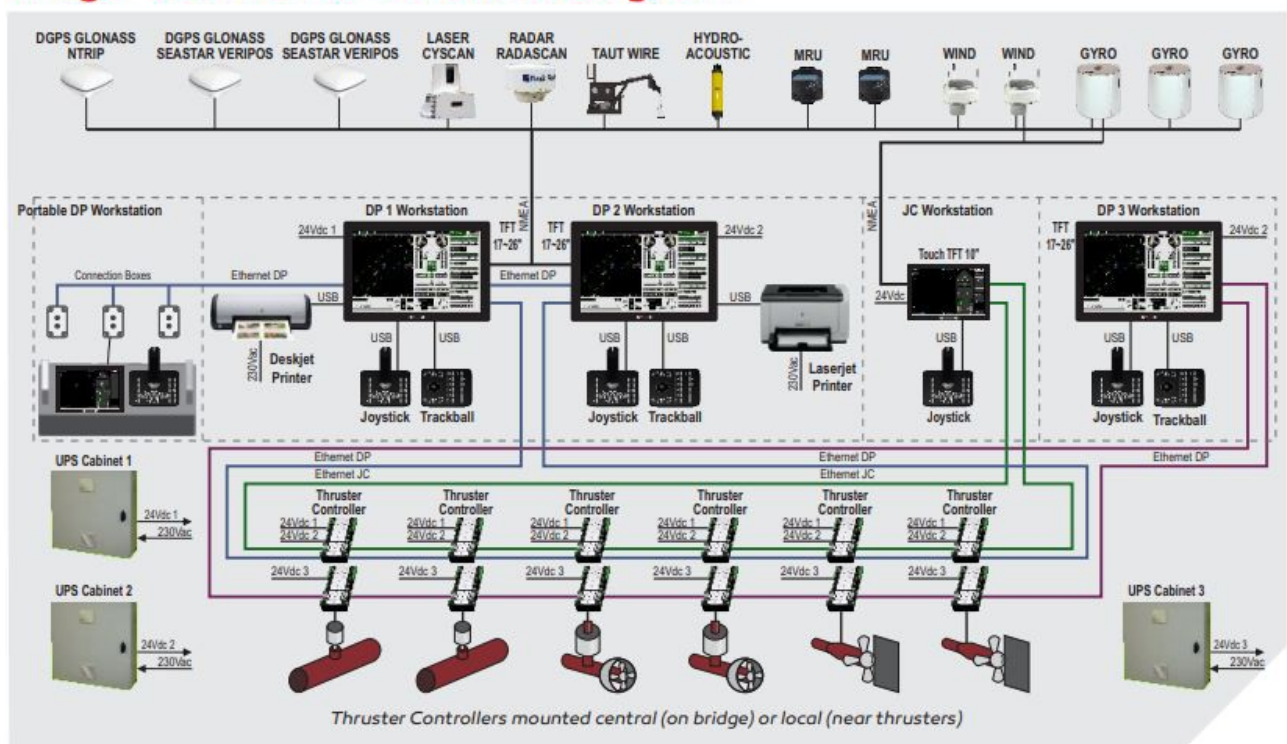
Εικόνα 36: Μπλοκ διάγραμμα DP συστήματος κλάσης 1 (www.praxis-automation.nl)

Mega-Guard DP2 Block Diagram



Εικόνα 37: Μπλοκ διάγραμμα DP συστήματος κλάσης 2 (www.praxis-automation.nl)

Mega-Guard DP3 Block Diagram



Εικόνα 38: Μπλοκ διάγραμμα DP συστήματος κλάσης 3 (www.praxis-automation.nl)