

21ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ



Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ

# **ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΚΛΑΣΣΙΚΟ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΕΛΕΓΚΤΗ**

**ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΜΙΧΑΛΗΣ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

**ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2017**

ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ  
Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλιω , Αθήνα – Ελλάδα  
Τηλ. 210-5381488

## Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων.....	3
Κατάλογος Πινάκων.....	3
Κατάλογος Συμβόλων & Συντομογραφιών.....	3
Περίληψη .....	4
Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναφορά υδραυλικών και ορισμοί.....	6
Κεφάλαιο 2: Ανάπτυξη Συστήματος.....	18
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα.....	27
Συμπεράσματα και Μελλοντικές βελτιστοποιήσεις.....	31
Βιβλιογραφική αναφορά.....	33

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Φυσικό παράδειγμα υδροστατικής.....	6
Εικόνα 1.2.1 Αρχιμήδης.....	8
Εικόνα 1.2.2 Υδραυλικό έμβολο .....	9
Εικόνα 1.2.3 Ήρων .....	10
Εικόνα 1.2.4 Αιολόσφαιρα.....	10
Εικόνα 1.2.5 Τα σχέδια του Λεονάρντο ντα Βίντσι .....	11
Εικόνα 1.2.6 Σχέσης πίεσης και όγκου υπό σταθερή θερμοκρασία .....	13
Εικόνα 1.2.7 Ισαάκ Νεύτωνας .....	14
Εικόνα 1.2.8 Ζοζέφ Λουί Λαγκράνζ .....	16
Εικόνα 1.2.9 Navier-Stokes .....	17
Εικόνα 1.2.10 Όσμπορν Ρέινολντς.....	18
Εικόνα 2.1 Υδραυλικό Σύστημα σε Matlab/Simulink.....	19
Εικόνα 2.2 Παράμετροι PID ελεγκτή στο Matlab.....	21
Εικόνα 2.2.2 Παράμετροι Fuzzy PID ελεγκτή στο Matlab.....	22
Εικόνα 2.2.3 Διάγραμμα λειτουργίας Fuzzy PID ελεγκτή.....	22
Εικόνα 2.2.4 Τροποποίηση της μάσκας του FLC σε Matlab/Simulink.....	23
Εικόνα 2.2.5 Συνάρτηση συμμετοχής σφάλματος $e$ και διαφορά σφάλματος $De$ .....	24
Εικόνα 2.2.6 Συνάρτηση συμμετοχής για τα κέρδη του PID.....	24
Εικόνα 2.2.7 Fuzzy Logic Designer .....	25
Εικόνα 2.2.8 Κανόνες του FL .....	26
Εικόνα 2.2.9 Η έξοδος $Kp$ του FLS συναρτήσει των εισόδων $e$ και $De$ .....	27

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1.1 Παράμετροι συστήματος εξομοίωσης .....	34
Πίνακας 2.2.1 Αναφορικός πίνακας διαχειρισμού κερδών PID .....	25
Πίνακας 2.2.2 Οι ασαφείς κανόνες των κερδών .....	25

## Πίνακας Συμβόλων & Συντομογραφιών

PID	Proportional-Integral-Derivative
FLS	Fuzzy Logic System
FLC	Fuzzy Logic Controller
Pa	Pascal
$K_P$	Αναλογικό κέρδος
$K_D$	Διαφορικό κέρδος
$K_I$	Ολοκληρωτικό κέρδος
$e$	Σφάλμα
N	Negative
Z	Zero
P	Positive
S	Small
M	Medium
B	Big

## Περίληψη

Η παρούσα μελέτη ασχολείται με τη σύγκριση αξιόπιστων μεθόδων ελέγχου, κλασσικού αλλά και σύγχρονου χαρακτήρα που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο ενός θεωρητικού υδραυλικού μοντέλου, με σκοπό την εύρεση της πιο αποδοτικής μεθόδου. Βασικός λόγος για τη χρήση των υδραυλικών και των πνευματικών συστημάτων ελέγχου σε πολλές εφαρμογές είναι η ικανότητά τους να συσσωρεύουν και να αποδίδουν μεγάλες δυνάμεις. Μια βασική αρχή της λειτουργίας των υδραυλικών και πνευματικών ενεργοποιητών είναι η μετατροπή της παρεχόμενης ροής σε πίεση και δύναμη που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη δημιουργία ή την ενίσχυση γραμμικής ή περιστροφικής κίνησης.

Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούν την ιδιότητα των υγρών να κατανέμουν τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά σε διάφορες θέσεις. Μια άλλη ιδιότητα των υγρών είναι ότι έχουν πολύ μικρή συμπιεστότητα (πρακτικά θεωρούνται ασυμπίεστα). Σύμφωνα με τον νόμο του Pascal, κάθε υγρό μεταφέρει την πίεση που εφαρμόζεται σε μια επιφάνειά του με αμείωτη ένταση σε κάθε άλλη επιφάνειά του. Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις και είναι κατάλληλοι για εφαρμογές που απαιτούν να ασκηθούν πολύ μεγάλες δυνάμεις

Το μαθηματικό μοντέλο, που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση, αναπτύχθηκε σε Matlab / Simulink περιβάλλον, κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης Sim Hydraulics και απαρτίζεται από τρία κύρια μέρη το μηχανικό τμήμα, το υδραυλικό τμήμα και τον ελεγκτή. Το μηχανικό τμήμα αντιπροσωπεύεται από την αντλία η οποία τροφοδοτεί το κύκλωμα με υγρό για να πραγματοποιούνται οι κινήσεις σε αυτό. Το υδραυλικό τμήμα, διαιρείται στο έμβολο και την κατευθυντήρια βαλβίδα. Η βαλβίδα τροφοδοτείται από το σύστημα και κατευθύνει την κίνηση του εμβόλου. Το έμβολο, τηρώντας κάποιες απαραίτητες προδιαγραφές, εκτελεί κίνηση σε ένα πλαίσιο επιθυμητών τιμών εκτελώντας ή την τελική λειτουργία (π.χ. πρέσσα) ή μεταφέρει την κίνηση σε επιμέρους στάδια της διεργασίας που εξελίσσεται (π.χ. κουβάς εκσκαφέα) . Την ποιότητα της συμπεριφοράς αυτής την καθορίζει ο ελεγκτής. Ο ελεγκτής είναι το σημαντικότερο λειτουργικό μέρος του συστήματος. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ο "εγκέφαλος" του συστήματος, ενώ η βαλβίδα ως η καρδιά του και το έμβολο ως εκτελεστικό όργανο.

Η μελέτη ασχολείται αφενός με την περιγραφή της ανάπτυξης του μοντέλου, αφετέρου με την εξαγωγή συμπερασμάτων μέσα από τα αποτελέσματα της εξομοίωσης για την συμπεριφορά του συστήματος. Τα βασικά χαρακτηριστικά που θα κρίνουν τον ελεγκτή ως τον καταλληλότερο είναι η ευστάθεια (Stability), η προσαρμοστικότητα (Adaptivity), η ακρίβεια (Accuracy) καθώς και η ταχύτητα ανταπόκρισης (Fast response) που προσδίδει στο σύστημα για την βέλτιστη λειτουργία του.

Η αναλυτική σύνθεση του υδραυλικού μοντέλου καθώς και των ελεγκτών του χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη περιγράφει το κλασσικός ελεγκτής τριών όρων Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό (PID controller) και η δεύτερη των σύγχρονος, αυτοπροσαρμοζόμενος ελεγκτής Fuzzy Logic Controller (FLC) μαζί με τους κανόνες δόμησης του. Μέσα από τα αποτελέσματα της εξομοίωσης, εξάγονται συμπεράσματα για την απόδοση των ελεγκτών καθώς και για την χρήση του όρου ολοκλήρωσης (I-integral).

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Ιστορική αναφορά υδραυλικών και ορισμοί

### 1.1.1 Ορισμοί υδραυλικών

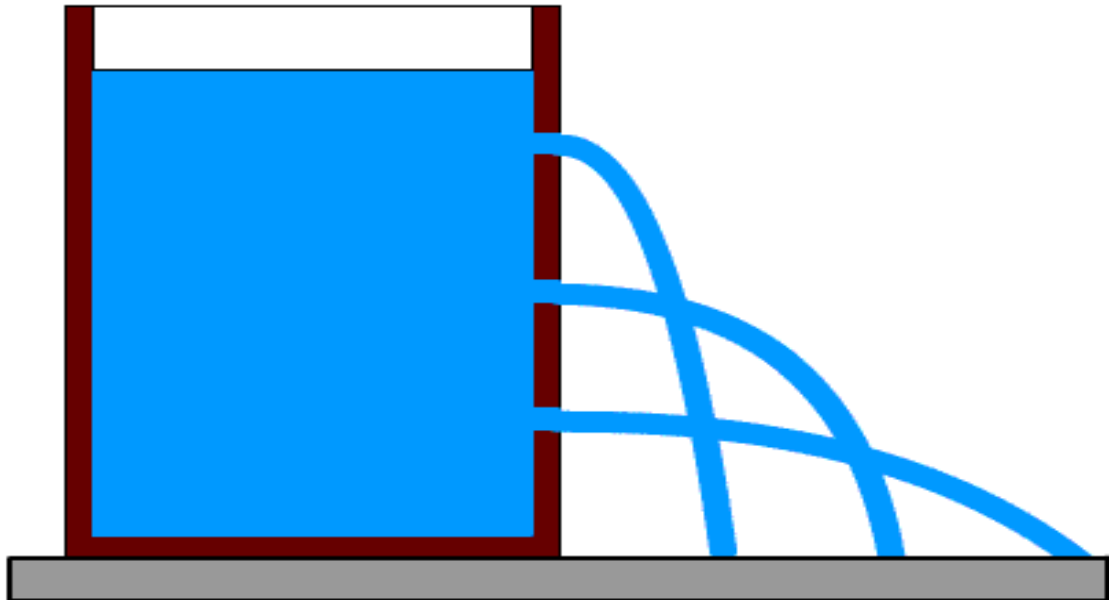
*Υδραυλική*, είναι η επιστήμη όπου το κύριο αντικείμενο της περιλαμβάνει τη θεωρητική και πρακτική μελέτη των τεχνικών θεμάτων που αφορούν τα υγρά όταν βρίσκονται σε κατάσταση ακινησίας ή κίνησης. Η Υδραυλική χρησιμοποιεί τις αρχές της υδροστατικής και υδροδυναμικής για να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα για την λύση των πρακτικών προβλημάτων, ενώ με τη σειρά της θέτει νέα ερωτήματα προς έρευνα. Μερικά από τα προβλήματα που κλήθηκε να λύσει ήταν η παροχή νερού από μια πηγή για την αποχέτευση ακάθαρτων υδάτων. Από την αρχαιότητα, ήδη, είχε φτάσει σε πολύ μεγάλο επίπεδο με τους λαούς της Μεσοποταμίας να επιδεικνύουν μεγάλα αρδευτικά έργα και τους Ρωμαίους να κατασκευάζουν υδραγωγεία και αποχετεύσεις. Έργα που υστέρη από 2000 χρόνια υπάρχουν και μας επιδεικνύουν τον τεράστιο ρόλο και τη διαχρονική σημασία τους μέσα στον πολιτισμό. Τα πρώτα θεωρητικά αξιώματα της αναπτύχθηκαν από τον αρχαίο Έλληνα μαθηματικοφυσικό Αρχιμήδη. Ο Αρχιμήδης θεμελίωσε την αρχή της πλευστότητας η οποία καθορίζει ότι "κάθε σώμα βυθισμένο σε ρευστό δέχεται άνωση ίση με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζει."

*Υδροδυναμική*, είναι παρακλάδι της φυσικής, και πιο συγκεκριμένα της μηχανικής ρευστών, που εξετάζει την κίνηση των υγρών σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που επενεργούν πάνω σε αυτά την λεγόμενη δυναμική των ασυμπίεστων ρευστών. Η κίνηση ενός υγρού κατά μήκος ορισμένης διαδρομής (ροής) υπόκειται γενικά σε μεταβολές της ταχύτητας τόσο ως προς το σημείο στο οποίο η ταχύτητα αυτή μετρείται όσο και σε σχέση με τη χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση αυτή. Γενικά στην κίνηση των υγρών διακρίνεται η στρωτή ροή (μόνιμη) και η τυρβώδης (μη μόνιμη). Ο νόμος του Ντανιέλ Μπερνούλι που προκύπτει από τα δυο φαινόμενα: "η ταχύτητα ροής είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το εμβαδόν της διατομής του σωλήνα ροής". Στην μεταγενέστερη περίοδο αυτή η γνώση οδήγησε την μεταβατική πορεία της βαρείας βιομηχανίας αλλάζοντας ριζικά, από τον τρόπο εξόρυξης χρυσού ως και την κατασκευή φρένων για τα οχήματα.

*Υδροστατική*, είναι ο επιστημονικός κλάδος της φυσικής που μελετά τις μηχανικές ιδιότητες των υγρών που ηρεμούν σε κατάσταση ισορροπίας "στατική των υγρών". Η γνώση των νόμων της Υδροστατικής ανάγεται στην αρχαιότητα, καθώς ο Αρχιμήδης τη μελέτησε κατά τρόπο συστηματικό. Με την ερευνά του ολλανδού Σίμον Στεβάν (1548-1620) και του Μπλεζ Πασκάλ (τον 17<sup>ο</sup> αιώνα) κατορθώθηκε να ολοκληρωθεί η διατύπωση των θεμελιωδών νόμων της μακροσκοπικής Υδροστατικής και των σημερινών θεωριών της κινητικής των ρευστών που επιτρέπουν μια πιο σαφή ερμηνεία

των νόμων αυτών. Ολόκληρη η Υδροστατική μπορεί να θεωρηθεί ό,τι βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις παρατηρήσεις:

- 1) ένα υγρό ασκεί σε κάθε επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή, δύναμη έντασης ανάλογη προς το εμβαδόν της επιφάνειας και κατευθύνεται κάθετα προς την ίδια επιφάνεια.
- 2) ένα υγρό σε κατάσταση ηρεμίας συμπεριφέρεται πάντοτε ως ιδανικό υγρό. Τα υγρά είναι ελάχιστα συμπιεστά, δεν έχουν δικό τους σχήμα και παίρνουν οποιοδήποτε σχήμα κρατώντας σταθερό τον όγκο τους.

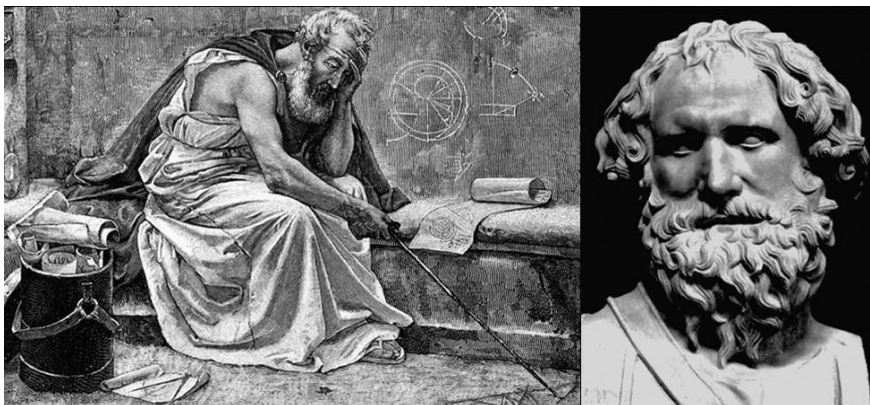


Εικόνα 1.1 Φυσικό παράδειγμα υδροστατικής

### 1.1.2 Ιστορική αναφορά υδραυλικών

Η υδραυλική είναι μια από της αρχαιότερες επιστήμες στον κόσμο και οι ρίζες της ξεκινάνε από την αρχαία Αίγυπτο, την Βαβυλώνα (3000 π.Χ.) και την Ελλάδα,. Οι Αιγύπτιοι και οι Βαβυλώνιοι ήταν από τους πρώτους πολιτισμούς που κατασκεύασαν κανάλια τόσο για άρδευση όσο και για αμυντικούς σκοπούς. Παρόλα αυτά δεν έγινε περαιτέρω προσπάθεια για την κατανόηση των νόμων που διέπουν τα υγρά.

Η πρώτη αξιοσημείωτη συνεισφορά εκείνης της εποχής για την κατανόηση της φύσης των ρευστών και των ιδιοτήτων τους έγινε από τον Αρχιμήδη (287-212 π.Χ.) Ο τύραννος Ιέρωνας γνωρίζοντας πως ο Αρχιμήδης ήταν ένας πολύ ικανός επιστήμονας και έχοντας του απόλυτη εμπιστοσύνη του ανέθεσε ένα ερώτημα. Ήθελε να διαπιστώσει εάν το στέμμα που του είχε φτιάξει ένας τεχνίτης αποτελούνταν από χρυσό εκατό τοις εκατό ή αν ο τεχνίτης τον είχε κλέψει και είχε προσθέσει και ασήμι. Ο Αρχιμήδης επί μέρες προσπαθούσε να βρει τη λύση σε αυτό το πρόβλημα. Τη λύση τελικά την βρήκε μέσα στη μπανιέρα του. Καθώς έμπαινε στο νερό παρατήρησε πως καθώς το σώμα του βυθιζόταν στο νερό ένα μέρος του νερού εκτοπιζόταν απ' την μπανιέρα. Σύμφωνα με τον μύθο ο Αρχιμήδης πετάχτηκε γυμνός έξω από το νερό και βγήκε γυμνός στο δρόμο φωνάζοντας ' ΕΥΡΗΚΑ! ΕΥΡΗΚΑ! '. Μετά και από άλλα πειράματα που έκανε διατύπωσε την αρχή της άνωσης σύμφωνα με την οποία, ' κάθε σώμα, όταν βυθίζεται σε υγρό, χάνει από το βάρος του τόσο, όσο είναι το βάρος του υγρού που εκτοπίζει «Στατική των Ρευστών» ή « Αρχή του Αρχιμήδη». Ο Αρχιμήδης πέθανε περίπου το 212 π.Χ. κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Καρχηδονιακού Πολέμου, όταν οι ρωμαϊκές δυνάμεις υπό τον στρατηγό Μάρκο Κλαύδιο Μάρκελλο κυρίευσαν την πόλη των Συρακουσών μετά από πολιορκία δύο χρόνων. Σύμφωνα με τον Πλούταρχο, ο Αρχιμήδης είχε κατά νου ένα μαθηματικό διάγραμμα όταν η πόλη είχε καταληφθεί και δεν είχε αντιληφθεί την άλωσή της. Ένας Ρωμαίος στρατιώτης τον διέταξε να πάει και να συναντήσει τον στρατηγό Μάρκο Κλαύδιο Μάρκελλο αλλά αυτός αρνήθηκε λέγοντας ότι έπρεπε να τελειώσει με το πρόβλημα του.



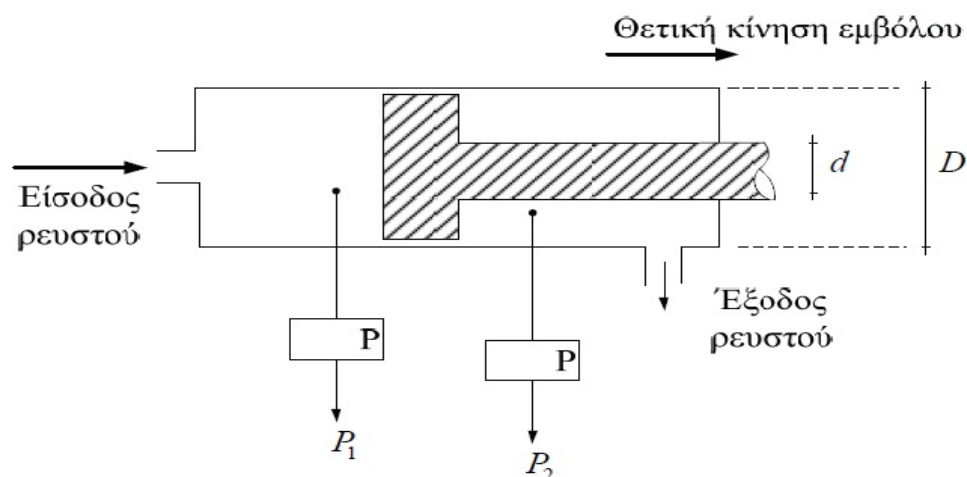
Εικόνα 1.2.1 Αρχιμήδης

Οι Ρωμαίοι κάνουν την εμφάνιση τους στο προσκήνιο, και όπως οι Αιγύπτιοι, καλωσόρισαν την πρακτική εφαρμογή των ρευστών περιθωριοποιώντας την θεωρητική ανάπτυξη. Έτσι υπήρξε ελάχιστη εξέλιξη στον τομέα της υδραυλικής μέχρι την αναγέννηση. Παρόλα αυτά, πολυάριθμες είναι οι υδραυλικές/πνευματικές εφευρέσεις που έχουν καταγραφεί από εκείνη την εποχή.

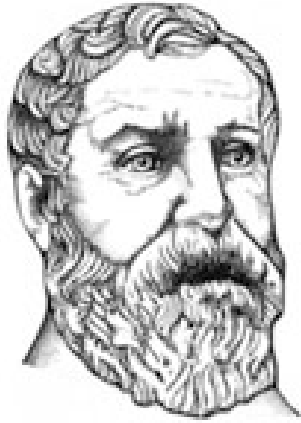


Μεγάλη προσωπικότητα του κλάδου αποτελεί ο Κτησίβιος ο Αλεξανδρεύς ο οποίος Γεννήθηκε στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου. Θεωρείται ο Πατέρας της Πνευματικής, της επιστήμης που ασχολείται με τον αέρα και τις χρήσεις του. Ήταν ιδρυτής της Αλεξανδρινής Σχολής των μηχανικών και μαθηματικών, του λεγομένου "Μουσείου Αλεξάνδρειας " (Πολυτεχνείου Αλεξάνδρειας), επί βασιλείας του Πτολεμαίου Β΄ του Φιλαδέλφου. Τα έργα του αφορούσαν τους τομείς των Πνευματικών, των Υδραυλικών και της Στρατιωτικής μηχανικής. Το έργο του δεν διασώθηκε, αλλά αντλούμε πληροφορίες για αυτόν από τον Ρωμαίο συγγραφέα, αρχιτέκτονα και μηχανικό Βιτρούβιο, στο έργο του Περί Αρχιτεκτονικής, καθώς και από τους Φίλιωνα τον Βυζάντιο και τον Αθήναιο που ομιλούν με θαυμασμό γι' αυτόν. Ένα παράδειγμα του έργου διασώζει ο Βιτρούβιος: "Διακρινόμενος από όλους τους υπόλοιπους για την ευφυΐα και τη μεγάλη φιλεργία του εύρησε ευχαρίστηση στην κατασκευή τεχνημάτων. Θέλησε λοιπόν κάποτε να κρεμάσει τον καθρέπτη στο κατάστημα του πατέρα του με τέτοιο τρόπο, ώστε όταν κάποιος τον κατέβαζε ή τον ανέβαζε να κατεβαίνει ή να ανεβαίνει αντίστοιχα, με ένα κρυμμένο σχοινί που κατέληγε σε ένα βάρος. Έτσι κατασκεύασε τον εξής μηχανισμό: Κάτω από μια δοκό στερέωσε ένα ξύλινο αγωγό και του προσάρμοσε τροχαλίες. Μέσα από τον αγωγό οδήγησε το σχοινί προς τη γωνία του τοίχου όπου και έφτιαξε ένα κατακόρυφο σωλήνα στον οποίο ολίσθαινε, προσαρμοσμένη στο σχοινί μια σφαίρα από μολύβι. Το βάρος κατεβαίνοντας μέσα στο στενό χώρο του σωλήνα, προκαλούσε τη συμπύκνωση του αέρα. Έτσι, με τη βίαιη κάθοδο του, το βάρος εξωθούσε μεγάλη ποσότητα του αέρα, έτσι ώστε αυτός να βγαίνει συμπιεσμένος μέσα από το στόμιο και να παράγει έναν διακριτικό ήχο." Άλλα μεγάλα επιτεύγματά του:

- το υδραυλικό έμβολο κυλίνδρου
- το κυρτό σιφόνι
- η αντλία πίεσης
- η καταθλιπτική - αναρροφητική αντλία
- το υδραυλικό ωρολόγιο



Εικόνα 1.2.2 Υδραυλικό έμβολο



Άλλος μεγάλος εκπρόσωπος του κλάδου της υδραυλικής ήταν ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς, μεγάλος μηχανικός και γεωμέτρης της εποχής. Έζησε στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου περίπου τον 1ο π.Χ. ή 1ο μ.Χ. αιώνα.. Υπήρξε διευθυντής της περίφημης Ανώτατης Τεχνικής Σχολής της Αλεξάνδρειας, το πρώτο πολυτεχνείο που είχε ιδρυθεί στο Μουσείο για μηχανικούς. Λέγεται ότι ακολουθούσε την θεωρία των ατόμων και τη Μηχανική Σύνταξη του Φίλωνα. Ιδέες του Κτησιβίου ήταν βάση για κάποια από τα έργα του.

Εικόνα 1.2.3 Ήρων

Η πιο διάσημη εφεύρεση του ήταν η αιολόσφαιρα ή ατμοστρόβιλος, που θεωρείται ο πρόδρομος της ατμομηχανής. Πάνω από ένα λέβητα υπάρχουν δύο σωλήνες και γύρω από τα καμπυλωμένα άκρα τους εδράζεται μία σφαίρα με δύο ακροφύσια. Όταν θερμαίνεται το νερό του λέβητα, ατμοποιείται και περνώντας από τους δύο κατακόρυφους σωλήνες εισέρχεται στη σφαίρα και εξέρχεται με ταχύτητα από τα δύο ακροφύσια εξαναγκάζοντάς την σφαίρα σε αντίθετη συνεχή περιστροφή.



Εικόνα 1.2.4 Αιολόσφαιρα

Η υδραυλική άρχισε να αναπτύσσεται σε επιστήμη με την τεράστια συνεισφορά της Ιταλικής σχολής την περίοδο της Αναγέννηση. Με τον ερχομό του Λεονάρντο ντα Βίντσι (1452 - 1519) ξεκίνησε η περίοδος άνθηση σε πολλά επιστημονικά επίπεδα. Στα τέλη του 1490 εκδόθηκε στο Μιλάνο το εγχειρίδιο του Ντα Βίντσι με της γενικευμένες παρατηρήσεις του πάνω στη βασική θεωρία της μηχανικής, συμπληρώνοντας έτσι τις έννοιες της πίεσης, της στατικής και της αεροδυναμικής. Εκεί περιγράφονται μηχανές και εργαλεία ενώ παρουσιάζονται πρακτικά πρότυπα για την εξήγηση βασικών αρχών και λειτουργιών που χρησιμοποιούνταν στους οικοδομικούς μηχανισμούς. Όπως φαίνεται τον Ντα Βίντσι απασχολούσαν πολύ τα προβλήματα τριβής και αντίστασης. Σπειρώματα κοχλιών κίνησης, υδραυλικοί γρύλοι, μηχανήματα περιστροφής κτλ. περιγράφονται μεμονωμένα ή σε διάφορους συνδυασμούς. Με την πάροδο του χρόνου το ενδιαφέρον του για τη θεωρητική μηχανική συγχωνευόταν με το ενδιαφέρον του για την εφαρμοσμένη μηχανική. Θεωρούσε ότι οι μηχανικές δυνάμεις που δρουν στους βασικούς νόμους της μηχανικής ενεργούν παντού οργανικά και στον ανόργανο κόσμο ρυθμίζοντας το ίδιο την έμψυχη και την άψυχη φύση όπως και τον άνθρωπο.



Εικόνα 1.2.5 Τα σχέδια του Λεονάρντο ντα Βίντσι

Η σκυτάλη περνά στα χέρια του Ιταλού φυσικομαθηματικού Εβαντζελίστα Τορικέλι (Evangelista Torricelli, 1608 - 1647) που έγινε γνωστός για την εφεύρεση του υδραργυρικού βαρόμετρου και την μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η λειτουργία του βασίζεται στο γεγονός του ότι ο υδράργυρος κατέρχεται μέσα στο σωλήνα μέχρι να αντισταθμιστεί από τη πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της λεκάνης με τον υδράργυρο. Αυτό σημαίνει πως το βάρος του υδραργύρου που βρίσκεται στο σωλήνα εκφράζει το μέγεθος της ασκούμενης εκείνη τη στιγμή ατμοσφαιρικής πίεσης. Η ακριβής τιμή της πίεσης που εκφράζεται με το ύψος της υδραργυρικής στήλης φαίνεται σε φερόμενη κλίμακα στο μεταλλικό σωλήνα που περιβάλλει προστατευτικά τον γυάλινο σωλήνα. Η κλίμακα αυτή είναι βαθμονομημένη σε χιλιοστά.

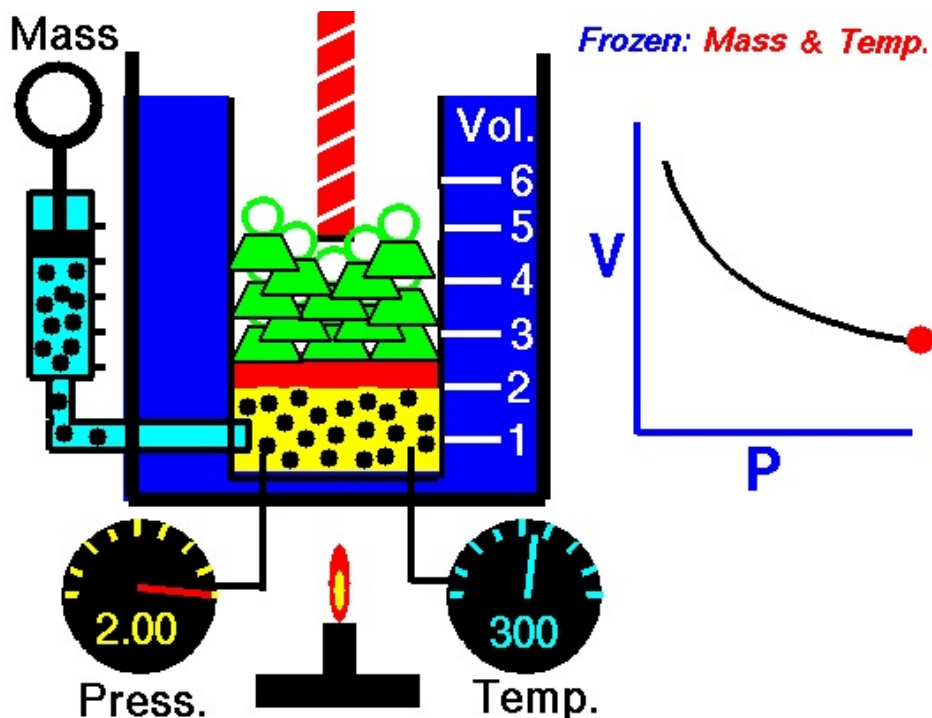
Ο Μπλεζ Πασκάλ (1623 - 1662), συνεχίζει το έργο του Τορικέλι και ασχολείται με την συμπίεστικότητα του αέρα. Κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα και μέχρι τους νεότερους χρόνους μικρή μόνο πρόοδος σημειώθηκε στην Υδροστατική και αυτή θεωρητική. Όπως το 1583 περίπου, ο Ολλανδός μαθηματικός Σίμον Στεβάν (Simon Stevin, 1548-1620) απέδειξε ότι η πίεση που ασκεί ένα υγρό πάνω σε μια δεδομένη επιφάνεια εξαρτάται από το βάθος στο οποίο βρίσκεται η επιφάνεια και όχι από το σχήμα του δοχείου που περιέχει το υγρό. Τον 17ο αιώνα Ο Μπλεζ Πασκάλ βασιζόμενος στο έργο του ολλανδού διατύπωσε τη θεμελιώδη αρχή της υδροστατικής τη γνωστή ως «Αρχή του Πασκάλ». Από τότε η περαιτέρω πρόοδος της υδροστατικής συνίσταται κυρίως αφενός σε θεωρητικές διερευνήσεις των δύο παραπάνω βασικών αρχών, αφετέρου σε πρακτικές εφαρμογές των πορισμάτων αυτών.

Ο Νόμος των Μπόιλ (1627 - 91) - Μαρριότ (Mariotte 1620 - 84) γνωστός και σαν νόμος των αερίων, πήρε το όνομά του αρχικά από τον Ιρλανδό φυσικό φιλόσοφο Ρόμπερτ Μπόιλ (Robert Boyle), που πρώτος τον διατύπωσε και δημοσίευσε το 1662. Τον ίδιο νόμο διατύπωσε 14 χρόνια αργότερα και ο Γάλλος φυσικός Εντμέ Μαρριότ (Edme Mariotte) (1620–1684), εξ ου και η διπλή ονομασία. Σύμφωνα με αυτό το νόμο:

“Ο όγκος ενός αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογος της πίεσης αυτού, σε σταθερή θερμοκρασία”

Για τις μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας αν P1 η αρχική πίεση του αερίου, V1 ο αρχικός ειδικός όγκος του και T η σταθερή θερμοκρασία του και προκληθεί μεταβολή της πίεσης και του όγκου του σε P2 και V2 κατά τρόπο που η θερμοκρασία μείνει αμετάβλητη, τότε μεταξύ των παραπάνω στοιχείων του αερίου θα ισχύει η μαθηματική σχέση:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$



Εικόνα 1.2.6 Σχέσης πίεσης και όγκου υπό σταθερή θερμοκρασία

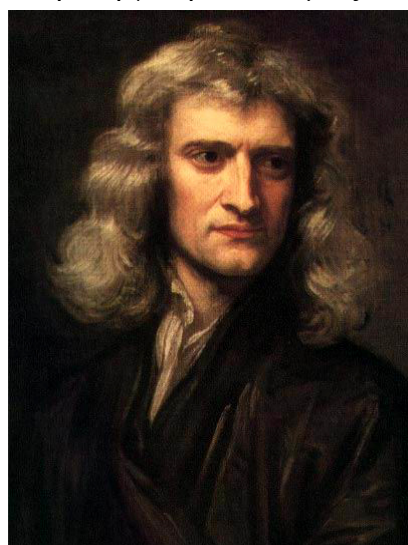
Ισαάκ Νεύτωνας (1642 - 1727), θεμελιώνει την Μηχανική και εισάγει τον πειραματικό νόμο της τριβής και την έννοια του ιξώδους. Ο Άγγλος φυσικός ήταν ένας από τους πιο μεγάλους «εφευρέτες» στην σύγχρονη φυσική. Στα χρόνια των σπουδών του, δεν υπήρχαν μαθηματικές έννοιες όπως η παράγωγος ή το ολοκλήρωμα. Ο Νεύτων όμως μπόρεσε να μελετήσει την κίνηση των σωμάτων και να «γεννήσει» την Κλασσική Μηχανική, χωρίς να έχει στα χέρια του αυτά τα εργαλεία.

Τα μη εξελιγμένα μαθηματικά της εποχής δεν του στάθηκαν εμπόδιο. Δημιούργησε μόνος του μια πρόωμη εκδοχή του Διαφορικού και Ολοκληρωτικού Λογισμού, χρησιμοποιώντας για πρώτη φορά τα δικά του κατασκευάσματα για να αποδείξει τρεις νόμους που άλλαξαν τα δεδομένα της φυσικής. Με λίγα λόγια, για να φτάσει στην απόδειξη της βασικότερης σύγχρονης κινητικής θεωρίας, δημιούργησε πρώτα έναν ολοκαίνουργιο κλάδο των μαθηματικών. Παράγωγοι, ολοκληρώματα και άλλες ανύπαρκτες ως τότε έννοιες των μαθηματικών χρειάστηκαν για να ολοκληρωθεί το πιο γνωστό και θεμελιώδες έργο στην ιστορία της φυσικής. Οι 3 νόμοι κίνησης του Νεύτωνα, δημοσιευμένοι στο θρυλικό «*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*», αποτέλεσαν βάση για την Κλασσική Μηχανική, ένα κλάδο ικανό να εξηγήσει την κίνηση κάθε μακροσκοπικού αντικειμένου.

Ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα έγινε γνωστός ως «Ο νόμος της Αδράνειας». 'Κάθε σώμα διατηρεί την κατάσταση ηρεμίας ή ομαλής ευθύγραμμης κίνησης εκτός αν αναγκαστεί να τη μεταβάλλει από δυνάμεις που ασκούνται πάνω του'. Δηλαδή χωρίς την επίδραση κάποιας εξωτερικής δύναμης, κάθε αντικείμενο έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του, αλλά και την κατεύθυνση του.

Ο δεύτερος νόμος είναι και ο πιο γνωστός, αφού εξηγεί την επίδραση μιας δύναμης πάνω σε ένα σώμα. 'Η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα, ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του σώματος' που σημαίνει πως μια δύναμη έχει την ικανότητα να αυξομειώνει την ταχύτητα του σώματος όπου ασκείται. Ο «Θεμελιώδης νόμος της δυναμικής» όπως χαρακτηρίστηκε αργότερα, είναι μιας από τις πιο βασικές σχέσεις στην φυσική των τελευταίων αιώνων.

Ο τρίτος και τελευταίος νόμος κίνησης του Νεύτωνα είναι και ο πιο εντυπωσιακός στο άκουσμα. 'Οι δυνάμεις που εξασκούνται από την αλληλεπίδραση δύο σωμάτων είναι πάντα ίσες κατά το μέτρο και αντίθετες κατά τη φορά' που αντιστοιχεί στο γνωστό Δράση = Αντίδραση. Όση δύναμη ασκήσει ένα σώμα σε ένα άλλο, ακριβώς την ίδια θα δεχτεί πίσω.



Εικόνα 1.2.7 Ισαάκ Νεύτωνας

Ο Daniel Bernoulli (1700 - 1782), διατυπώνοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας στα ρευστά, επεσήμανε για πρώτη φορά τη συχνή ανάγκη ανάλυσης μιας σύνθετης κίνησης σε μεταφορική κίνηση και περιστροφική κίνηση. Το κύριο έργο του είναι η Υδροδυναμική (Hydrodynamica), που εκδόθηκε στα 1738 και στην οποία διατυπώνεται η θεωρία της δυναμικής των ρευστών και η περίφημη πλέον Αρχή του Μπερνούλι με την αντίστοιχη Εξίσωση Μπερνούλι. Το έργο μοιάζει με την Αναλυτική Μηχανική του Λαγκράνζ στο ότι όλα τα αποτελέσματα προκύπτουν από μια και μόνη αρχή, τη διατήρηση της ενέργειας. Η εργασία ακολουθήθηκε από ένα μνημόνιο πάνω στη θεωρία των παλινδρομών για την οποία μοιράστηκε ένα βραβείο από τη Γαλλική Ακαδημία με τους Όιλερ και Μακ Λόριν που είχαν δουλέψει ανεξάρτητα πάνω στο ίδιο θέμα. Οι τρεις αυτές εργασίες αποτέλεσαν τη μόνη θεωρητική έρευνα για τις παλίρροιες μέχρι την έκδοση του *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* του Νεύτων και τις έρευνες του Πιέρ Σιμόν Λαπλάς. Ο Μπερνούλι έγραψε επίσης ένα μεγάλο αριθμό εργασιών πάνω σε διάφορα θέματα της μηχανικής, ειδικά στα προβλήματα της παλλόμενης χορδής, και τις λύσεις που δόθηκαν από τον Μπρουκ Τέιλορ και τον Ζαν Ντ' Αλαμπέρ. Ο Μπερνούλι είναι ο πρώτος ερευνητής που προσπάθησε να θεμελιώσει μια κινητική θεωρία των αερίων και, ως εφαρμογή των ιδεών του, προσπάθησε να εξηγήσει τον νόμο του Μπόιλ. Εργάστηκε επίσης μαζί με τον Όιλερ πάνω στην ελαστικότητα.

Ο Ζαν Λε Ρον ντ' Αλαμπέρ (Jean le Rond d' Alembert 1717 - 1783), διατύπωσε το παράδοξο του d' Alembert και εισήγαγε την αρχή διατήρησης της μάζας. Στα μαθηματικά εγκαινίασε τη σπουδή των διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους και διατύπωσε πρώτος το θεμελιώδες θεώρημα της άλγεβρας, που τους απέδειξε αργότερα ο Γκάους. Οι έρευνές του στο πεδίο αυτό συγκεντρώθηκαν στα *Opuscules mathématiques* (1761-80). Μαζί με τον Όιλερ και τον Μπερνούλι, ο Αλαμπέρ ήταν από τους πρώτους που μελέτησαν την κίνηση των υγρών, συνδέοντας το όνομά του με το περίφημο παράδοξο (υδροδυναμική). Σε αυτόν οφείλονται επίσης η διατύπωση και η μέθοδος λύσης, που ισχύουν μέχρι σήμερα, του προβλήματος της παλλόμενης χορδής (1747). Το πεδίο όμως στο οποίο ο Αλαμπέρ προσέφερε ίσως τη σπουδαιότερη και πιο πρωτότυπη συμβολή του είναι η μηχανική, με τη διατύπωση της περίφημης αρχής που φέρει το όνομά του, σύμφωνα με την οποία είναι δυνατό μαθηματικώς ένα πρόβλημα της δυναμικής να αναχθεί σε αντίστοιχο πρόβλημα της στατικής. Η πρώτη διατύπωση της αρχής αυτής βρίσκεται στην πραγματεία του περί δυναμικής (1743). Εφαρμόζοντας την ίδια αρχή στην κίνηση που κάνει η Γη γύρω από το κέντρο βάρους της κάτω από την επίδραση των δυνάμεων του Ήλιου και της Σελήνης, ο Αλαμπέρ πέτυχε να εξηγήσει τη μετάπτωση των ισημεριών και τη μετατόπιση του άξονα περιστροφής της Γης (*Recherches surprécession des équinoxes*, 1749). Ο Ζαν Λε Ρον ντ' Αλαμπέρ υπήρξε ένας από τους πιο σημαντικούς εκπροσώπους του γαλλικού Διαφωτισμού.

Οι θεωρητικές εξελίξεις στην αεροδυναμική συμβαδίζουν πλέον με τις πρακτικές. Ο Λέοναρντ Όιλερ (Leonhard Euler 1707 - 1783), διατυπώνει τις εξισώσεις κίνησης για ιδανικά ρευστά και αναπτύσσει την μαθηματική θεωρία γι' αυτά. Η σχέση που περιγράφεται από τον Μπερνούλι είχε ισχύ μόνο για ασυμπίεστα, μη συνεκτικά ρευστά. Το 1757, ο Όιλερ δημοσίευσε τις εξισώσεις του Όιλερ, επεκτείνοντας την αρχή του Μπερνούλι σε καθεστώς πιεσμένων ρευστών.

Ο Ζοζέφ Λουί Λαγκράνζ (Joseph-Louis Lagrange ή Giuseppe Lodovico Lagrangia) (1736 –1813) ήταν Ιταλός μαθηματικός, φυσικός και αστρονόμος, που έκανε πολύ σημαντικές μελέτες συνεισφέροντας σε όλα τα πεδία της μαθηματικής ανάλυσης, στη θεωρία αριθμών, αλλά και στην κλασσική μηχανική και ουράνια μηχανική. Το 1766, κατόπιν υποδείξεως του Όιλερ και του ντ' Αλαμπέρ, διαδέχτηκε τον πρώτο στη θέση του διευθυντή Μαθηματικών στην Πρωσική Ακαδημία Επιστημών, στο Βερολίνο, θέση όπου παρέμεινε για είκοσι χρόνια, παράγοντας μεγάλο έργο και κερδίζοντας πολλά βραβεία. Η πραγματεία του Λαγκράνζ στην αναλυτική μηχανική (*Traité de Mécanique Analytique*), που γράφτηκε στο Βερολίνο και εκδόθηκε το 1788, ήταν η πιο συστηματική μελέτη της κλασσικής μηχανικής από την εποχή του Νεύτωνα και αποτέλεσε τη βάση της μετέπειτα εξέλιξης της μαθηματικής φυσικής στον δέκατο ένατο αιώνα.

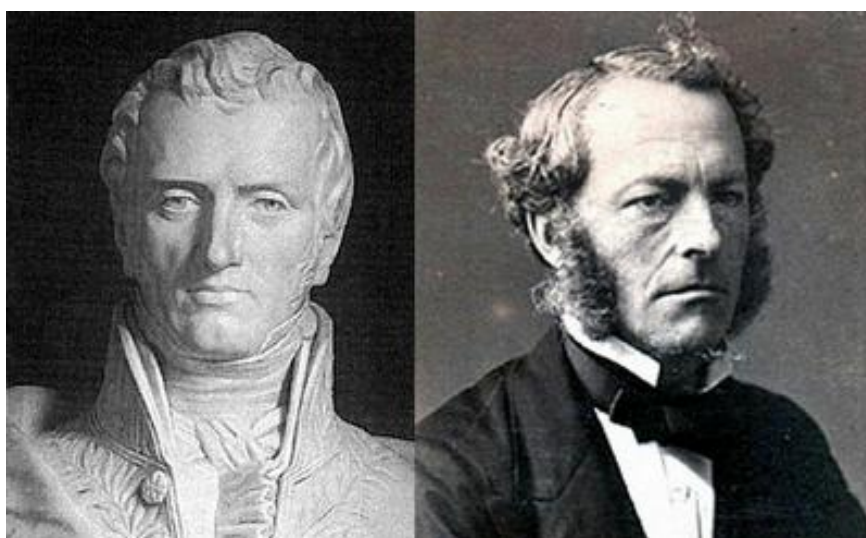


Εικόνα 1.2.8 Ζοζέφ Λουί Λαγκράνζ

Το επόμενο θεμέλιο στην φυσική και υδροστατική τοποθετείται από τους Navier (1783 - 1836) και Stokes (1819 - 1903). Οι εξισώσεις Navier-Stokes που ονομάστηκαν προς τιμήν τους περιγράφουν Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι ένα σύνολο εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν την κίνηση των ρευστών όπως είναι τα υγρά και τα αέρια. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τις μεταβολές στην ορμή ενός απειροστού όγκου του ρευστού σε ένα απλό αθροιστικό αποτέλεσμα των δυνάμεων ιξώδους του ρευστού, των μεταβολών της πίεσης, της βαρύτητας και των άλλων δυνάμεων που δρουν εντός του ρευστού.

Πρόκειται στην ουσία για εφαρμογή του 2ου νόμου του Νεύτωνα στα ρευστά. Αφορούν δηλαδή τη δυναμική της αλληλεπίδρασης της αδράνειας του ρευστού με τις διάφορες δυνάμεις που δρουν σε μια περιοχή του ρευστού. Είναι από τα πιο χρήσιμα σύνολα εξισώσεων γιατί εφαρμόζονται σε μοντέλα καιρού, μοντέλα ωκεάνιων ρευμάτων, ροή ρευστών σε σωλήνες, ροή αέρα γύρω από πτέρυγες αεροπλάνων και ανεμογεννητριών μέχρι και κίνηση άστρων μέσα στο γαλαξία.

Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι διαφορετικές εξισώσεις. Σε αντίθεση δηλαδή με τις αλγεβρικές εξισώσεις δεν δείχνουν εκπεφρασμένα μια σχέση μεταξύ των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν (π.χ. μεταξύ ταχύτητας και πίεσης) αλλά περιγράφουν σχέσεις μεταξύ των ρυθμών μεταβολής ή μεταξύ των ροών των διαφόρων μεγεθών. Με όρους μαθηματικούς λέμε ότι οι εξισώσεις αυτές περιέχουν σχέσεις μεταξύ των παραγώγων των διαφόρων μεγεθών. Για παράδειγμα, οι εξισώσεις Navier-Stokes για την πιο απλή περίπτωση ενός ιδανικού ρευστού (χωρίς ιξώδες) λέμε ότι η επιτάχυνση δηλ. η παράγωγος της ταχύτητας είναι ανάλογη με τη βαθμίδα (δηλ. την παράγωγο ως προς τις 3 χωρικές συντεταγμένες) της εσωτερικής πίεσης του ρευστού. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μόνο οι πιο απλές περιπτώσεις αυτών των εξισώσεων μπορούν να λυθούν μέσα στα πλαίσια του διαφορικού και ολοκληρωτικού λογισμού και οδηγήσουν σε ακριβείς λύσεις. Οι περιπτώσεις αυτές γενικά περιλαμβάνουν μόνο ροή χωρίς στροβίλους σε μόνιμες καταστάσεις. Δηλαδή καταστάσεις που δεν αλλάζουν με τον χρόνο. Στις καταστάσεις αυτές είτε το ιξώδες του ρευστού είναι πολύ μεγάλο, είτε η ταχύτητα ροής πολύ μικρή. Για πιο περίπλοκες καταστάσεις, όπως είναι τα παγκόσμια συστήματα καιρού σαν το φαινόμενο El Nino, οι λύσεις των εξισώσεων Navier-Stokes πρέπει να βρεθούν με τη βοήθεια υπολογιστών. Έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία υπολογιστικών προγραμμάτων που χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για τη λύση των εξισώσεων Navier-Stokes. Η προσέγγιση αυτή της αντιμετώπισης του ζητήματος είναι γνωστή ως Υπολογιστική Δυναμική των Ρευστών (CFD). Αν και θεωρητικά η CFD δουλεύει σε κάθε περίπτωση ροής, πολλές συνηθισμένες περιπτώσεις ροής όπως είναι η ροή γύρω από μια πτέρυγα αεροπλάνου, περιέχει τόσο πολλές λεπτομέρειες που κανένα πρόγραμμα υπολογιστή δεν μπορεί να λύσει το πρόβλημα σε λογικό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 1.2.9 Navier-Stokes



Προς το τέλος του 19ου αιώνα ο Ιρλανδός Όσμπορν Ρέινολντς (1842 - 1912), καταγόμενος από το Μπέλφαστ της γενιάς του Νίτσε, του Μπόλτσμαν και του Έντισον θα αφήσει τα αποτυπώματά του στην Υδροδυναμική με τον χαρακτηριστικό «αριθμό Ρέινολντς» που προσφέρει ένα καθοριστικό στοιχείο για τη διάκριση μιας στρωτής ροής από μία τυρβώδη αλλά και για την περιγραφή του ενδιαμέσου χώρου ανάμεσα στα σύνορα του ενός μοντέλου και του άλλου .

$$Re = \frac{ul\rho}{\mu} = \frac{\text{Δυνάμεις αδράνειας}}{\text{Δυνάμεις τριβής}}$$



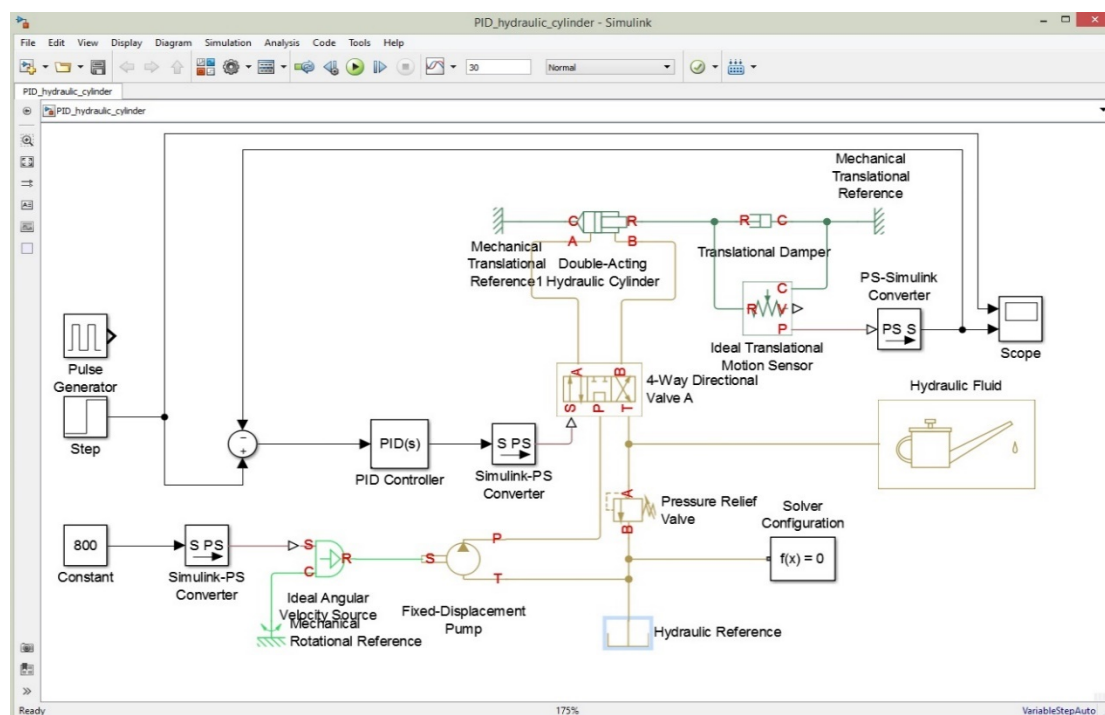
Εικόνα 1.2.10 Όσμπορν Ρέινολντς

Τζον φον Νόιμαν (1903 –1957) ένας από τους σπουδαιότερους μαθηματικούς του εικοστού αιώνα γεννήθηκε στην Ουγγαρία, και προσέφερε σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, όπως τα μαθηματικά, τη φυσική, τα οικονομικά και την πληροφορική. Ανέπτυξε έναν αλγόριθμο μαζί με τον Robert Davis Richtmyer (1910-2003) που σύμβαλλε για την ευστάθεια αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση χρονοεξαρτώμενων προβλημάτων. Όταν οι υπολογιστές έλυναν προβλήματα υδροδυναμικής, ή αεροδυναμικής , προσπάθησαν να βάλουν πάρα πολλά σημεία υπολογιστικού πλέγματος σε περιοχές με απότομη ασυνέχεια (κρουστικά κύματα). Τα μαθηματικά της τεχνητής ιξώδους εξομάλυναν τη μετάβαση χωρίς να θυσιάζεται η βασική φυσική. Άλλες γνωστές συνεισφορές σε ρευστό δυναμική περιλαμβάνουν τη λύση της κλασικής ροής για ανατίναξη κυμάτων και τη συν ανακάλυψη του μοντέλου ZND για την εκπυρσοκρότηση των εκρηκτικών υλών.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Ανάπτυξη Συστήματος

Το σύστημα που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση, σχεδιάστηκε σε Matlab/Simulink περιβάλλον κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης Sim Hydraulics. Παρακάτω βρίσκεται το δομικό διάγραμμα βαθμίδων με τον κλασικό PID ελεγκτή.



Εικόνα 2.1.1 Υδραυλικό Σύστημα σε Matlab/Simulink

Το σύστημα αποτελείται από μια αντλία (Fixed-Displacement Pump) η οποία λειτουργεί στα 800 rad/sec και τροφοδοτεί το σύστημα με λάδι. Χρησιμοποιώντας τα μπλοκ Ideal Angular Velocity Source και Simulink-PS Converter της βιβλιοθήκης ορίζετε τη τιμή των στροφών της αντλίας και μετατρέπετε το σήμα του Constant block σε φυσικό σήμα.

Οι ιδιότητες του ρευστού καθορίζονται από το μπλοκ Hydraulic Fluid. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λάδι Skydrol LD-4. Για το μπλοκ solver configuration χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ode15s, της οποίας η χρήση προτείνεται για την επίλυση μηχανικών και υδραυλικών συστημάτων.

Το μπλοκ Pressure Relief Valve ορίζει την μέγιστη πίεση του συστήματος σε περίπτωση υπερπίεσης. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε πίεση εκτόνωσης βαλβίδας  $5 \cdot 10^5$  Pa.

Η κατευθυντήρια βαλβίδα τροφοδοτείται από το σύστημα μέσω της αντλίας και διοχετεύει ρευστό στη θύρα A και B του εμβόλου. Δέχεται μέσω της θύρας S σήμα από τον ελεγκτή το οποίο μετατρέπεται από ένα Simulink-PS Converter μπλοκ σε φυσικό σήμα. Από τη σύνδεση T της βαλβίδας το ρευστό επιστρέφει στην δεξαμενή.

Το έμβολο συνδέεται με την κατευθυντήρια βαλβίδα μέσω των θυρών A και B. Το άκρο C του εμβόλου είναι η πάκτωση του. Το άκρο R συμβολίζει την έκταση/διαδρομή του εμβόλου, όπου στην πορεία της εξομοίωσης διαβάζεται αλλά και μετατρέπεται από φυσικό σήμα σε ψηφιακό, μέσω ενός PS-Simulink Converter μπλοκ καταλήγει στο Scope για να απεικονιστεί.

Επιμέρους στοιχεία που αποτελούν το σύστημα μας και τα οποία είναι απαραίτητα για την λειτουργία του είναι τα ελατήριο Translational Spring και αποσβεστήρας Translational Damper με τις προεπιλεγμένες τους ρυθμίσεις.

Για την απόκριση του συστήματος ορίστηκε βηματική και παλμική είσοδος.

Ακολουθεί ο Πίνακας 2.1.1 με τις τιμές των παραμέτρων του Συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμή
Motor speed	Rad/s	[800-1100]
Pump Displacement	$M^3/\text{rad}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Relief valve pressure	Pa	$5e5$
Proportional gain		325
Integral gain		[0-11]
Derivative gain		30
Piston stroke	m	1
Piston area A & B	$m^2$	$10^{-3}$
Contact stiffness	N/m	$10^8$
Contact damping	N/(m/s)	150
Directional valve opening	m	0.01
Valve passage area	$m^2$	$5 \cdot 10^{-5}$

Πίνακας 2.1.1 Παράμετροι συστήματος

## 2.2.1 Το κλασικό σύστημα ελέγχου

Ο PID ελεγκτής είναι ένας αντισταθμιστής σειράς που επεμβαίνει στον απ' ευθείας κλάδο του κλειστού συστήματος και ρυθμίζει το σήμα που οδηγεί τον ενεργοποιητή όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η κατευθυντήρια βαλβίδα, λαμβάνει υπ' όψη την απόκλιση της εισόδου και της εξόδου για τον υπολογισμό του σφάλματος. Ο ελεγκτής PID έχει συνάρτηση μεταφοράς,

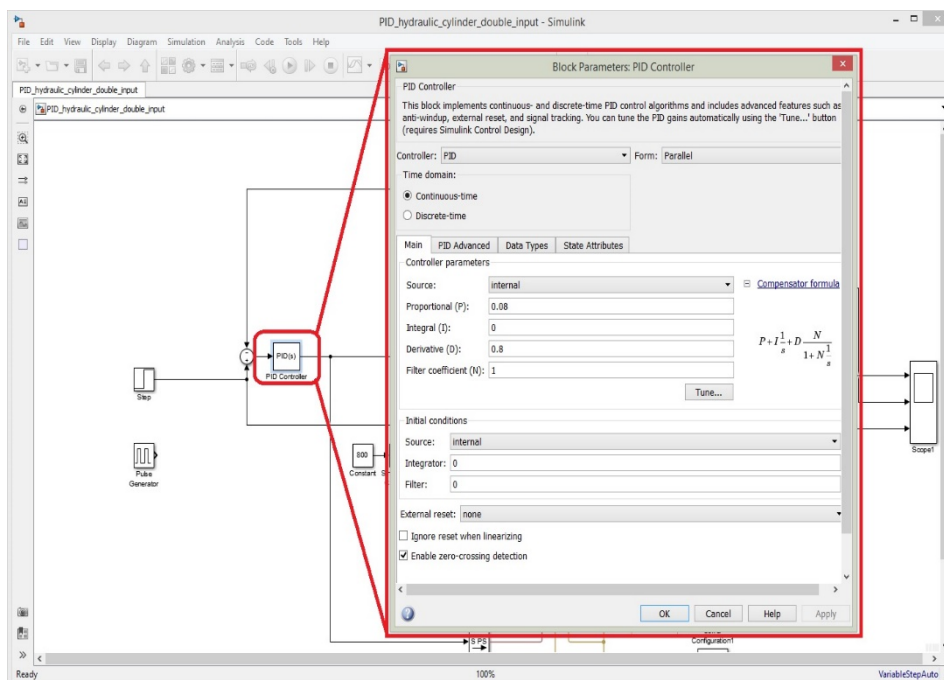
$$G(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$$

όπου  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ , είναι το αναλογικό, το ολοκληρωτικό και το διαφορικό κέρδος αντίστοιχα. Μια άλλη ισοδύναμη μορφή του τύπου του PID ελεγκτή είναι,

$$g(t) = K_P [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_D s]$$

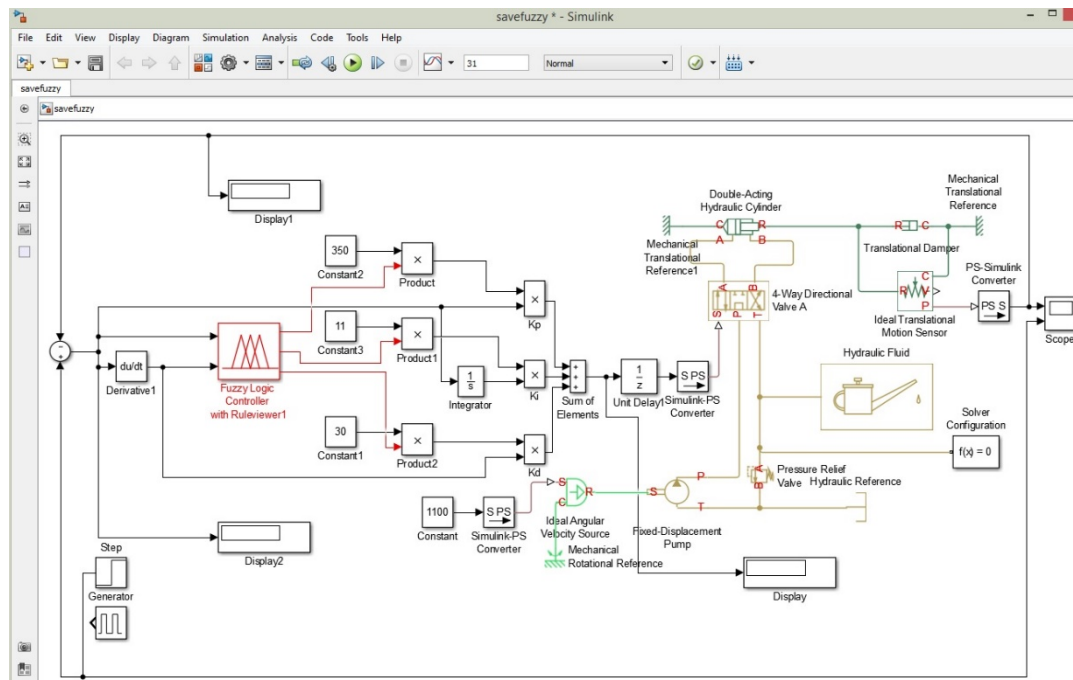
όπου  $T_I = \frac{K_P}{K_I}$  και  $T_D = \frac{K_D}{K_P}$  είναι η ολοκληρωτική και η διαφορική σταθερά χρόνου.

Ο ελεγκτής με τις τρεις παραμέτρους είναι σε θέση να πετύχει αρκετά καλή συμπεριφορά. Η επιτυχία του εξαρτάται από την κατάλληλη επιλογή των κερδών του. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των τιμών του ελεγκτή καθώς, και μεγάλες αλλά και μικρές τιμές στα κέρδη του ελεγκτή μπορούν να φέρουν το σύστημα σε αστάθεια. Πρακτικά τα κέρδη του PID ρυθμίζονται με εμπειρικούς κανόνες που προκύπτουν από έμπειρους χειριστές. Η πειραματική μέθοδος ( manual tuning /trial and error) δεν απαιτεί γνώση μαθηματικής θεωρίας, είναι on-line άρα άμεση, αλλά απαιτεί μεγάλη εμπειρία ιδίως στην πράξη. Το μπλοκ του PID ελεγκτή βρίσκεται μέσα από την βιβλιοθήκη του Matlab/Simulink.



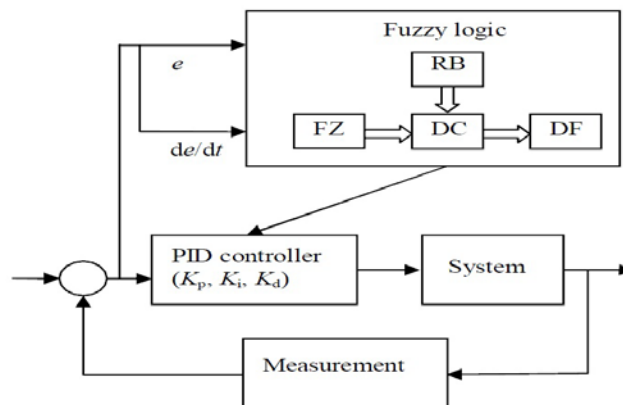
Εικόνα 2.2.1 Παράμετροι PID ελεγκτή στο Matlab

## 2.2.2 Το σύγχρονο σύστημα ελέγχου



Εικόνα 2.2.2 Παράμετροι Fuzzy PID ελεγκτή στο Matlab

Ο σύγχρονος ελεγκτής Fuzzy PID controller λόγω της μη-γραμμικότητας του και κυρίως εξαιτίας της προσαρμοστικότητάς του, αποτελεί μια βέλτιστη λύση στο πεδίο του ελέγχου μιας και η μοντελοποίηση της ελεγχόμενης διαδικασίας, που έχει ζωτικό ρόλο στην εφαρμογή των σύγχρονων τεχνικών ελέγχου, εμπεριέχει χαρακτηριστικά αβεβαιότητας, ασάφειας και πολυπλοκότητας. Έτσι επιτυγχάνει μια εξαιρετικά αυτόνομη συμπεριφορά.



Εικόνα 2.2.3 Διάγραμμα λειτουργίας Fuzzy PID ελεγκτή

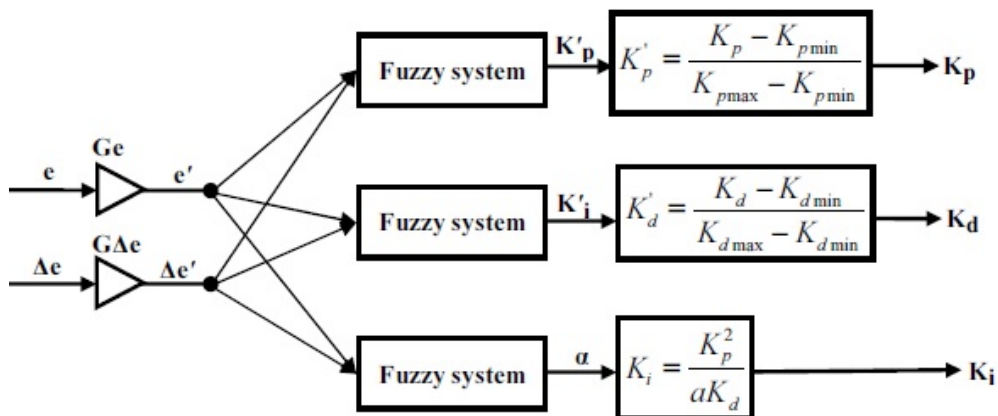
Για την δημιουργία των κανόνων του Fuzzy δίνεται η εντολή "fuzzy" στο command window του Matlab. Ακολουθώντας την διαδικασία Edit-> Add variable..-> Input / Output προθέτονται οι δύο εισοδοι το σφάλμα "Error" και παράγωγος του σφάλματος "Derivate Error" καθώς και οι έξοδοι, οι οποίες είναι τα κέρδη των τριών όρων του ελεγκτή μας  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Ως μηχανή ασαφούς συμπεράσματος ορίστηκε η μέθοδος Mamdani.

Ο FLC δομείται από ένα σύνολο κανόνων που περιγράφουν την επιλογή των κερδών του PID κάτω από συγκεκριμένες λειτουργικές συνθήκες. Καθορίζοντας κατάλληλα το εύρος τιμών των κερδών ώστε να  $K_p \in [K_{pmin}, K_{pmax}]$  και  $K_D \in [K_{Dmin}, K_{Dmax}]$  για την σωστή επιλογή τους. Υποθέτουμε ότι η σταθερά ολοκλήρωσης χρόνου και η διαφορική σταθερά χρόνου συσχετίζονται,

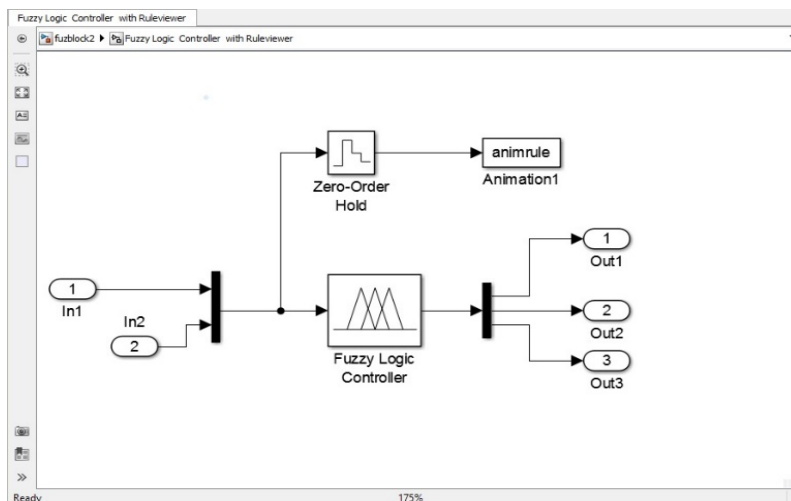
$$T_i = aT_d$$

όπου προκύπτει,

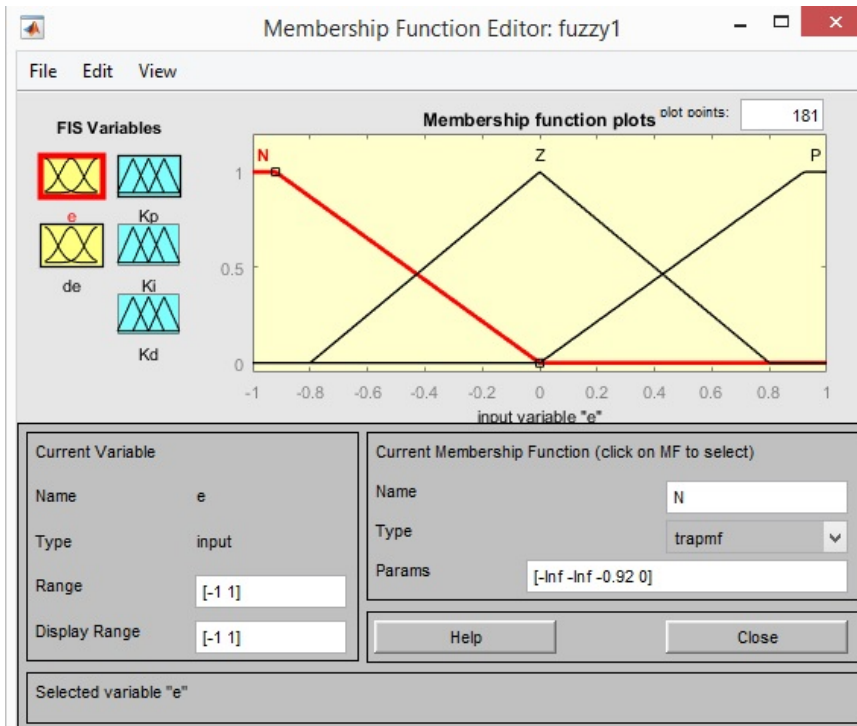
$$K_i = \frac{K_p}{aT_d} = \frac{K_p^2}{aK_d}$$



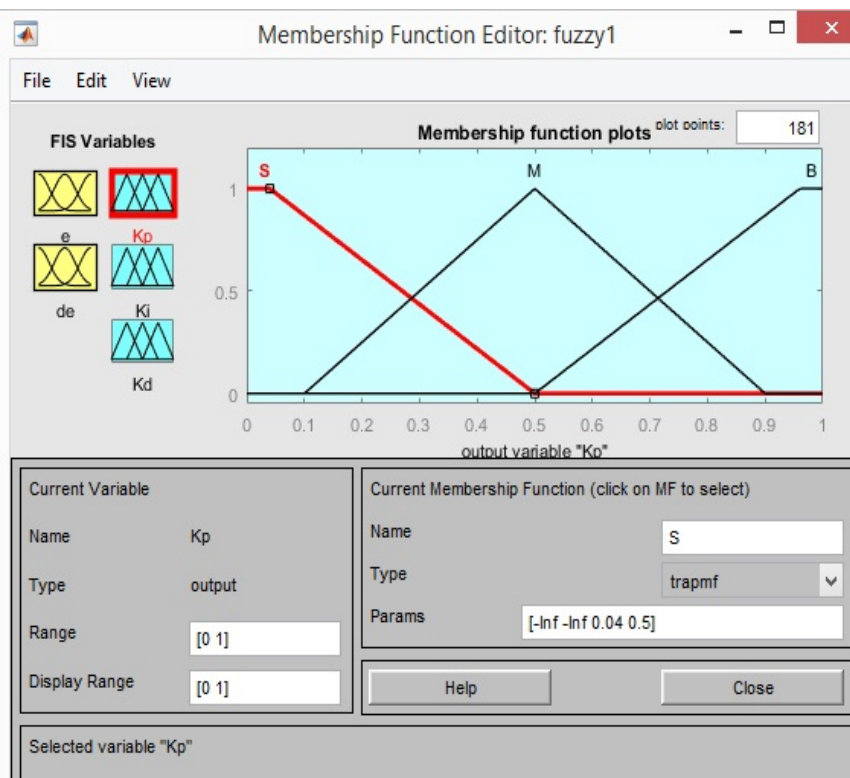
Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται μορφή που πρέπει να έχει η μάσκα του FLC για την ορθή λειτουργία αυτού. Τα input1, input2, αντιστοιχούν στις 2 σταθερές που πρέπει να μετατραπούν στην είσοδο με πεδίο τιμών [0,1] και τα output1, output2, output3 είναι αντίστοιχα τα κέρδη του PID.



Εικόνα 2.2.4 Τροποποίηση της μάσκας του FLC σε Matlab/Simulink



Εικόνα 2.2.5 Συνάρτηση συμμετοχής σφάλματος  $e$  και διαφορά σφάλματος  $De$



Εικόνα 2.2.6 Συνάρτηση συμμετοχής για τα κέρδη του PID

	Χρόνος ανύψωσης	Υπερύψωση (overshoot)	Χρόνος αποκατάστασης (settling time)	Μόνιμο σφάλμα	Αστάθεια
Kp	μείωση	Αύξηση	Μικρή αλλαγή	μείωση	Λάθος επιλογή οδηγεί σε αστάθεια
Ki	Μικρή μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Μηδενισμός	Λάθος επιλογή οδηγεί σε αστάθεια
Kd	Μικρή αλλαγή	Αύξηση	μείωση	Μικρή αλλαγή	Υψηλές συχνότητες

Πίνακας 2.2.1 Αναφορικός πίνακας διαχειρισμού κερδών PID

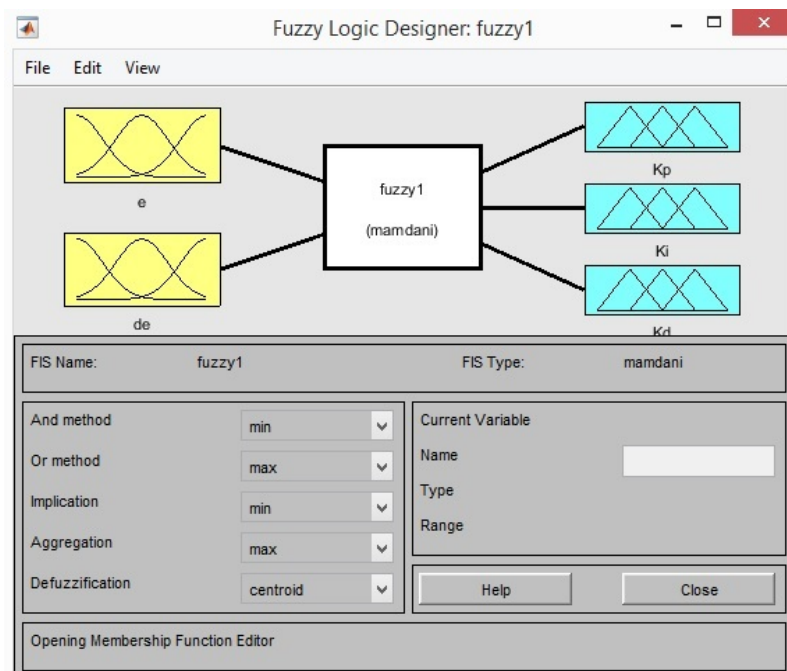
Piston stroke error E	Differential of the piston stroke error ED		
	N	Z	P
N	S/B/S	S/M/S	M/S/S
Z	S/B/M	M/M/M	B/S/M
P	M/S/B	B/M/B	B/B/B

Πίνακας 2.2.2 Οι ασαφείς κανόνες των κερδών

Ως μέθοδος αποσαφοποίησης χρησιμοποιείται η μέθοδος κέντρου βάρους (COA : centroid Of Area),

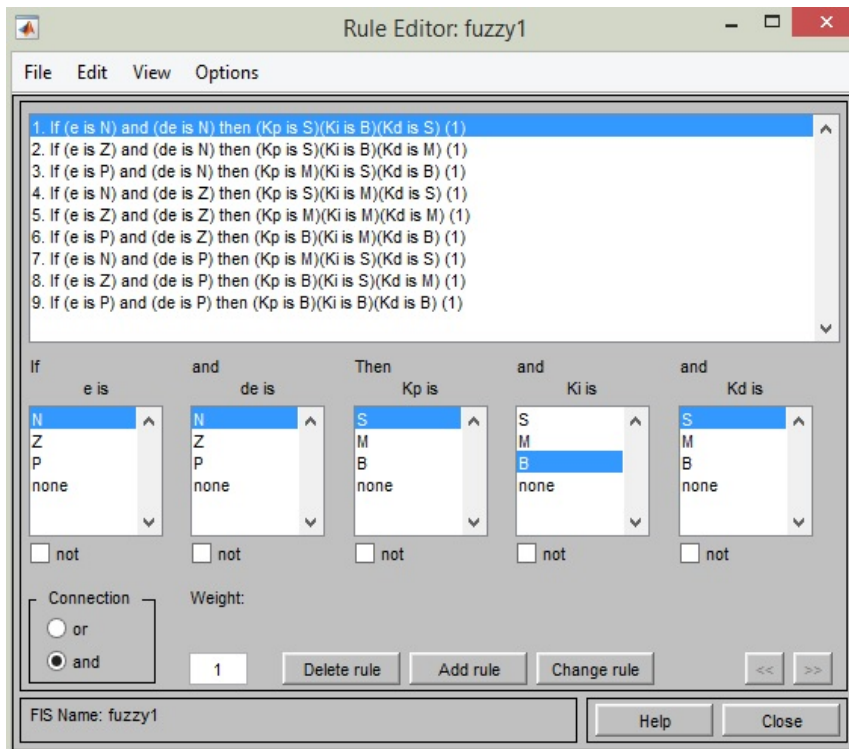
$$Z = \frac{\sum_{\zeta=\alpha}^{\beta} \mu_{\beta}(\zeta) * \zeta}{\sum_{\zeta=\alpha}^{\beta} \mu_{\beta}(\zeta)}$$

όπου  $[\alpha, \beta]$ , είναι το διάστημα στο οποίο εμπεριέχονται τα δείγματα των σημείων για τον υπολογισμό του αθροίσματος.



Εικόνα 2.2.7 Fuzzy Logic Designer



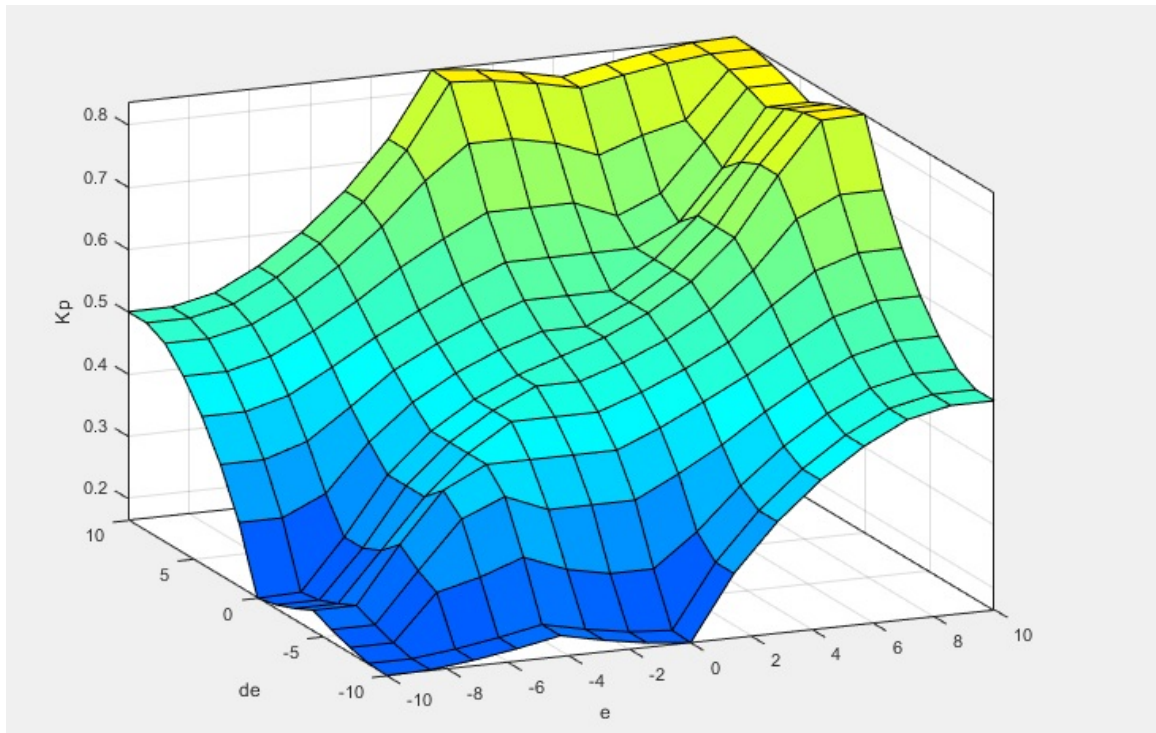


Εικόνα 2.2.8 Κανόνες του FLC

Το ασαφές σύστημα (FLS) έχει 9 κανόνες με συντελεστές βαρύτητας ίσους με μονάδα. Οι κανόνες πηγάζουν από τον πίνακα 2.1.3 και είναι:

1. Εάν  $e$  είναι N και  $De$  είναι N τότε  $Kp$  είναι S,  $Ki$  είναι B,  $Kd$  είναι S
2. Εάν  $e$  είναι Z και  $De$  είναι N τότε  $Kp$  είναι S,  $Ki$  είναι B,  $Kd$  είναι M
3. Εάν  $e$  είναι P και  $De$  είναι N τότε  $Kp$  είναι M,  $Ki$  είναι S,  $Kd$  είναι B
4. Εάν  $e$  είναι N και  $De$  είναι Z τότε  $Kp$  είναι S,  $Ki$  είναι M,  $Kd$  είναι S
5. Εάν  $e$  είναι Z και  $De$  είναι Z τότε  $Kp$  είναι M,  $Ki$  είναι M,  $Kd$  είναι M
6. Εάν  $e$  είναι P και  $De$  είναι Z τότε  $Kp$  είναι B,  $Ki$  είναι M,  $Kd$  είναι B
7. Εάν  $e$  είναι N και  $De$  είναι P τότε  $Kp$  είναι M,  $Ki$  είναι S,  $Kd$  είναι S
8. Εάν  $e$  είναι Z και  $De$  είναι P τότε  $Kp$  είναι B,  $Ki$  είναι S,  $Kd$  είναι M
9. Εάν  $e$  είναι P και  $De$  είναι P τότε  $Kp$  είναι B,  $Ki$  είναι B,  $Kd$  είναι B

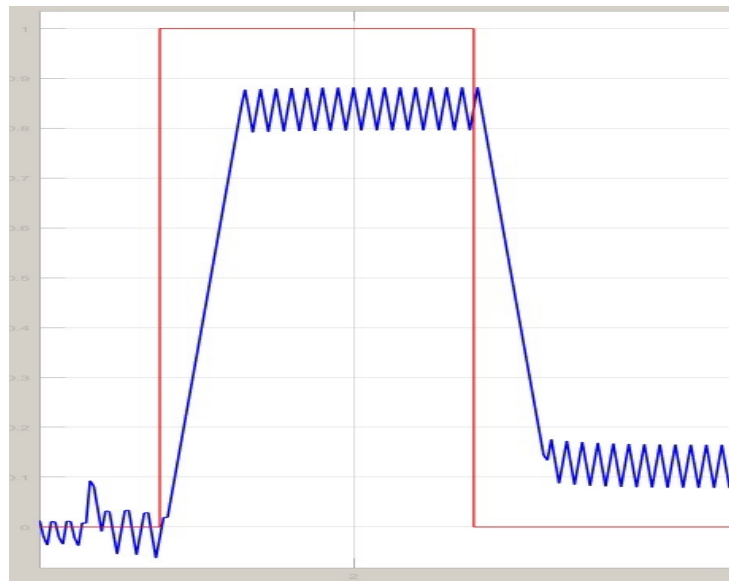
Παρατηρούμε από το τελικό σύνολο εξόδου το σχήμα που δημιουργείται και την επιφάνεια του, που σχηματίζεται ως αποτέλεσμα των κανόνων του FLS.



Εικόνα 2.2.9 Η έξοδος  $K_p$  του FLS συναρτήσει των εισόδων  $e$  και  $De$

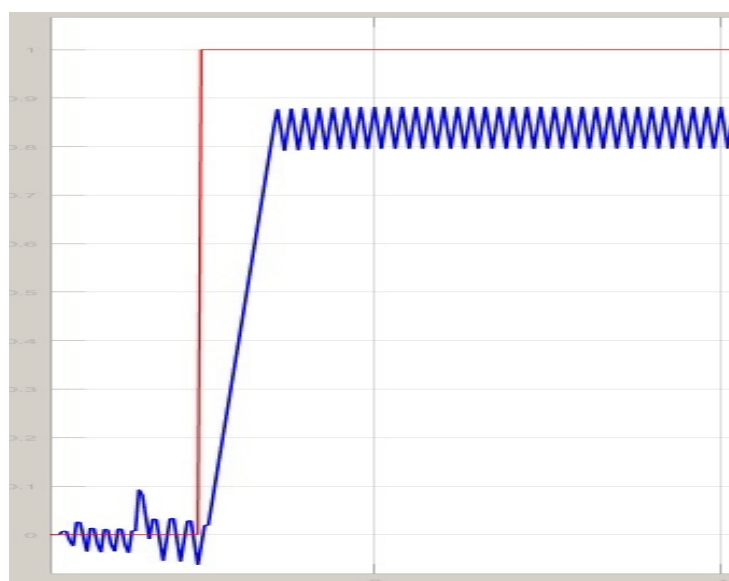
## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Αποτελέσματα

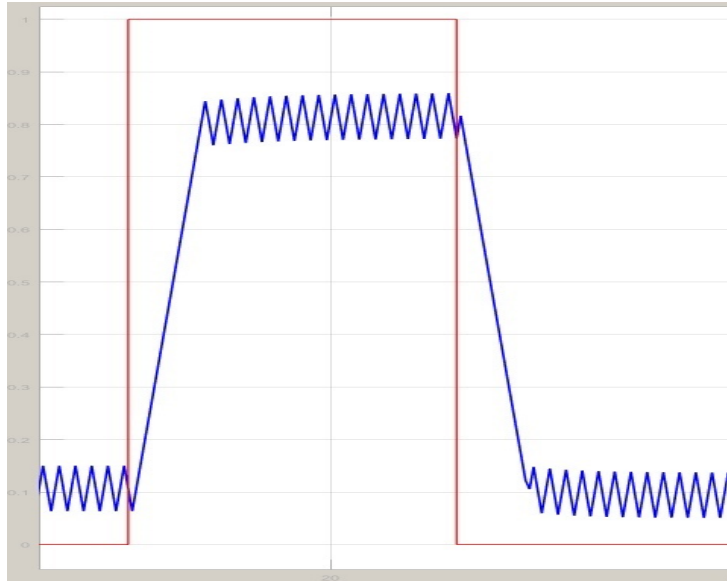


Εικόνα 2.2.10 Παλμική απόκριση συστήματος με Fuzzy PD

Η απόκριση του συστήματος με τον Fuzzy PD ελεγκτή έχει χρόνο ανύψωσης 0.3 δευτερόλεπτα (s), δεν έχει υπερύψωση, χρόνο αποκατάστασης 0,45 δευτερόλεπτα και μόνιμο σφάλμα 9%. Το ποσοστιαίο σφάλμα υιοθετήθηκε με μη αυστηρά κριτήρια.

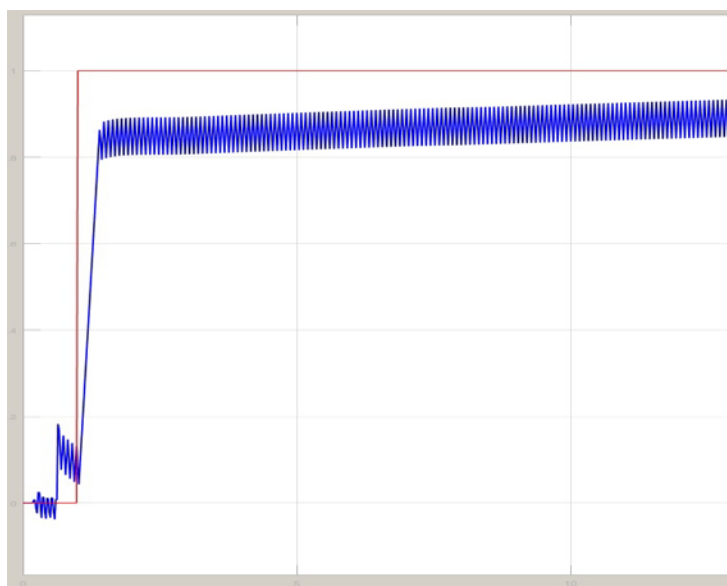


Εικόνα 2.2.11 Βηματική απόκριση συστήματος με Fuzzy PD

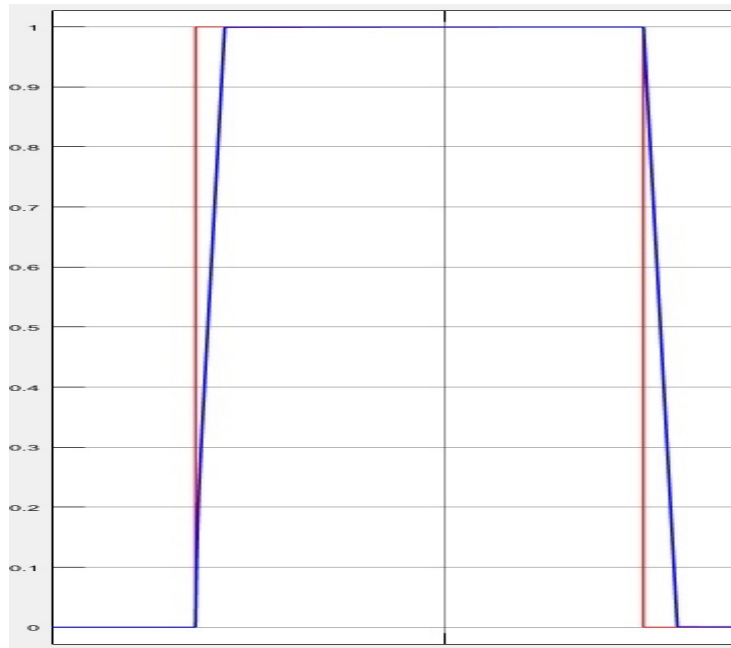


Εικόνα 2.2.12 Παλμική απόκριση συστήματος με Fuzzy PID

Η απόκριση του συστήματος με τον Fuzzy PID ελεγκτή έχει χρόνο ανύψωσης 0.3 δευτερόλεπτα (s), δεν έχει υπερύψωση, χρόνο αποκατάστασης 0,5 δευτερόλεπτα και μόνιμο σφάλμα 9%. Το ποσοστιαίο σφάλμα υιοθετήθηκε με μη αυστηρά κριτήρια. Σε αντίθεση με τον Fuzzy PD ο Fuzzy PID παρουσιάζει μια ανοδική τάση κατά τον χρόνο αποκατάστασης με αποτέλεσμα να αυξάνει τον καθεαυτού χρόνο και σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα να οδηγεί σε αστάθεια. Παρατηρείτε επίσης μια έντονη (μη επιτρεπτή) υπερύψωση πριν την εναρξη της βηματικής εισόδου.

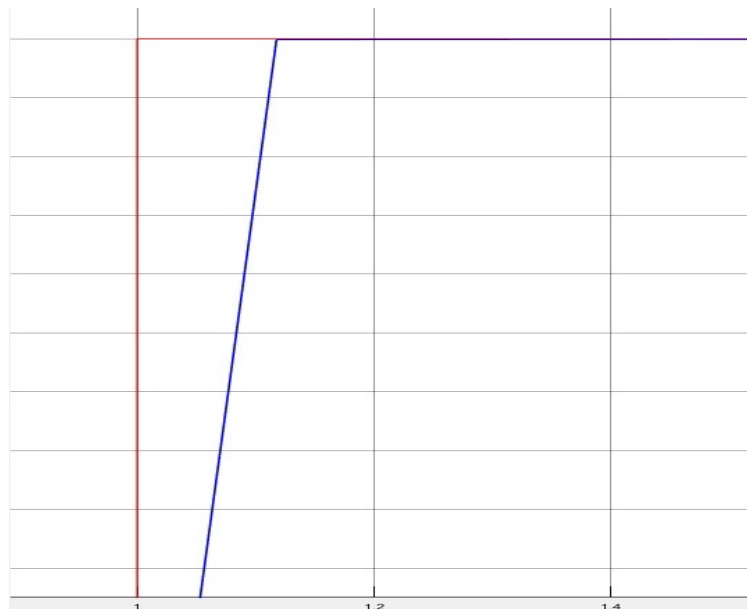


Εικόνα 2.2.13 Βηματική απόκριση συστήματος με Fuzzy PID

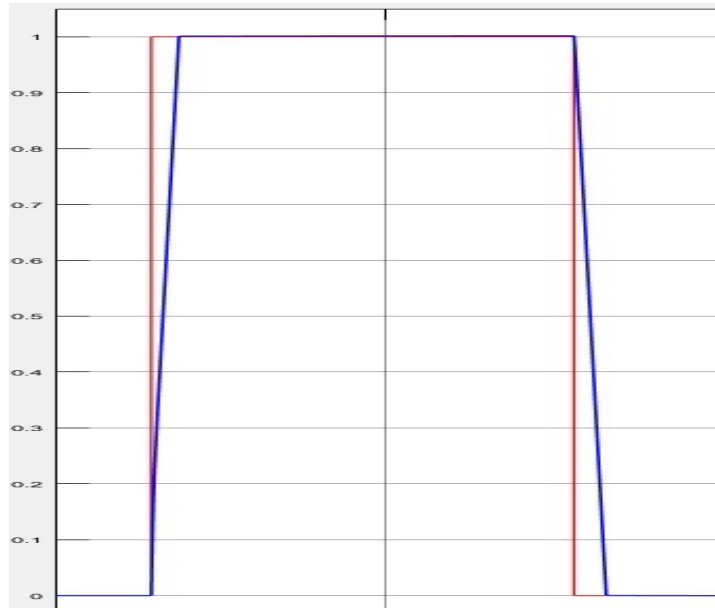


Εικόνα 2.2.14 Παλμική απόκριση συστήματος με PD

Η απόκριση του συστήματος με τον PD ελεγκτή έχει χρόνο ανύψωσης 0.1 δευτερόλεπτο (s), δεν έχει υπερύψωση, δεν έχει χρόνο αποκατάστασης και δεν έχει μόνιμο σφάλμα. Το σύστημα ακολουθά πιστά την είσοδο που του εισήχθη.



Εικόνα 2.2.15 Βηματική απόκριση συστήματος με PID



Εικόνα 2.2.16 Παλμική απόκριση συστήματος με PID

Η απόκριση του συστήματος με τον PID ελεγκτή έχει χρόνο ανύψωσης 0.1 δευτερόλεπτο (s), δεν έχει υπερύψωση, δεν έχει χρόνο αποκατάστασης αλλά παρουσιάζει ελάχιστο μόνιμο σφάλμα της τάξης του 0.2%.



Εικόνα 2.2.17 Βηματική απόκριση συστήματος με PID

## Συμπεράσματα και Μελλοντικές βελτιστοποιήσεις

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση, συμπεραίνεται ότι με την είσοδο του ολοκληρωτικού όρου I στο σύστημα ελέγχου, είτε στην περίπτωση του κλασσικού ελεγκτή είτε στον FLC, εισάγονται μικρές αρνητικές αλλοιώσεις στην απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος. Ο PD ελεγκτής (αναλογικός-διαφορικός) ακολουθεί πιστά την είσοδο που εφαρμόζεται στο ελεγχόμενο σύστημά, τόσο στην περίπτωση της step όσο και στις impulse εισόδου και έχοντας εξαλείψει το μόνιμο σφάλμα, αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή ως ελεγκτής για το θεωρητικό μοντέλο του υδραυλικού συστήματος. Από την άλλη ο ελεγκτής PID (αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός) παρουσιάζει ένα ελάχιστο μόνιμο σφάλμα κατά την απόκριση σταθεράς κατάστασης, που δεν υπήρχε με την χρήση του PD ελεγκτή, όπως επίσης παρατηρείται ότι δεν υπάρχει ταχύτερη απόκριση στο σύστημα με την χρήση του I (ολοκληρωτικού όρου).

Ο αυτοπροσαρμοζόμενος ελεγκτής Fuzzy PD, με ένα σύνολο 9 κανόνων, έχει ικανοποιητικό χρόνο αποκατάστασης, παρουσιάζει ίδιο μόνιμο σφάλμα με τον Fuzzy PID αλλά προσδίδει στην απόκριση του συστήματος μια ομαλότητα. Στην περίπτωση του Fuzzy PID ελεγκτή παρατηρείται απώλεια της ομαλότητας που υπήρχε Fuzzy PD. Με την χρήση του ολοκληρωτικού όρου I δεν μηδενίζεται το μόνιμο σφάλμα και χειροτερεύει τη μεταβατική συμπεριφορά και προσθέτοντας απότομες διακυμάνσεις στην απόκριση του συστήματος. Χαρακτηριστικά, με βηματική είσοδο παρατηρείται η συνεχόμενη ανοδική τάση της απόκρισης του συστήματος.

Μετά από κατάλληλη εκτίμηση των κερδών των ελεγκτών και μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης συμπεραίνεται ότι, ο ελεγκτής PD καθίστατε πιο αξιόπιστος και άρα καθίσταται καταλληλότερος, για τον έλεγχο αυτού του τύπου συστημάτων από τον PID, τόσο στην κλασσική "έκδοση" όσο και στην αυτό-προσαρμοζόμενη Fuzzy. Προσδίδοντας σταθερότητα στην απόκριση του συστήματος και ταχύτητα αποτελεί την πιο ασφαλή επιλογή και όλα αυτά στο ιδανικό περιβάλλον της εξομοίωσης, χωρίς την είσοδο θορύβων και πολλών άλλων εξωτερικών παραγόντων που μπορούν να αλλοιώσουν την αποδοτικότητα του συστήματος στην πραγματικότητα.

Για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, πέρα από την ακριβέστερη εκτίμηση των κερδών του ελεγκτή, μπορούν να εφαρμοστούν περισσότεροι κανόνες στον FLC. Ένα σύστημα από 5\*5 [25 rules] κανόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για πλουσιότερη εξαγωγή συμπερασμάτων που θα οδηγούν σε καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος, πάντα όμως σε ένα λογικό πλαίσιο, διότι η εφαρμογή υπερβολικού αριθμού κανόνων απαιτεί τεράστια επεξεργαστική ισχύ και πάρα πολύ χρόνο για τον υπολογισμό.

Κάνοντας ένα βήμα πίσω στην διαδικασία σχεδιασμού του FLC, είναι δυνατή η επιλογή της μεθόδου Sugeno ως μηχανή ασαφούς συμπεράσματος. Η Sugeno είναι υπολογιστικά αποδοτική, λειτουργεί καλά με γραμμικές τεχνικές (π.χ. PID ελεγκτής), με τεχνικές βελτιστοποίησης και προσαρμογής, έχει εγγυημένη συνέχεια στην επιφάνεια εξόδου του συστήματος και είναι κατάλληλη για μαθηματική ανάλυση.

Μια άλλη μέθοδος, είναι με τη χρήση Τεχνικών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), έναν νέο επιστημονικό κλάδο με πλούσια υπολογιστικά εργαλεία για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης και εκμάθησης. Η μεθοδολογία που ακολουθείται από τα ΤΝΔ δεν προαπαιτεί την ύπαρξη μαθηματικών μοντέλων, δεν υπάρχει ανάγκη χαρακτηρισμού του προβλήματος, διότι "εκπαιδεύουν" το σύστημα ελέγχου να προσαρμόζεται, ανεβάζοντας έτσι την "εμπειρία" του. Απαιτείται χρόνος για να συλλεχθεί όλη αυτή η γνώση (δοκιμή & σφάλμα), το "τίμημα" της προσαρμοστικότητας, και καμία φορά η εκπαίδευση του συστήματος μπορεί να γίνει από δύσκολη ως αδύνατη. Στην περίπτωση ενός PID ελεγκτή τα ΤΝΔ βρίσκουν εύκολη εφαρμογή με πολύ εντυπωσιακά αποτελέσματα.



### *Βιβλιογραφική αναφορά*

- [1] Thesis: “A comparative Investigation into Proportional-Integral-Derivative Control Methods for Accurate Position Control of Linear Pneumatic Actuators”, M.G. Papoutsidakis, University of the West of England, Bristol, UK, 2004.
- [2] Διπλωματική εργασία με θέμα: Έλεγχος κινήσεων στα πνευματικά συστήματα, Θεμέλης Νικόλαος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
- [3] Φύλο πληροφοριών: Εισαγωγή στα Πνευματικά Συστήματα, Λιγνός Ι, Μπουσλής Π, Πολίτης Γ., Χαμηλοθώρης Γ., τομέας ηλεκτρολογικός, Π.Ε.Κ Ιωαννίνων, 2001.
- [4] Αυτοματισμοί και Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου, Α΄ τεύχος, Λιγνός Ι, Μπουσλής Π, Πολίτης Γ., Χαμηλοθώρης Γ., τομέας ηλεκτρολογικός, Αθήνα 2001.
- [5] Paper #: A High Performance Pneumatic Force Actuator System Part 1 - Nonlinear Mathematical Model, Edmond Richer and Yildirim Hurmuzlu, Southern Methodist University, School of Engineering and Applied Science, Mechanical Engineering Department, Dallas, 2001.
- [6] Paper #: Mathematical And Simulink Model Of The Pneumatic System With Bridging Of The Dual Action Cylinder Chambers, Vladislav Blagojević, Miodrag Stojiljković, Faculty of Mechanical Engineering Niš, University of Niš, Vol. 5, No 1, 2007.
- [7] Thesis: “A comparative Investigation into Proportional-Integral-Derivative Control Methods for Accurate Position Control of Linear Pneumatic Actuators”, M.G. Papoutsidakis, University of the West of England, Bristol, UK, 2004.
- [8] Paper #: An Analysis of a Pneumatic Servo System and Its Applications to a Computer-Controlled Robot, S. Liu and J. E. Bobrow, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol 110, PP 228-235, 1988.
- [9] Paper #: Non-conventional adaptive control of a servopneumatic unit for vertical load positioning, C. Ferraresi, P. Giraudo, G. Quaglia, West Technical Conference, 1994.
- [10] Paper #: Variable Structure Control of a Pneumatic Actuator, Tang J. and Walker G., Transactions of the ASME, vol.117, pp.88-92, 1995.
- [11] Διπλωματική εργασία με θέμα: Έλεγχος ανεμογεννήτριας επαγωγικής μηχανής βραχυκυκλωμένου κλωβού με ασαφή λογική, Κόκκοτας Κωνσταντίνος, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013.
- [12] Εργαστηριακές Σημειώσεις: Αισθητήρες - Interfaces, Χρήστος Τσώνος, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Τ.Ε.Ι Στερεάς Ελλάδας, 2011.
- [13] Alexander G.Loukianov, Jorge Rivera, Yuri V.Orlov and Edgar Yoshio, Morales Teraoka, “Robust trajectory tracking for an electrohydraulic actuator. IEEE Trans Industrial Electronics”
- [14] Sahazati md rozali, Mohd Fuaad Rahmat, Assoc. Prof. Ir. Dr. Norhaliza Abdul Wahab, Rozaimi Ghazali, “PID controller design for an industrial hydraulic actuator with servo system”
- [15] Ritu Shakya<sup>1</sup>, Kritika Rajanwal, Sanskriti Patel and Smita Dinkar “Design and Simulation of PD, PID and Fuzzy Logic Controller for Industrial Application”
- [16] S.R.Vaishnav and Z.J.Khan, “Design and Performance of PID and Fuzzy Logic Controller with Smaller Rule Set for Higher Order System,” Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2007 WCECS 2007, October 24-26, 2007.

- [17]Tatiana Minav, L. Laurila, J. Pyrhönen, “Self-tuning-parameter fuzzy PID speed control in an electro-hydraulic forklift”
- [18]Y. Sabzehmeidani , M. Mailah, M. Hussein, E. Gatavi, M.Z. Md Zain, “A Hybrid Fuzzy-based Robust Controller for Pneumatically Actuated Micro Robot, International Review of Modelling and Simulations (IREMoS)”, Vol. 3. n. 6, December 2010
- [19]M. Babita, K. Belardi, “Fuzzy feedback linearization adaptive control for nonlinear systems via a NN-based approach, International Review of Automatic control” (IREACO), Vol. 4. n. 2, March 2011.
- [20] Ayman A. Aly “Model Reference PID Control of an Electro-hydraulic Drive”