



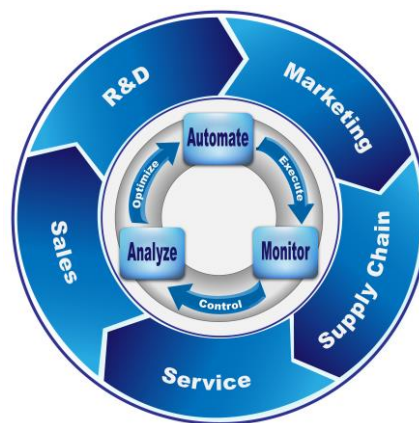
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΝΤΟΝΤΟΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών» του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιώς Τεχνολογικού Τομέα.

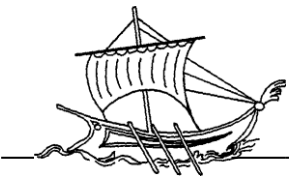
Πρόγραμμα μεταπτυχιακών Σπουδών:

Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών



ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Φεβρουάριος 2018



«Αφιερωμένο στην Οικογένεια μου»



ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ντόντος Κωνσταντίνος,

του Δημητρίου με αριθμό μητρώου 31 φοιτητής του Μεταπτυχιακού Προγράμματος "ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ" του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Ο Δηλών

ΝΤΟΝΤΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ

Ημερομηνία

27/02/2018



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω θερμά τις ευχαριστίες μου σε ένα σύνολο ανθρώπων που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου, στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα "*Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών*".

Θα ήθελα να ξεκινήσω τις ευχαριστίες από τον Διευθυντή του προγράμματος Δρ. Δ. Τσελέ καθηγητή, που με παρότρυνε να παρακολουθήσω το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών καθώς και το σύνολο των καθηγητών του μεταπτυχιακού προγράμματος που μου μετέδωσαν τις γνώσεις τους.

Οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, στον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ. Χρ. Δρόσο, ο οποίος με ενθάρρυνε και με παρότρυνε να εμβαθύνω στο θέμα που είχα επιλέξει καθώς διαπίστωσε ότι ήμουν ενθουσιασμένος με αυτό. Ήταν εκεί πάντα πρόθυμος με υπομονή να απαντά στις ερωτήσεις μου, τους προβληματισμούς μου, να με καθοδηγεί και να με ενθαρρύνει ηθικά να συνεχίσω αυτό που ήδη είχα ξεκινήσει. Οι υποδείξεις του και οι διορθώσεις του ήταν σημαντικές και βασίζονταν στο άρτιο επιστημονικό του υπόβαθρο.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου σε όλη την διάρκεια παρακολούθησης του μεταπτυχιακού προγράμματος και με στήριξαν ηθικά να συνεχίσω. Για αυτό το λόγο, αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία στην οικογένεια μου.



Περίληψη (ελληνικά)

Η σημασία της αυτοματοποίησης στις βιομηχανίες των διεργασιών έχει αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια. Στις αναπτυγμένες βιομηχανικές χώρες, ο αυτοματισμός των διεργασιών συμβάλλει στην ενίσχυση της ποιότητας των προϊόντων, στην εξάπλωση των προϊόντων, στη βελτίωση της ασφάλειας των διαδικασιών και της διαθεσιμότητας των εγκαταστάσεων, στην αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων και στη μείωση των εκπομπών. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια εκτενής μελέτη του αυτοματισμού διεργασιών μέσω της βιβλιογραφικής έρευνας, και της ανάδειξης των μελλοντικών τάσεων του.

Λέξεις-Κλειδιά: αυτοματισμός διεργασιών, βιομηχανικός αυτοματισμός, ρομποτική, τεχνητή νοημοσύνη, συστήματα ελέγχου

Abstract (English)

The importance of automation in the process industries has increased dramatically in recent years. In the highly industrialized countries, process automation serves to enhance product quality, master the whole range of products, improve process safety and plant availability, and efficiently utilize resources and lower emissions. In this thesis we are going to study the process automation through bibliographic research, and to showcase its future trends.

Key words: process automation, industrial automation, robotics, artificial intelligence, control systems



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Σημαντικότητα	8
1.2 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας	9
ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	
2.1 Βασικές Έννοιες	10
2.2 Παραδείγματα	14
2.3 Συσκευές Διεργασιών	19
2.4 Δυναμικό Μοντέλο Διεργασίας	22
2.5 Σύνοψη	28
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	
3.1 Εισαγωγικό Πλαίσιο	29
3.2 Αρχιτεκτονική Συστημάτων Βιομηχανικού Ελέγχου	39
3.3 Λογισμικό	46
3.4 Υλοποίηση	50
3.5 Σύνοψη	63
ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	
4.1 Εννοιολογικό Πλαίσιο	64
4.2 Διάγραμμα Βαθμίδων	70
4.3 Δυναμική Συμπεριφορά Συστήματος Ελέγχου	74
4.4 Σύνοψη	75
ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	
5.1 Μοντέρνος Έλεγχος	76
5.2 Βέλτιστος Έλεγχος	77
5.3 Ευφυής Έλεγχος	78
5.4 Μηχανική Μάθηση	80
5.5 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	81



5.6 Έξυπνα Αισθητήρια	83
5.7 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT)	85
5.8 Ρομποτική	88
5.9 Μοντέρνες Τάσεις στον Βιομηχανικό Αυτοματισμό	91
5.9 Σύνοψη	92
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
6.1 Συζήτηση	93
6.2 Μελλοντική Επέκταση Εργασίας	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	
PAPER	



1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σημαντικότητα

Οι βιομηχανικές διεργασίες διακρίνονται συνήθως σε φυσικές, χημικές και βιολογικές-βιοχημικές. Ο έλεγχος βιομηχανικών διεργασιών αφορά τον έλεγχο μονάδων που παρασκευάζουν υλικά όπως χημικά, χαρτί, μέταλλα, τσιμέντα, ενέργεια κ.λπ. Λόγω της ιδιότητας των προϊόντων, ο έλεγχος γίνεται με απλές βαλβίδες ή ενεργοποιητές. Η κατάσταση του υλικού υπό επεξεργασία μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις συνήθως αναλογικών στοιχείων.

Η πρακτική κατανόηση της εφαρμογής αυτόματου ελέγχου στις διεργασίες υποβοηθείται από την εξέταση των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίησή του. Κάθε βρόχος αυτόματου ελέγχου περιλαμβάνει τα εξής βασικά εξαρτήματα (Basu and Debnath, 2014; Μπάφας και Σιέττος, 2015):

- *Αισθητήριο (sensor)*, για τη μέτρηση της μεταβλητής ελέγχου.
- *Μεταδότη (transmitter)*, για μετατροπή της μέτρησης του αισθητηρίου σε ισοδύναμο σήμα.
- *Ελεγκτή (controller)*, που συγκρίνει το σήμα του μεταδότη με την επιθυμητή τιμή και παράγει αντίστοιχο σήμα εξόδου που οδηγεί τη μεταβλητή χειρισμού.
- *Ρυθμιστική βάνα (control valve)* που μεταβάλλει την παροχή χειρισμού.

Ο αυτοματισμός διεργασιών (*process automation*) θεωρείται ένας από τους πλέον κρίσιμους τομείς στην βιομηχανία. Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για καλύτερη διαχείριση και εξοικονόμηση φυσικών πόρων (πρώτων υλών & ενέργειας) από τη μια, και της προστασίας του περιβάλλοντος από την άλλη, αυξάνει την πολυπλοκότητα των βιομηχανιών και αντίστοιχα τις απαιτήσεις από τα άλλα συστήματα ελέγχου ή ρύθμισης. Σήμερα, ένα σύστημα ελέγχου πρέπει να εξασφαλίζει, την ασφάλεια, την προστασία του περιβάλλοντος, τα προϊόντα εντός προδιαγραφών και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Παράλληλα, πρέπει να είναι εύχρηστο και «φιλικό» προς τους χρήστες/χειριστές παρέχοντας ταχεία διάγνωση λειτουργικών προβλημάτων, μειωμένη πιθανότητα ανθρώπινων λαθών, ευκολία στην αλλαγή λειτουργικών συνθηκών και την ελάχιστη δυνατή καταπόνηση κατά την διάρκεια της εργασίας τους. Τέλος, το σύστημα πρέπει να είναι αξιόπιστο, χωρίς λειτουργικές αστοχίες και χωρίς μεγάλες απαιτήσεις συντήρησης, παρέχοντας τη μεγαλύτερη δυνατή διαθεσιμότητα (Βελώνη, 2011; Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991; Dorf and Bishop, 2016; Golnaraghi and Kuo, 2011).

Σε αυτό το πλαίσιο, οι σύγχρονες εξελίξεις στην επιστήμη του αυτόματου ελέγχου και των τεχνολογιών που την υποστηρίζουν, σε συνδυασμό με άλλα πεδία επιστήμης & τεχνολογίας (π.χ. τεχνητή νοημοσύνη, επικοινωνίες κ.α.) οδηγούν



τον αυτοματισμό βιομηχανικών διεργασιών σε νέες αλλαγές και αναπροσαρμογές, που θα επηρεάσουν δραματικά τις κοινωνίες και οικονομίες τις επόμενες δεκαετίες μέσω της *τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης* (Ross, 2016).

1.2 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτενής μελέτη του αυτοματισμού διεργασιών μέσω της βιβλιογραφικής έρευνας, και η ανάδειξη των μελλοντικών τάσεων του. Ειδικότερα, οι *στόχοι* της εργασίας είναι:

- η θεωρητική ανάλυση των διεργασιών,
- η θεωρητική ανάλυση των αντίστοιχων μεθόδων και τεχνολογιών, και
- οι μελλοντικές μέθοδοι και τεχνικές που θα επικρατήσουν στον αυτοματισμό διεργασιών.



2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

2.1 Βασικές Έννοιες

Οι διεργασίες διακρίνονται συνήθως σε φυσικές, χημικές και βιολογικές-βιοχημικές (Σχ.1). Ειδικότερα, με τον όρο φυσικές διεργασίες εννοούμε τις μετατροπές που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικό περιβάλλον και δεν περιλαμβάνουν χημική αντίδραση. Οι μετατροπές αυτές μπορεί να αποσκοπούν για παράδειγμα στην παραγωγή ενός προϊόντος με διαφορετικό περιεχόμενο από τις πρώτες ύλες (χημική βιομηχανία), στην αξιοποίηση μιας ενεργειακής πηγής (ενεργειακή βιομηχανία) ή στον εξευγενισμό ενός τροφίμου (βιομηχανία τροφίμων) (Μποντοζόγλου, 2015).

<u>Φυσικές</u>	<u>Χημικές</u>	<u>Βιοχημικές</u>
Οι "περιφερειακές" διεργασίες που προηγούνται ή έπονται της χημικής διεργασίας είναι οι φυσικές διεργασίες	Είναι οι διεργασίες όπου λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις κάθε είδους και είναι αντικείμενο μελέτης της τεχνολογίας χημικών αντιδραστήρων και διεργασιών.	Είναι η μελέτη των χημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται σε ή από ζωντανούς οργανισμούς, καθώς και των ουσιών που περιλαμβάνουν (αλλά όχι μόνο) τη λεγόμενη «ζωντανή ύλη».
Ο χειρισμός και η ανάμιξη των αντιδρώντων κι ο διαχωρισμός και καθαρισμός των προϊόντων περιλαμβάνουν φυσικές αλλαγές.	Οι αντιδραστήρες μπορεί να είναι μικρά δοχεία ανάμιξης ή ακόμη και αγωγοί αρκετών εκατοντάδων μέτρων.	

Σχήμα 1. Οι κύριοι άξονες Ανάλυσης διεργασιών (προσαρμογή από Τεκερλοκοπούλου, 2015).

Γενικά, μπορούμε να διακρίνουμε τις βιομηχανικές διεργασίες σε: (α) *ανάμιξης* και (β) *διαχωρισμού συστατικών*. Υπάρχουν επίσης και διεργασίες όπου ένα συστατικό ή μίγμα, απλώς αλλάζει μορφή (π.χ. ελάττωση μεγέθους στερεών), καθώς και διεργασίες μεταφοράς υλικών, που αποτελούν ένα ξεχωριστό κλάδο, αυτό της Τεχνικής Σωματιδίων (Μαρίνος - Κουρής και Μαρούλης, 1993).

Η ανάλυση των διεργασιών ενδιαφέρει διάφορες ειδικότητες μηχανικών όπως χημικούς, μηχανολόγους και μεταλλειολόγους μηχανικούς, τους μηχανικούς περιβάλλοντος, τους έμβιο-μηχανικούς, τους χημικούς τους τεχνολόγους τροφίμων και άλλες ειδικότητες, όπως αυτές των αυτοματιστών μηχανικών ή μηχανικών συστημάτων ελέγχου (Μποντοζόγλου, 2015; Κίνγκ, 1994). Επίσης, οι κύριοι άξονες της ανάλυσης διεργασιών αφορά (Σχ.2)(Himmelblau, 2006):

- αλλαγή κλίμακας μεγέθους (εργαστήριο→βιομηχανία),

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR



- ισοζύγια μάζας – ενέργειας, και
- αριστοποίηση διεργασιών.



Σχήμα 2. Οι κύριοι άξονες Ανάλυσης διεργασιών (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

Συγκεκριμένα, για το σχεδιασμό και τη βέλτιστη λειτουργία των *βιομηχανικών διεργασιών*, υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί που καθορίζονται από τους εξής παράγοντες (Himmelblau, 2006):

- προδιαγραφές προϊόντων,
- ασφάλεια λειτουργίας βιομηχανικής εγκατάστασης,
- λειτουργικοί και κατασκευαστικοί περιορισμοί,
- κανονισμοί προστασίας του περιβάλλοντος,
- οικονομικοί κ.α.

Η ικανοποίηση των παραπάνω προδιαγραφών και λειτουργικών περιορισμών, προϋποθέτει τη συνεχή μέτρηση και αξιολόγηση ορισμένων μεταβλητών της διεργασίας (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, χημική δομή κλπ.), και την κατάλληλη διαχείριση ορισμένων επιλεγμένων μεταβλητών ελέγχου.

Οι *βιομηχανικές φυσικές διεργασίες* κατατάσσονται σε (Μαρίνος - Κουρής και Μαρούλης, 1993; Himmelblau, 2006):

- *Μηχανικές Διεργασίες (Τεχνική Σωματιδίων)*, με κινητήρια δύναμη το μηχανικό έργο:
 - μεταβολή μεγέθους, ○ Ρευστοποίηση,
 - μαζική ροή,
 - ανάμιξη,
 - μεταφορά και Αποθήκευση στερεών.
- *Υδρομηχανικές Διεργασίες*, με κινητήρια δύναμη τη βαθμίδα (διαφορά) πίεσης:
 - διακίνηση υγρών
 - ανάδευση υγρών,
 - συμπίεση/μεταφορά αερίων, και



- διαχωρισμοί ετερογενών μιγμάτων (κατακάθιση, φυγοκέντριση, υδρομηχανική ταξινόμηση/εμπλουτισμός μεταλλευμάτων).
- *Θερμικές Διεργασίες (εναλλαγή θερμότητας)*, με αρχή λειτουργίας ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ στερεάς επιφάνειας και δύο εκατέρωθεν ρευστών φάσεων, και κινητήρια δύναμη, την θερμοκρασιακή βαθμίδα
 - θέρμανση,
 - ψύξη,
 - συμπύκνωση,
 - υγροποίηση,
 - κατάψυξη,
 - ατμοπαραγωγή, και
 - εξάτμιση.
- *Φυσικοί Διαχωρισμοί (μεταφορά μάζας)*, με αρχή λειτουργίας τη μεταφορά συστατικών από μία φάση σε μια άλλη μέσω μοριακής διάχυσης, την ανταλλαγή διαχεόμενων συστατικών μεταξύ φάσεων. Η *διάχυση*, ως πιο αργή διεργασία, καθορίζει την ταχύτητα της διεργασίας, με κινητήρια δύναμη την βαθμίδα συγκέντρωσης ή γενικότερα χημικού δυναμικού (με βοήθεια της πίεσης ή/και θερμοκρασίας). Διακρίνεται σε:
 - απορρόφηση / προσρόφηση (υγρό – αέριο),
 - απόσταξη (υγρό – αέριο) ○ Εκχύλιση (υγρό – υγρό),
 - προσρόφηση (υγρό/αέριο – στερεό) ○ κρυστάλλωση / έκπλυση (υγρό – στερεό),
 - ύγρανση / ξήρανση (υγρό – στερεό), και
 - διέλευση από μεμβράνες, που ανάλογα με το υλικό της μεμβράνης (οργανική, ανόργανη) μπορεί να θεωρηθεί συγγενής προς την απορρόφηση/εκρόφηση ή την προσρόφηση.

Οι *χημικές διεργασίες* είναι οι διαδικασίες που υφίστανται οι οργανικές ενώσεις προκειμένου η χημική τους δομή να αλλάξει (Σχ.3). Αυτό γίνεται για να βελτιωθούν κατά βούληση ορισμένες ιδιότητες των ενώσεων αυτών ή για να προκύψουν εντελώς νέα προϊόντα με διαφορετικές ιδιότητες. Έτσι, για παράδειγμα, με διασπάσεις, συμπυκνώσεις και πολυμερισμούς απλών πρώτων υλών, δηλαδή μονομερών, και, στη συνέχεια, με οξείδωση, αναγωγή, σουλφόνωση, νίτρωση και αλκυλίωση των ενδιάμεσων προϊόντων, λαμβάνονται, προϊόντα όπως, χρώματα, πολυμερή, απορρυπαντικά, φάρμακα, εντομοκτόνα, καλλυντικά κλπ. Πιο συγκεκριμένα, οι πλέον σημαντικοί παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις χημικές διεργασίες είναι (Σδούκος και Πομώνης, 2010; Schuegerl, 1987; Tominaga and Tamaki, 1997):

- *μετατροπή (conversion)*, που αφορά τα αντιδρώντα συστατικά. Είναι το πηλίκο της ποσότητας αυτού του συστατικού που αντέδρασε, δίνοντας όχι μόνο το επιθυμητό προϊόν αλλά και τα διάφορα παραπροϊόντα, προς την αρχική ποσότητα της τροφοδοσίας, πολλαπλασιασμένο επί 100, όπως φαίνεται στο μαθηματικό τύπο που ακολουθεί:



$$\text{Μετατροπή \%} = \frac{\text{Ποσότητα που αντέδρασε}}{\text{Αρχική ποσότητα}} \times 100 \quad (1)$$

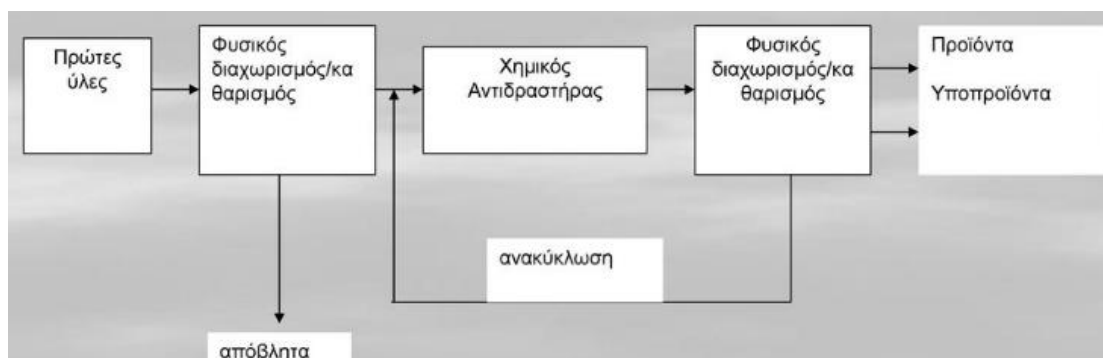
- *εκλεκτικότητα (selectivity)*, που αναφέρεται στα προϊόντα αντίδρασης. Είναι το πηλίκο της ποσότητας του προϊόντος αντίδρασης προς την ποσότητα της μετατροπής κάποιου από τα αντιδρώντα, όπως φαίνεται στο μαθηματικό τύπο που ακολουθεί:

$$\text{Εκλεκτικότητα \%} = \frac{\text{Προϊόν αντίδρασης}}{\text{Μετατροπή αντιδρώντος}} \times 100 \quad (2)$$

- *απόδοση (yield)*, που αφορά τα προϊόντα της αντίδρασης, σε καθένα χωριστά ως προς κάποιο αντιδρών, όπως γίνεται στην εκλεκτικότητα, και είναι το πηλίκο της ποσότητας του προϊόντος αντίδρασης προς την αρχική ποσότητα του αντιδρώντος, όπως φαίνεται στο μαθηματικό τύπο που ακολουθεί:

$$\text{Απόδοση \%} = \frac{\text{Προϊόν αντίδρασης}}{\text{Αρχική ποσότητα}} \times 100 \quad (3)$$

- *χωροχρονική απόδοση*, που αφορά τον καταλύτη (*space-time yield*). Είναι η ποσότητα σε κιλά (Kg) του προϊόντος αντίδρασης ανά μονάδα όγκου του καταλύτη και ανά μονάδα χρόνου. Ονομάζεται, επίσης, και *παραγωγικότητα ή αποδοτικότητα του καταλύτη (catalyst productivity/catalyst efficiency)*.



Σχήμα 3. Τυπική διάταξη χημικής διεργασίας βιομηχανίας (προσαρμογή από Γιούλα, 2018¹).

Τέλος, οι *βιοτεχνολογικές διεργασίες* είναι από τη φύση τους περιβαλλοντικά φιλικές και οικονομικές, ενώ ταυτόχρονα είναι ικανές για την παραγωγή απίστευτα μεγάλης ποικιλίας προϊόντων, με στόχο την βελτίωση της υγείας και της ποιότητας ζωής του ανθρώπου. Μεταξύ άλλων κατέχουν σημαντική θέση στους τομείς της παραγωγής φαρμάκων, καλλυντικών, διαλυτών, διοκαυσίμων και προστασίας και αποκατάστασης του περιβάλλοντος. Στον σημερινό αιώνα, μία εποχή που χαρακτηρίζεται από την ανάγκη επαναπροσδιορισμού του

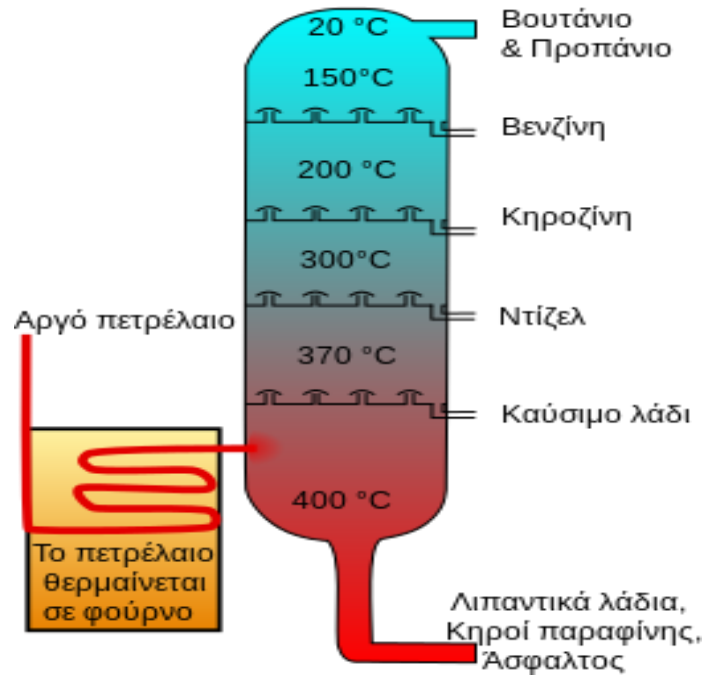
¹ Δρ. Μ. Γιούλα, Χημικές Διεργασίες, παρουσίαση <http://slideplayer.gr/slide/11822583/> [πρόσβαση 1/3/2018].



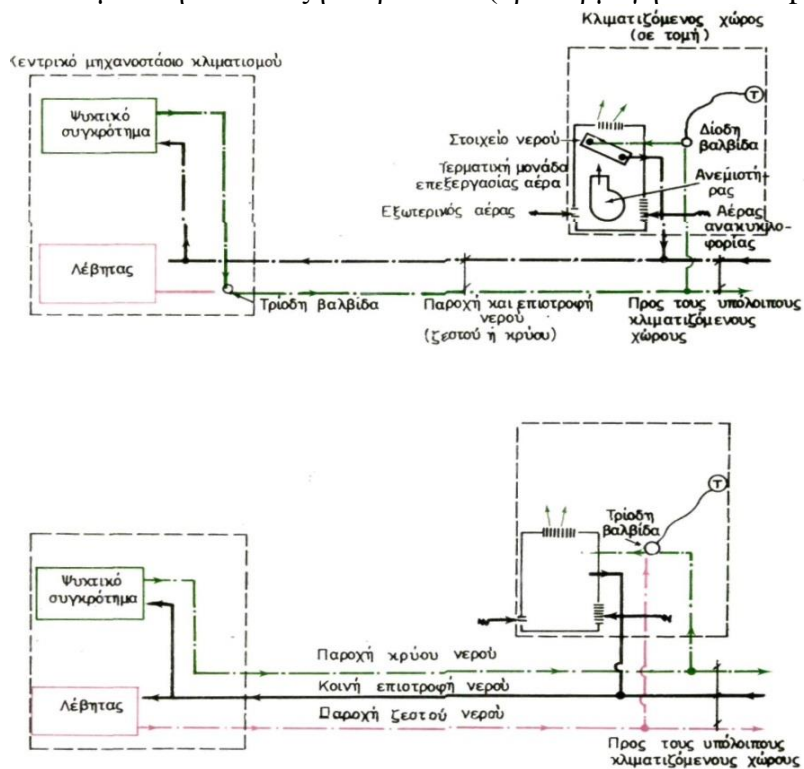
τεχνολογικού πολιτισμού στην κατεύθυνση της αιεφόρου ανάπτυξης, οι βιοτεχνολογικές διεργασίες αναμένεται να παίζουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο (Λυμπεράτος-Παύλου, 2010).

2.2 Παραδείγματα

Ένα παράδειγμα φυσικής βιομηχανικής διεργασίας αποτελεί η κλασματική απόσταξη. Η κλασματική απόσταξη είναι η πιο συνηθισμένη μορφή τεχνολογίας διαχωρισμού που χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις διυλιστηρίων πετρελαίου, πετροχημικών, χημικά εργοστάσια, επεξεργασίας φυσικού αερίου και διαχωρισμού αέρα με τις περισσότερες περιπτώσεις, η απόσταξη να λειτουργεί σε κατάσταση: *continuous steady state* (Kister, 1992; Perry and Green, 1984). Διάταξη κλασματικής απόσταξης φαίνονται στο Σχήμα 4 (επεξεργασία πετρελαίου). Μία τυπική στήλη απόσταξης διαχωρίζει *δυναμικό μίγμα* σε ελαφρύ (πτητικότερο) και βαρύ (λιγότερο πτητικό) κλάσμα αξιοποιώντας τη διαφορά στο σημείο βρασμού μεταξύ των δύο συστατικών. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται με επανειλημμένη επαφή της υγρής και της αέριας φάσης σε διαδοχικές βαθμίδες. Η αέρια φάση (ατμός) δημιουργείται στον *αναβραστήρα-εναλλάκτη* που χρησιμοποιεί υδρατμό και τροφοδοτείται με υγρό από τον πυθμένα της στήλης, ενώ η *υγρή φάση* δημιουργείται στον *συμπυκνωτή-εναλλάκτη* που τροφοδοτείται από την κορυφή και χρησιμοποιεί νερό ή άλλο ψυκτικό μέσο (Μποντοζόγλου, 2015; Himmelblau, 2006). Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα άλλο βιομηχανικό παράδειγμα διεργασίας: *ύγρανση ή αφύγρανση ενός ρεύματος αέρα*. Οι μεγάλοι υπερβολοειδείς πύργοι ψύξης των ατμοηλεκτρικών σταθμών και οι μικρότεροι των χημικών εγκαταστάσεων, έχουν ως κοινό στόχο την μείωση της θερμοκρασίας με τη βοήθεια νερού ψύξης, έτσι ώστε αυτό να μπορεί να επανακυκλοφορήσει στη μονάδα (Εικ.1). Η ψύξη του νερού επιτυγχάνεται με άμεση επαφή του με αέρα του περιβάλλοντος, οπότε μικρό ποσοστό του νερού εξατμίζεται απορροφώντας από το υπόλοιπο υγρό την *ενθαλπία αλλαγής φάσης*. Αυτός ο αποτελεσματικός τρόπος ψύξης αποτελεί μία *διεργασία ύγρανσης-αφύγρανσης*. Επιπρόσθετα, εφαρμόζεται και στην *ξήρανση προϊόντων* και στον *κλιματισμό κατοικήσιμων χώρων* (Σχ.5)(Μποντοζόγλου, 2015).



Σχήμα 4. Κλασματική Απόσταξη πετρελαίου (προσαρμογή από Wikipedia).



Σχήμα 5. Διεργασία ύγρανσης ή αφύγρανσης ενός ρεύματος αέρα (προσαρμογή από aircon.joomla.com).

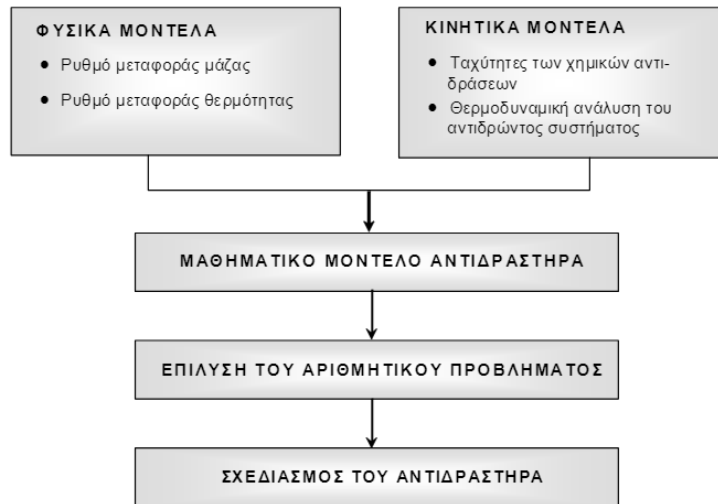


Εικόνα 1. Βιομηχανικός πύργος Ψύξης Ατμοηλεκτρικού σταθμού (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

Άλλο παράδειγμα βιομηχανικών διεργασιών είναι ο *χημικός αντιδραστήρας* (Σχ.6). Αποτελεί το πιο σημαντικό τμήμα μιας *χημικής μονάδας επεξεργασίας*, αφού σε αυτό θα πραγματοποιηθεί η *αντίδραση*. Οι κυριότεροι παράγοντες, που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό ενός χημικού αντιδραστήρα είναι η χημική κινητική, η θερμοδυναμική, η ρευστομηχανική, η μεταφορά θερμότητας και μάζας, η μηχανολογία, η οικονομική ανάλυση κ.α. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος σε ένα χημικό αντιδραστήρα, θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ανάλογα με πολλές παραμέτρους, όπως π.χ. με τον καταλύτη, τη σειρά τους, τη θερμοκρασιακή κατάσταση κ.ά. Έτσι, μια γενική ταξινόμηση είναι η παρακάτω: (α) αντιστρεπτές ή αμφίδρομες, (β) μη-αντιστρεπτές, διαδοχικές ή εν σειρά, (γ) ταυτόχρονες ή παράλληλες, (δ) μικτές, (ε) αυτοκαταλυόμενες, (στ) ετεροκαταλυόμενες, (ζ) αλυσιδωτές, (η) μονομοριακές, διμοριακές κ.α. (Μποντοζόγλου, 2015; Μαρίνος - Κουρής και Μαρούλης, 1993; Himmelblau, 2006).

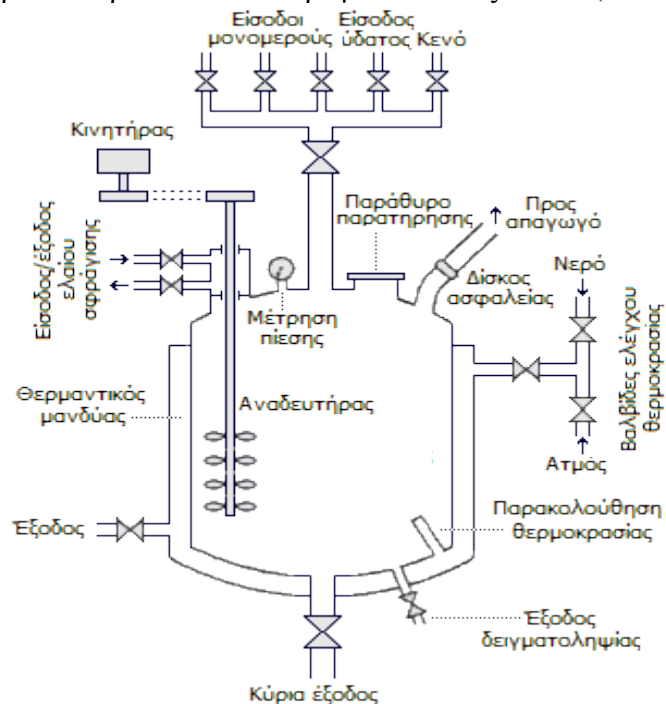
Ανάλογα με τον *τρόπο τροφοδοσίας* των αντιδρώντων και την απομάκρυνση των προϊόντων, οι χημικοί αντιδραστήρες διακρίνονται σε (Μαρίνος - Κουρής και Μαρούλης, 1993; Κυπαρισσίδα, 1993; Himmelblau, 2006):

- *ασυνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης (batch reactor)*, που λειτουργούν δυναμικά, δηλαδή οι συγκεντρώσεις των αντιδρώντων και οι συνθήκες λειτουργίας, π.χ. θερμοκρασία, πίεση κ.ά., μπορούν να μεταβάλλονται με το χρόνο.
- *συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης (Continuous Stirred Tank Reactor)*, όπου γίνεται συνεχής τροφοδοσία με τα αντιδρώντα και απομάκρυνση των προϊόντων με συνεχή ανακύκλωση των αναλλοίωτων αντιδρώντων.
- *ημι-συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης (Semi-batch reactor)*, που είναι ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων.

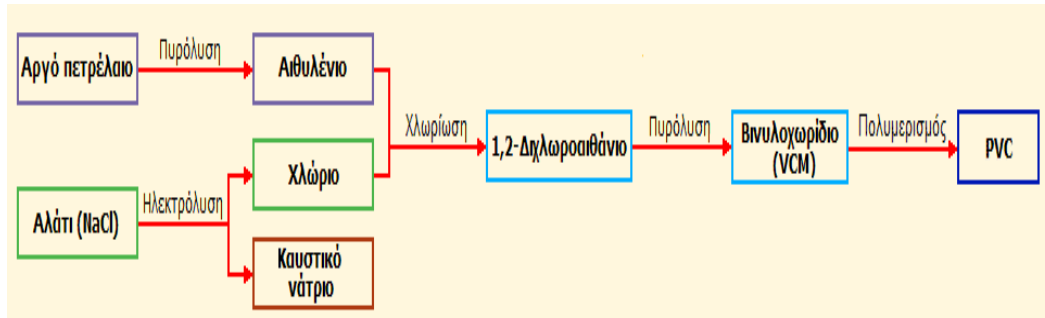


Σχήμα 6. Θεωρητικός σχεδιασμός χημικού αντιδραστήρα (προσαρμογή από Κυπαρισσίδα, 1993).

Στα επόμενα σχήματα φαίνονται, μια διάταξη χημικού αντιδραστήρα παρασκευής PVC, και η σειρά αντιδράσεων που παράγονται εντός αυτού (Wilkes et al. 2005):



Σχήμα 7. Χημικός αντιδραστήρας παραγωγής PVC (προσαρμογή από http://195.134.76.37/chemicals/chem_PVC.htm).

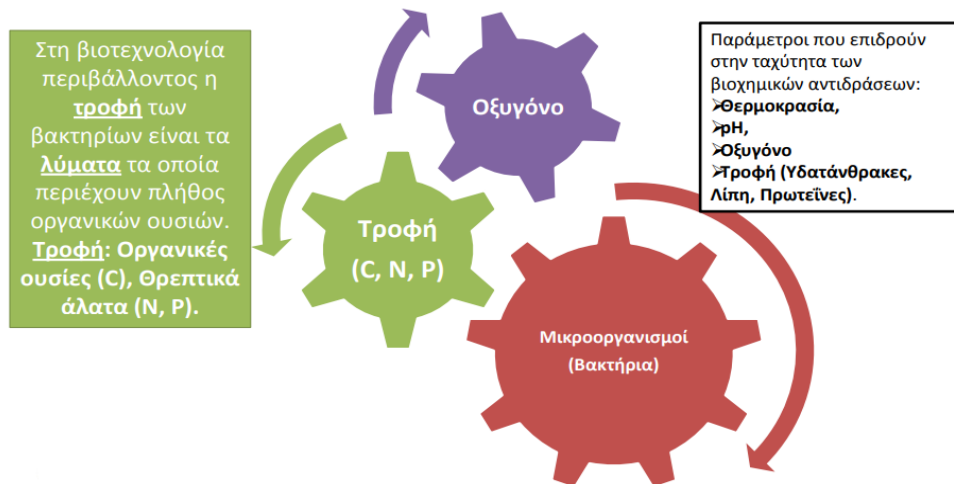


Σχήμα 8. Βιομηχανική διεργασία παραγωγής PVC (προσαρμογή από http://195.134.76.37/chemicals/chem_PVC.htm).

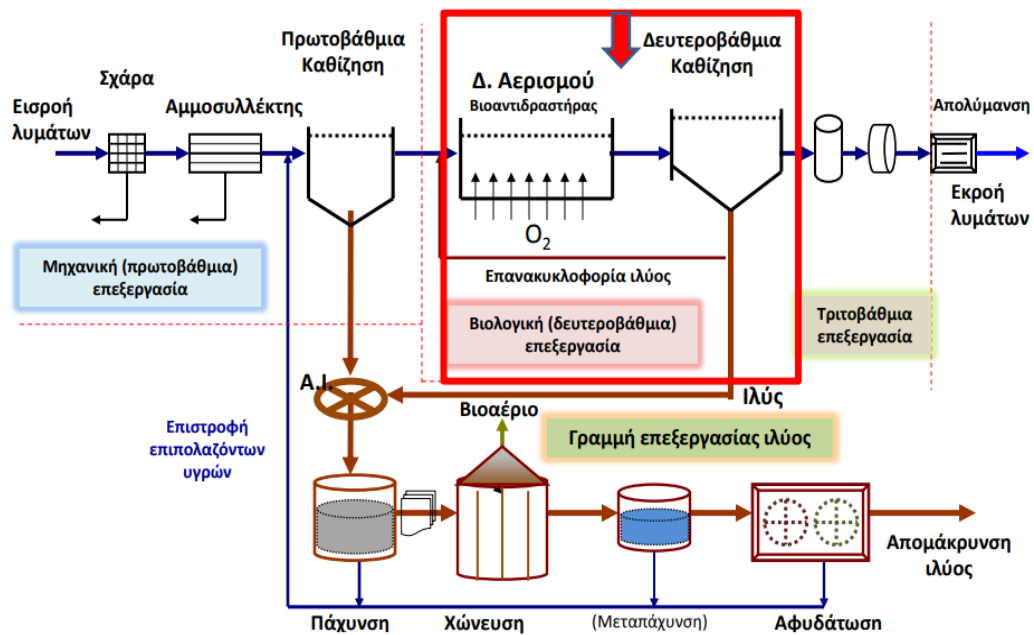
Η εξέλιξη της *Μοριακής Βιολογίας* και της *Βιοτεχνολογίας* στη συνέχεια, τα τελευταία χρόνια ήταν εντυπωσιακά γρήγορη. Οι νέες κατευθύνσεις, η κλωνοποίηση (αναπαραγωγική και θεραπευτική) πέραν του ανασυνδυασμού του DNA, ο ολοένα αυξανόμενος αριθμός των προϊόντων που παράγονται από κυτταροκαλλιέργειες (πρωτογενείς και δευτερογενείς μεταβολίτες), η ρύθμιση των μεταβολικών σταδίων, η ανακάλυψη νέων βιοκαταλυτών (ενζύμων και μικροοργανισμών) κ.α.κατέστη τις βιολογικές διεργασίες ένα σημαντικό τομέα εφαρμογών (Διακοπούλου-Κυριακίδου, 2017). Ειδικότερα, όσο αφορά τις βιολογικές/βιοχημικές διεργασίες έχουμε διάφορα πεδία εφαρμογής στην βιομηχανική παραγωγή, όπως:

- βιομηχανία τροφίμων και ποτών που περιλαμβάνουν ζύμωση (π.χ. τυρί, ξύδι, γιαούρτι, αλκοολούχα ποτά)
- παραγωγή ενζύμων, αιθυλικής αλκοόλης και άλλων διαλυτών, κιτρικού οξέος, βιταμινών, μονοκυτταρικής πρωτεΐνης για ζωοτροφές, αντιβιοτικών και άλλων φαρμάκων
- παραγωγή ενέργειας από ανακυκλώσιμες ύλες (παραγωγή αιθανόλης ή/ και βιοαερίου από κυτταρινούχες πρώτες ύλες),
- βιολογικό καθαρισμό των υγρών και στερεών αποβλήτων, και
- εξόρυξη πετρελαίου και δέσμευση αζώτου.

Ένα παράδειγμα βιολογικών διεργασιών αφορά την *επεξεργασία αποβλήτων*, όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα, όπου παρουσιάζονται η βιολογική διεργασία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, και η δευτεροβάθμια διάταξη βιολογικής επεξεργασίας:



Σχήμα 9. Βιολογική διεργασία επεξεργασία υγρών λυμάτων (προσαρμογή από Νταρακάς, 2014).



Σχήμα 10. Βιομηχανική διεργασία παραγωγής PVC (προσαρμογή από Νταρακάς, 2014).

2.3 Συσκευές Διεργασιών

Οι συσκευές διεργασιών περιλαμβάνουν συνήθως την επαφή δύο διαφορετικών φάσεων (αέριας-υγρής-στερεάς)(Εικ.2). Για το λόγο αυτό διακρίνουμε τις διεργασίες σε (Μποντοζόγλου, 2015):

- υγρού-αερίου,
- υγρού-υγρού και
- αερίου (ή υγρού)-στερεού.



Παραδείγματα της πρώτης κατηγορίας που είναι και η πλέον συνηθισμένη, αποτελούν οι συσκευές ύγρανσης και αφύγρανσης αέρα, οι συσκευές κλασματικής απόσταξης υγρών μιγμάτων και οι συσκευές απορρόφησης αερίων σε υγρά. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις συσκευές εκχύλισης, όπου δύο μη αναμίξιμα υγρά έρχονται σε επαφή και ανακατανέμουν μεταξύ τους ένα τρίτο συστατικό ευδιάλυτο και στα δύο. Τέλος, η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει μεταξύ άλλων συσκευές ξήρανσης στερεών και συσκευές προσρόφησης συστατικών ενός υγρού ή αερίου μίγματος σε κονιοποιημένο στερεό.

Η ταξινόμηση των συσκευών φυσικών διεργασιών μπορεί να γίνει και ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, όπου διακρίνονται σε (Μποντοζόγλου, 2015):

- *συνεχής λειτουργίας (steady state)*, όπου οι συνθήκες σε κάθε σημείο της συσκευής παραμένουν χρονικά αμετάβλητες.
- *ασυνεχής λειτουργία*, όπου τα υλικά τροφοδοτούνται κατά παρτίδες στη συσκευή (που μπορεί να είναι για παράδειγμα ένα δοχείο ανάδευσης) και οι συνθήκες στο εσωτερικό της μεταβάλλονται σταδιακά με το χρόνο.

Οι συσκευές συνεχούς λειτουργίας διακρίνονται σε συσκευές με βαθμίδες και σε συσκευές διαρκούς επαφής. Στις πρώτες, οι δύο φάσεις έρχονται σε επαφή, εναλλάσσουν συστατικά και διαχωρίζονται, διαδικασία που επαναλαμβάνεται σε κάθε βαθμίδα (π.χ. η στήλη με δίσκους ή πατώματα). Στις συσκευές ασυνεχούς λειτουργίας, οι δύο φάσεις βρίσκονται σε διαρκή επαφή χωρίς την παρεμβολή διαδοχικών διαχωρισμών. Η διάκριση σε συσκευές με βαθμίδες και συσκευές διαρκούς επαφής είναι καθοριστική για τον τρόπο σχεδιασμού τους. Οι συσκευές με βαθμίδες σχεδιάζονται με βάση την παραδοχή ότι τα ρεύματα εξόδου κάθε βαθμίδας είναι σε *θερμοδυναμική ισορροπία*. Οι συσκευές διαρκούς επαφής διατηρούν συνεχώς μία *απόκλιση* από την ισορροπία μεταξύ των φάσεων και ο σχεδιασμός τους γίνεται με χρήση των *συντελεστών μεταφοράς μάζας* (Μποντοζόγλου, 2015; Himmelblau, 2006).



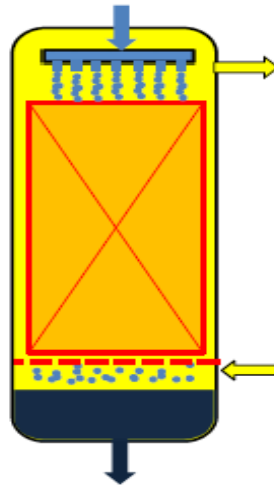
Εικόνα 2. Συσκευή διεργασίας (προσαρμογή από Γιούλα, 2018)



Κατά το σχεδιασμό μιας συσκευής διεργασιών, θεωρείται δεδομένη μια σειρά περιορισμών που αφορούν μεταβλητές ρευμάτων εισόδου (*πρώτες ύλες*) και μεταβλητές ρευμάτων εξόδου (*προδιαγραφές προϊόντων*). Η επιλογή του είδους της συσκευής, των διαστάσεων και των συνθηκών λειτουργίας είναι αντικείμενο του σχεδιασμού. Τα βασικά στάδια της διαδικασίας αυτής είναι συνήθως τα εξής (Μποντοζόγλου, 2015):

- *υπολογισμός των παραμέτρων που δεν είναι γνωστές ή καθορισμένες, με χρήση ολοκληρωτικών ισοζυγίων ενέργειας, μάζας και ορμής.*
- *υπολογισμός του ύψους συσκευής, που αφορά το αποτέλεσμα που προκύπτει με ολοκλήρωση των λεπτομερών ισοζυγίων ενέργειας και μάζας που καταστρώνονται για ένα διαφορικό τμήμα της συσκευής. Το ύψος της συσκευής εκφράζει την δυσκολία της μετατροπής που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό της, και μπορεί να μεταφράζεται σε πλήθος βαθμίδων για διεργασίες πολλαπλών βαθμίδων, ή σε ύψος κλίνης για διεργασίες διαρκούς επαφής.*
- *υπολογισμός της διατομής συσκευής, όπου η απαιτούμενη διατομή εξαρτάται από το μέγεθος της παροχής που επεξεργάζεται η συσκευή. Ρευστομηχανικοί κυρίως περιορισμοί καθορίζουν τη μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα ροής των διαφόρων φάσεων, ώστε να μην μειώνεται σημαντικά ο βαθμός απόδοσης από φαινόμενα συμπαρασυρμού σταγονιδίων, αφρισμού, πλημύρισης κλπ.*
- *υπολογισμός ενεργειακών απαιτήσεων, όπου σε αυτό το στάδιο διαστασιολογούνται βοηθητικές συσκευές που θερμαίνουν ή ψύχουν διάφορα ρεύματα της διεργασίας (π.χ. προθερμαντές, αναβραστήρες, συμπυκνωτές), καθώς και οι συσκευές άντλησης (π.χ. αντλίες, φυσητήρες, συμπιεστές).*
- *επιλογή υλικών κατασκευής και προκαταρκτική κοστολόγηση της συσκευής.*
- *μηχανολογικός σχεδιασμός, όπου οι συσκευές διεργασιών υπολογίζονται ως δοχεία πίεσης με ειδικές προβλέψεις για τα εσωτερικά εξαρτήματα.*

Τέλος, σημαντική είναι η μεθοδολογία εκτίμησης του ύψους και της διατομής των βασικών συσκευών διεργασιών (Σχ.11). Αφορά τις «*ψηλόλιγνες*» συσκευές όπως οι στήλες απόσταξης και απορρόφησης, όπου η ροή κάθε φάσης μπορεί να θεωρηθεί ως εμβολική. Ως συνέπεια, η σύσταση όπως και η ταχύτητα, είναι ομοιόμορφη σε κάθε διατομή και η μεταβολή εμφανίζεται μόνον στη διεύθυνση ροής (Μποντοζόγλου, 2015).

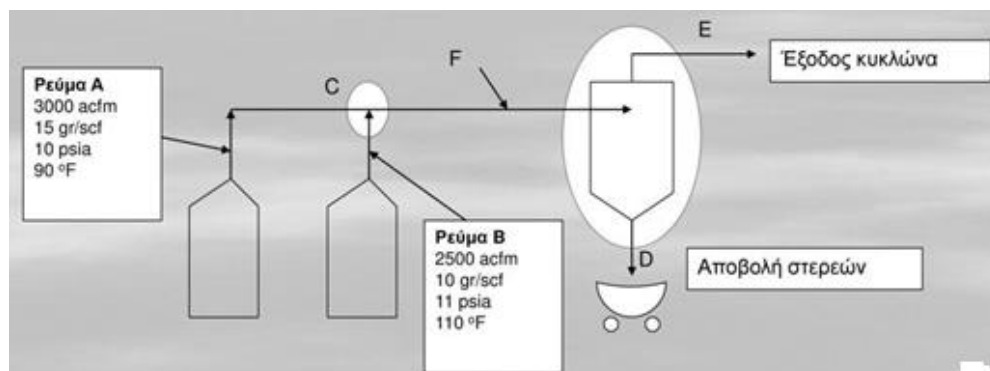


Σχήμα 11. Στήλη απορρόφησης με πληρωτικό υλικό (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

2.4 Δυναμικό Μοντέλο Διεργασίας

Για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μίας οποιασδήποτε διεργασίας απαιτούνται αρχικά τα δυναμικά ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Ειδικότερα, τα απαραίτητα βήματα για την κατάστρωση αυτών των ισοζυγίων είναι τα εξής (Σχ.12)(Μποντοζόγλου, 2015; Himmelblau, 2006):

- Σχεδιασμός της ροής της διεργασίας.
- Προσδιορισμός των εισερχόμενων και εξερχόμενων στη διεργασία.
- Σημείωση όλων των διαθέσιμων στο σχέδιο της διεργασίας (σκαρίφημα).
- Σχεδιασμός της περιοχής ελέγχου της διεργασίας, όπου καταστρώνεται το ισοζύγιο.
- Επιλογή με βάση τους υπολογισμούς.

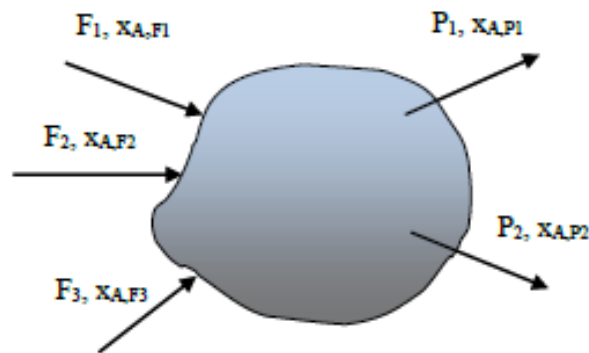


Σχήμα 12. Κατάστρωση ισοζυγίων ενέργειας και μάζας (προσαρμογή από Γιούλα, 2018).

Τα ισοζύγια μάζας αποτελούν τη λογιστική απεικόνιση μίας διεργασίας ή μίας ενότητας διεργασιών (Himmelblau and Riggs, 2004). Με την κατάστρωσή τους



αποκτούμε μία πρώτη εικόνα για τις μεταβολές των διαφόρων ρευμάτων υλικών χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση των λεπτομερειών κάθε διεργασίας. Βασική προϋπόθεση για την ορθή και χρήσιμη εφαρμογή των ισοζυγίων μάζας αποτελεί η κατάλληλη επιλογή του όγκου ελέγχου, δηλαδή του νοητού συνόρου που διαχωρίζει το σύστημα από το περιβάλλον. Τα ρεύματα υλικών που λαμβάνονται υπόψη στο ισοζύγιο είναι μόνον αυτά που διαπερνούν τον όγκο ελέγχου (Σχ.13) (Μποντοζόγλου, 2015).



Σχήμα 13. Παροχή και σύσταση ρευμάτων εισόδου/εξόδου σε τυχαίο όγκο ελέγχου (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

Η γενική μορφή του ισοζυγίου διατυπώνεται, με βάση το Σχήμα 13, ως εξής (Μποντοζόγλου, 2015):

$$(\text{ρυθμός συσσώρευσης}) = [(\text{ρυθμός εισροής}) - (\text{ρυθμός εκροής})] + (\text{ρυθμός παραγωγής}) \quad (4)$$

Ο όρος της συσσώρευσης αναφέρεται στη χρονική μεταβολή της μάζας που περιέχεται στον όγκο ελέγχου και ο όρος της παραγωγής (θετικής ή αρνητικής) αφορά χημικές αντιδράσεις. Αν F_i και P_j είναι οι μαζικές παροχές των ρευμάτων εισόδου και εξόδου στη συσκευή και ρ η τοπική πυκνότητα μάζας εντός του όγκου ελέγχου V , η γενική διατύπωση της εξίσωσης διατήρησης της ολικής μάζας είναι (Μποντοζόγλου, 2015):

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \sum_i F_i - \sum_j P_j \quad (5)$$

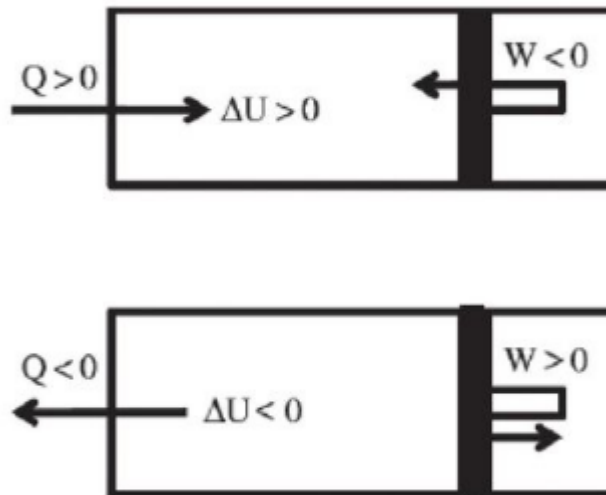
Έτσι, το *ισοζύγιο μάζας* ενός ορισμένου συστατικού A εκφράζεται συναρτήσει της σύστασης στο A των διαφόρων ρευμάτων και περιλαμβάνει στη γενική περίπτωση και την επίδραση χημικών αντιδράσεων. Αν x_{A,F_i} και x_{A,P_j} είναι οι περιεκτικότητα του συστατικού A στα ρεύματα εισόδου, F_i , και εξόδου, P_j , αντίστοιχα, και R_A (Μποντοζόγλου, 2015):



$$\frac{d}{dt} \int_V x_A \rho dV = \sum_i F_i x_{A,Fi} - \sum_j P_j x_{A,Pj} + \int_V R_A dV \quad (6)$$

Στην περίπτωση φυσικών διεργασιών, όπου δεν λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση, ο ρυθμός παραγωγής απαλείφεται (Μποντοζόγλου, 2015). Όσο αφορά το ισοζύγιο ενέργειας, αυτό βασίζεται στο *πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα*. Αυτό είναι μια έκφραση της διατήρησης της ενέργειας για θερμοδυναμικά συστήματα. Ειδικότερα, εάν ένα κλειστό σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον, μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την εσωτερική του ενέργεια U , και αντίστοιχα τη θερμοκρασία του με δύο τρόπους (Σχ.14)(Αυλωνίτης, 2017):

- με εισροή ή εκροή θερμότητας προς ή από το σύστημα,
- με έργο που προσφέρεται προς ή από το σύστημα.



Σχήμα 14. Παροχή και σύσταση ρευμάτων εισόδου/εξόδου σε τυχαίο όγκο ελέγχου (προσαρμογή από wikipedia).

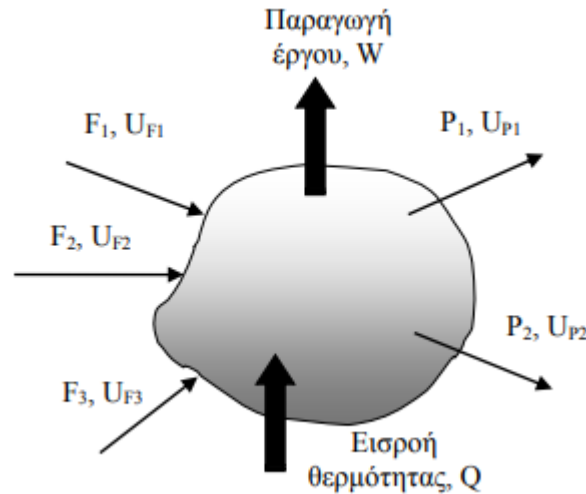
Η γενική μορφή του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος φαίνεται στην επόμενη σχέση (Αυλωνίτης, 2017):

$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q - W \quad (7)$$

Στην περίπτωση των συσκευών διεργασιών εφαρμόζεται η μορφή του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος για ανοικτό σύστημα, μια και σχεδόν πάντα υπάρχουν ρεύματα εισόδου-εξόδου (Σχ.15)(Αυλωνίτης, 2017; Μποντοζόγλου, 2015). Οι κλασικές μορφές ενέργειας που λαμβάνονται υπόψη είναι η *εσωτερική (θερμική) ενέργεια* και η *μηχανική (δυναμική & κινητική) ενέργεια*. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι στις διεργασίες σε *μικρο- ή νάνο-κλίμακα* (Nguyen and Wereley, 2002), αποκτούν βαρύτητα και άλλες μορφές ενέργειας: Επειδή χρησιμοποιούνται πολύ μικρές ποσότητες υλικού (π.χ. μικροσταγόνες), η ενέργεια



των μορίων στην επιφάνεια καθίσταται περισσότερο αντιπροσωπευτική της μέσης ενέργειας της συνολικής μάζας και συνεπώς πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιφανειακή ενέργεια όπως εκφράζεται από το γινόμενο της ελεύθερης επιφάνειας επί την επιφανειακή τάση (Adamson and Gast, 1997). Επίσης, επειδή για την μετακίνηση ρευστών συχνά χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά ή και μαγνητικά πεδία, πρέπει να συμπεριληφθούν οι αντίστοιχες ενεργειακές συνεισφορές (Karapetsas and Bontozoglou, 2015).



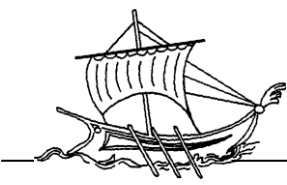
Σχήμα 15. Ισοζύγιο ενέργειας σε τυχαίο όγκο ελέγχου (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

Το ολοκληρωτικό ισοζύγιο ενέργειας εφαρμόζεται σε όγκο ελέγχου που περιλαμβάνει ολόκληρη την συσκευή. Ενέργεια μεταφέρεται με τα ρεύματα εισόδου και εξόδου της συσκευής, υπό τη μορφή εσωτερικής και μηχανικής ενέργειας. Επίσης η διεργασία εναλλάσσει θερμότητα και έργο με το περιβάλλον. Η γενική μορφή ενός ισοζυγίου ενέργειας διατυπώνεται, με αναφορά στο Σχήμα 15, ως εξής (Μποντοζόγλου, 2015):

$$\begin{aligned}
 (\text{ρυθμός συσσώρευσης} &= (\text{ρυθμός εισροής ενέργειας με τα ρεύματα εισόδου}) \\
 \text{ενέργειας στο σύστημα}) &- (\text{ρυθμός εκροής ενέργειας με τα ρεύματα εξόδου}) \\
 &+ (\text{ρυθμός εισροής θερμότητας από το περιβάλλον}) \\
 &- (\text{ρυθμός παραγωγής έργου από το σύστημα προς το περιβάλλον})
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

που ακολουθείται η σύμβαση της θερμοδυναμικής σχετικά με το πρόσημο των όρων θερμότητας και έργου. Συμβολίζοντας με $E_{ολ}$ την συνολική ενέργεια της συσκευής, με U την ειδική εσωτερική ενέργεια (δηλαδή την εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας) και με u και z την ταχύτητα και την υψομετρική θέση αντίστοιχα, το ισοζύγιο παίρνει την εξής μορφή (Μποντοζόγλου, 2015):

$$\frac{d}{dt} E_{ολ} = \frac{d}{dt} \int_V \left(U + \frac{u^2}{2} + gz \right) \rho dV = \sum_i F_i \left(U + \frac{u^2}{2} + gz \right)_{F_i} - \sum_j P_j \left(U + \frac{u^2}{2} + gz \right)_{P_j} + \dot{Q} - \dot{W}
 \tag{9}$$



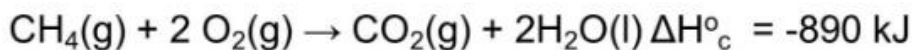
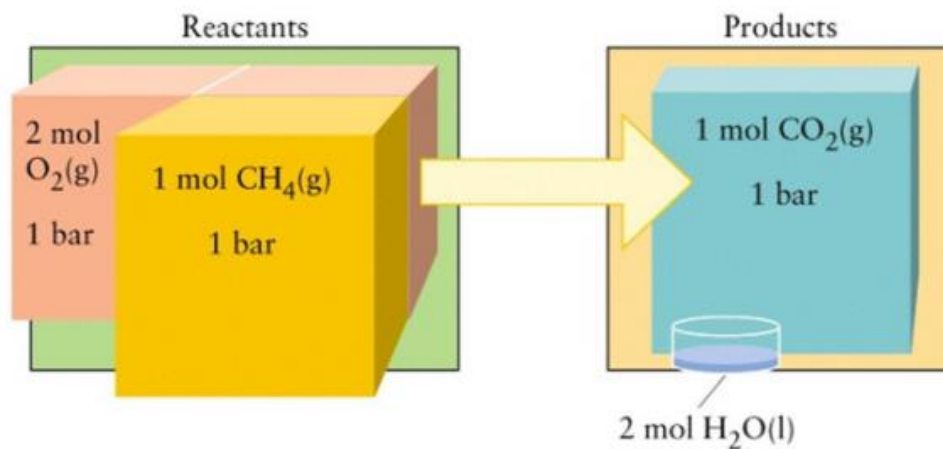
όπου το ολοκλήρωμα υπολογίζει την ενέργεια στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου, τα αθροίσματα περιγράφουν την ενέργεια των ρευμάτων εισόδου/εξόδου και οι όροι με την άνω τελεία παριστάνουν ρυθμούς εναλλαγής θερμότητας και έργου.

Η εφαρμογή του ισοζυγίου ενέργειας προϋποθέτει τη δυνατότητα υπολογισμού της *ενθαλπίας* των διαφόρων ρευμάτων (Σχ.16). Αυτή είναι μια *συνάρτηση κατάστασης*, όπως και η εσωτερική ενέργεια. Υπολογίζεται μόνο η μεταβολή της, και αφορά το ποσό θερμότητας που εκλύεται ή απορροφάται σε μια χημική αντίδραση, υπό σταθερή πίεση. Ονομάζουμε ενθαλπία αντίδρασης (ΔH) τη μεταβολή (Αυλωνίτης, 2017; Μποντοζόγλου, 2015):

$$\Delta H = H_{\text{προϊόντων}} - H_{\text{αντιδρώντων}} \quad (10)$$

Έτσι, σε ένα ρεύμα καθαρού συστατικού, οι αρχές της θερμοδυναμικής δίνουν την παρακάτω εξίσωση για διαφορική μεταβολή της ενθαλπίας συναρτήσει των μεταβολών της θερμοκρασίας και της πίεσης (Smith and Van Ness, 2004):

$$dH = C_p dT + \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (11)$$



Σχήμα 16. Πρότυπη ενθαλπία καύσης (προσαρμογή από Χημεία Β' Λυκείου - κατεύθυνση²).

Γενικά, οι διάφορες μεταβλητές σε ένα δυναμικό σύστημα μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες μεταβλητών, όπως παρακάτω (Σχ.17)(Μποντοζόγλου, 2015; Himmelblau, 2006; Κυπαρισσίδα, 1993):

- *Εισόδου (input variables):* $u(t)$, $d(t)$ & $d'(t)$

² Χημεία Κατεύθυνσης Β' Λυκείου 2ο Κεφάλαιο – Θερμοχημεία, παρουσίαση στο διαδίκτυο, <http://slideplayer.gr/slide/2406775/>, (πρόσβαση 1/3/2018).



- *Εξόδου (output variables):* $y(t)$ & $z(t)$
- *Κατάστασης (state variables):* $x(t)$

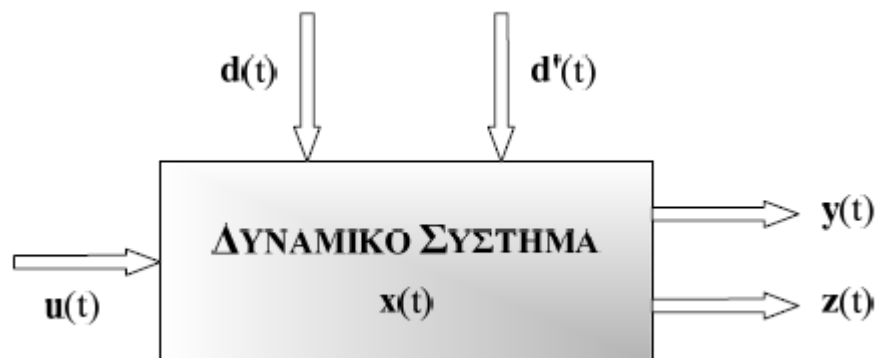
Οι μεταβλητές εισόδου προσδιορίζουν την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος επί του δυναμικού συστήματος και διακρίνονται σε (Μποντοζόγλου, 2015; Κυπαρισσίδα, 1993):

- *Διαταραχές (disturbances)*, όπου οι τιμές τους καθορίζονται από τυχαίους παράγοντες και καταστάσεις. Οι διαταραχές διακρίνονται σε *μετρούμενες* ($d(t)$) και *μη μετρούμενες* ($d'(t)$).
- *Μεταβλητές ελέγχου ή χειρισμού* ($u(t)$), που καθορίζονται από κάποιον χειριστή ή από ένα υπολογιστή.

Οι μεταβλητές εξόδου υποδηλώνουν την επίδραση του δυναμικού συστήματος επί του εξωτερικού περιβάλλοντος, και διακρίνονται σε (Μποντοζόγλου, 2015; Κυπαρισσίδα, 1993):

- *Μετρούμενες μεταβλητές εξόδου* ($y(t)$), εφόσον οι τιμές τους δίνονται άμεσα να μετρηθούν και να αξιολογηθούν.
- *Μη Μετρούμενες μεταβλητές εξόδου* ($z(t)$), όπου αφορά μεταβλητές δεν μπορούν να μετρηθούν και άρα ούτε να αξιολογηθούν.

Οι μεταβλητές εξόδου όταν είναι μετρούμενες ονομάζονται *ελεγχόμενες ή ρυθμιζόμενες μεταβλητές (controlled variables)*. Τέλος, οι μεταβλητές κατάστασης ($x(t)$), χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την εσωτερική δυναμική κατάσταση του συστήματος και ταυτίζονται με τις εξαρτημένες μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης του δυναμικού συστήματος (Κυπαρισσίδα, 1993).

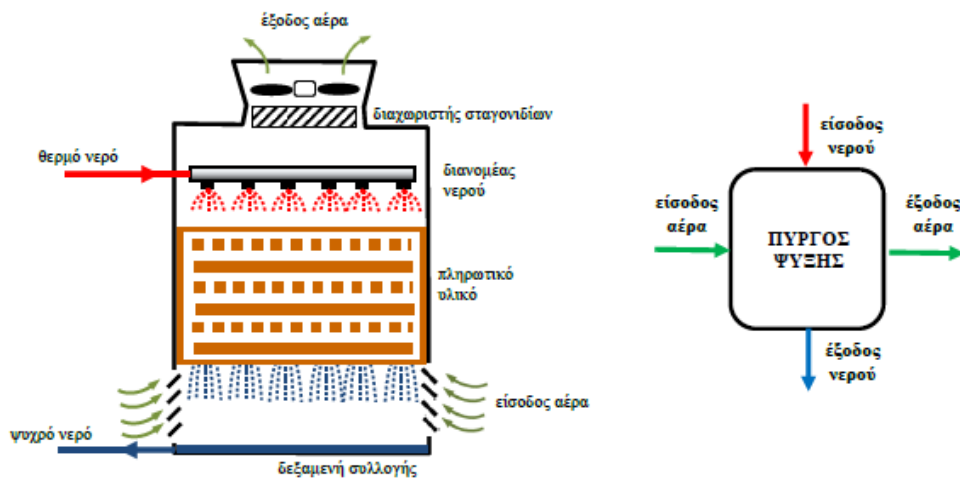


Σχήμα 17. Σχηματική απεικόνιση των μεταβλητών ενός δυναμικού συστήματος (προσαρμογή από Κυπαρισσίδα, 1993)

Τέλος, στο επόμενο σχήμα φαίνεται σε απλή μορφή μια βιομηχανική διεργασία υπό μορφή δυναμικού συστήματος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το σύστημα βιομηχανικής ψύξης. Το σχήμα στο πρώτο μέρος φαίνεται η τομή ενός βιομηχανικού πύργου ψύξης. Στο άνω μέρος της συσκευής διακρίνεται ο φουσητήρας που επιβάλλει τη ροή αέρα με ελκυσμό. Σε ένα ορισμένο ύψος



διακρίνονται τα ακροφύσια από όπου εισάγεται το θερμό νερό, το οποίο ρέει προς τα κάτω με τη δύναμη της βαρύτητας. Πάνω από αυτά υπάρχει ένα πλέγμα μεταλλικών ελασμάτων που χρησιμεύει ως διαχωριστής και συλλέκτης των σταγονιδίων υγρού νερού που παρασύρονται προς τα πάνω λόγω της κίνησης του αέρα. Στο εσωτερικό του πύργου υπάρχει πληρωτικό υλικό (πχ σταυρωτά στοιβαγμένες ράβδοι από ξύλο ή πολυμερές) το οποίο βελτιώνει την κατανομή του νερού και τη δημιουργία μεγάλης διεπιφάνειας νερού-αέρα. Στο δεύτερο μέρος του σχήματος, φαίνεται η αναπαράσταση της διεργασίας σαν το απλό κουτί. Τα ρεύματα θερμού και ψυχρού νερού και τα ρεύματα εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρα παριστάνονται με απλά βέλη που δείχνουν είσοδο στη συσκευή ή έξοδο από αυτήν (Μποντοζόγλου, 2015).



Σχήμα 18. (α) τομή βιομηχανικού πύργου ψύξης & (β) διάγραμμα ροής του (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

2.5 Σύνοψη

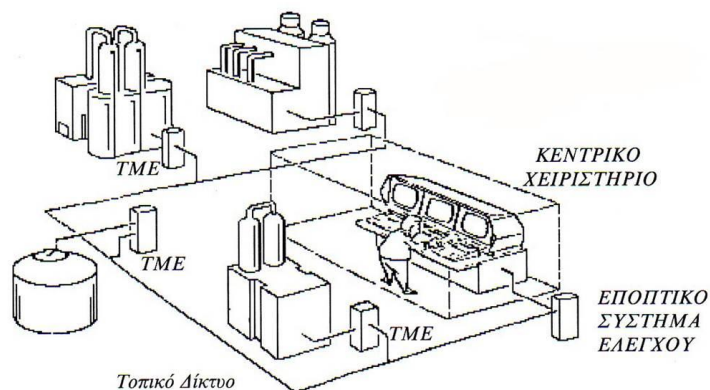
Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια εκτενής παρουσίαση των διεργασιών, των βασικών εννοιών και στοιχείων τους, των συσκευών που χρησιμοποιούνται, αλλά και της δυναμικής ανάλυσής τους (συμπεριφορά).



3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

3.1 Εισαγωγικό Πλαίσιο

Ο Βιομηχανικός Έλεγχος αφορά τις μεθόδους και την τεχνολογία που χρησιμοποιούνται για την όσο το δυνατόν αυτόνομη λειτουργία των βιομηχανικών διεργασιών που παράγουν προϊόντα είτε από πρωτογενούς μορφής ύλες ή των βιομηχανικών διεργασιών κατασκευής σύνθετων προϊόντων (Σχ.19)(Χασάπης 2015, Κίνγκ, 1996). Τις διεργασίες που χρησιμοποιούνται για τη μαζική επεξεργασία υλών πρωτογενούς μορφής συνήθως διακρίνονται σε διεργασίες συνεχούς παραγωγής (*continuous processes*), σε διακοπτόμενες διεργασίες (*discontinuous processes*) και σε διεργασίες διαλείποντος έργου (*batch processes*). Στις διεργασίες συνεχούς παραγωγής οι πρώτες ύλες, τα ενδιάμεσα και τα τελικά προϊόντα είναι συνήθως ρευστά. Τυπικές διεργασίες της κατηγορίας αυτής είναι αυτές που χρησιμοποιούνται σε διυλιστήρια υγρών καυσίμων και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διακοπτόμενες διεργασίες είναι παρόμοιες με αυτές της συνεχούς παραγωγής, αλλά οι συνθήκες λειτουργίας τους μπορούν να αλλάζουν συχνά για να είναι δυνατή η παραγωγή διαφορετικών προϊόντων. Τυπικές διεργασίες της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χαρτιού και χαλυβδόφυλλων. Στις διεργασίες διαλείποντος έργου η επεξεργασία των πρώτων υλών γίνεται σύμφωνα με μια προκαθορισμένη ακολουθία βημάτων, όπως είναι η ανάμειξη υλών, η θέρμανση και συμπίεση του μείγματος για ορισμένη χρονική διάρκεια, η πρόσμειξη των πρώτων υλών με άλλες ουσίες και η παραλαβή ολόκληρης της ποσότητας του τελικού προϊόντος πριν από την έναρξη νέου κύκλου παραγωγής ίδιου προϊόντος. Τυπικές διεργασίες της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες τροφίμων και φαρμάκων καθώς επίσης στις βιομηχανίες δέρματος, υφασμάτων και ξυλείας. Αντίθετα, τις διεργασίες που εφαρμόζονται στην κατασκευή διακριτών εξαρτημάτων και στη συναρμολόγηση σύνθετων μηχανολογικών και ηλεκτρονικών προϊόντων με τα εξαρτήματα αυτά, ονομάζονται διεργασίες διακριτής επεξεργασίας (*discrete processes*) (Χασάπης, 2015).



Σχήμα 19. Τυπική διάταξη ολοκληρωμένου Βιομηχανικού Ελέγχου (προσαρμογή από Κίνγκ, 1994).



Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται μια καταγραφή των κλάδων βιομηχανικής παραγωγής που συναντά κανείς σε παγκόσμια κλίμακα και σημειώνεται ο τύπος των διεργασιών που συναντώνται σε κάθε κλάδο (Bernard, 1989)

Βιομηχανικοί κλάδοι	Συνεχείς διεργασίες	Ημισυνεχείς διεργασίες	Διεργασίες διαλείποντος έργου	Διακριτές διεργασίες
Ενέργεια	■			
Υδροση & Απόβλητα	■			
Πετρελαιοειδή	■			
Χημικά	■			
Αέριο	■			
Χάρτου	■			
Βασικών μετάλλων		■		
Τροφίμων		■		
Υφασμάτων		■		
Γυαλιού		■		
Ορυχείων		■		
Φαρμάκων		■		
Ελαστικών & Πλαστικών		■		
Ξυλείας		■		
Τυπογραφίας		■		
Δέρματος		■		
Ενδυμάτων		■		
Ηλεκτρικών & Ηλεκτρονικών		■		
Μεταλλικών προϊόντων		■		
Επίπλου		■		
Αυτοκινητοβιομηχανίας		■		
Μεταφορών		■		
Όργάνων		■		
Εργαλειομηχανών		■		

Σχήμα 20. Ταξινόμηση βιομηχανικών κλάδων σύμφωνα με τον τύπο των διεργασιών που περιλαμβάνουν οι βιομηχανικές μονάδες του κάθε κλάδου (προσαρμογή από Χασάπης, 2015).

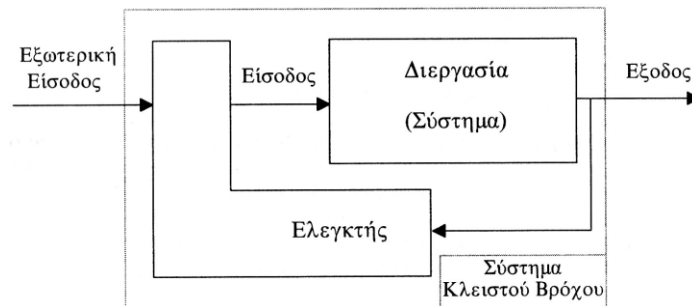
Οι στόχοι του βιομηχανικού ελέγχου είναι (Χασάπης, 2015):

- *αύξηση του όγκου παραγωγής* λόγω της καλύτερης αξιοποίησης των δυνατοτήτων των μέσων παραγωγής, (π.χ. λειτουργώντας το εργοστάσιο στα ανώτερα δυνατά όριά του),
- *μείωση του κόστους παραγωγής ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος*, λόγω βελτιστοποίησης της ενέργειας και μείωσης του εργασιακού κόστους,
- *βελτίωση της ποιότητας των παραγομένων προϊόντων* λόγω της δυνατότητας να διατηρούνται οι συνθήκες λειτουργίας μέσα σε στενά όρια ανοχών, και



- ευελιξία παραγωγής κάτω από συνεχώς μεταβαλλόμενες (και ανταγωνιστικής) συνθήκες αγοράς.

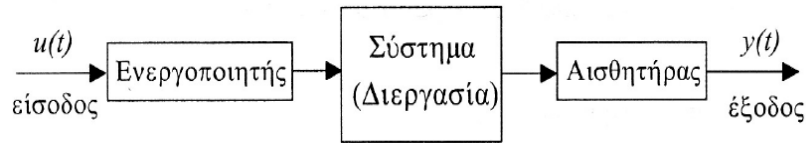
Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται από το *Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των Η.Π.Α (National Institute of Standards and Technology)* (Stouffer, 2013) οι εξειδικευμένοι υπολογιστές, ηλεκτρονικές, ηλεκτρομηχανικές και πνευματικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για να υλοποιήσουν το βιομηχανικό έλεγχο των διεργασιών, συνιστούν τα *Βιομηχανικά Συστήματα Ελέγχου* (Σχ.21). Σε αυτά τα συστήματα περιλαμβάνονται τύποι όπως είναι τα εποπτικά συστήματα ελέγχου και συλλογής δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)), τα κατακεντημένα συστήματα ελέγχου (Distributed Control Systems), και άλλα μικρότερου μεγέθους όπως είναι οι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (PLC).



Σχήμα 21. Δομή βιομηχανικού συστήματος ελέγχου (προσαρμογή από Κίνγκ, 1994).

Ειδικότερα, ο *Ελεγκτής (controller)* καλείται μια *συσκευή* που παράγει αυτόματα ένα σήμα ελέγχου (είσοδος). Όταν ο ελεγκτής χρησιμοποιεί μέτρηση της εξόδου καλείται *έλεγχος ανατροφοδότησης (feedback control)* (σύστημα κλειστού βρόχου). Ο *αλγόριθμος* που είναι εγκατεστημένος στον ελεγκτή ονομάζεται *νόμος ανατροφοδότησης (feedback law)*. Στόχος της σχεδίασης συστημάτων ελέγχου είναι ο προσδιορισμός κατάλληλου σήματος εισόδου, έτσι ώστε η διεργασία να έχει επιθυμητή συμπεριφορά. Η *επιθυμητή συμπεριφορά* της διεργασίας ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της και τη λειτουργία που αυτή καλείται να εκτελέσει (Κίνγκ, 1996).

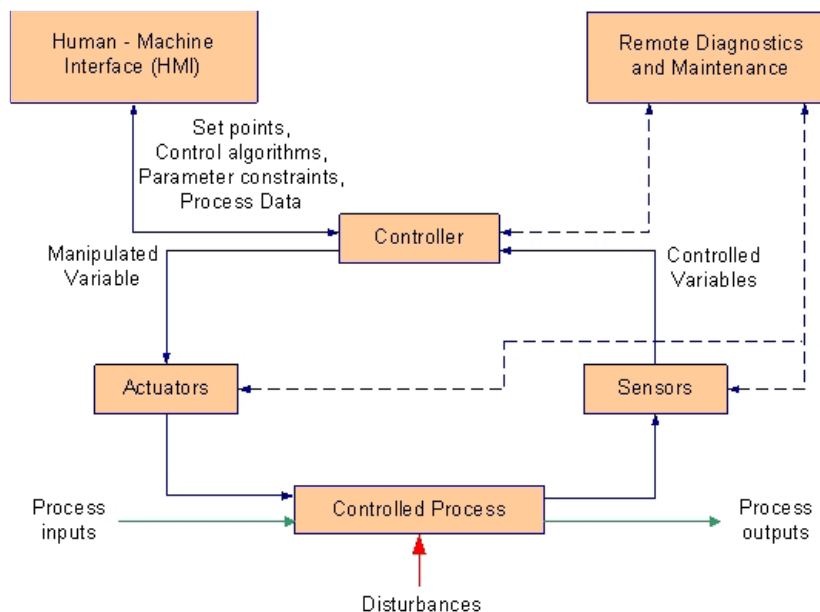
Στην είσοδο κάθε ελεγχόμενου συστήματος απαραίτητη μονάδα αποτελεί η συσκευή που ονομάζεται *ενεργοποιητής (actuator)*. Η συσκευή αυτή μετατρέπει την εντολή εισόδου σε μεταβλητή κατάλληλη να ενεργοποιήσει το σύστημα. Στην έξοδο του συστήματος είναι αναγκαία μια επιπλέον συσκευή που καλείται *αισθητήρας (sensor)*. Το όργανο αυτό μετρά την τιμή της εξόδου και την αποδίδει σε μορφή συνήθως *ηλεκτρικού σήματος* στον ελεγκτή. Ο αισθητήρας και ο ενεργοποιητής αποτελούν την *διεπαφή (interface)* της διεργασίας με κάθε ευφύες περιβάλλον (π.χ. υπολογιστής) (Σχ.22). (Κίνγκ, 1994, 1996; Χασάπης, 2015).



Σχήμα 22. Δομή ελέγχου διεργασίας (προσαρμογή από Κίνγκ, 1994).

Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί, γενικά, το σήμα εξόδου (απόδοση/συμπεριφορά/απόκριση) του συστήματος έτσι ώστε να μεγιστοποιεί την πληροφορία που γνωρίζει για τη διεργασία και έτσι να διορθώνει αυτόματα την επιλογή της κατάλληλης εντολής εισόδου. Από την άλλη, η εξωτερική είσοδος είναι ένα σήμα (ή περισσότερα) που αντιπροσωπεύει την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος στο σύστημα κλειστού βρόχου. Η εξωτερική είσοδος αντιστοιχεί σε (Σχ.23)(Κίνγκ, 1994, 1996; Χασάπης, 2015):

- Διαταραχές που επιδρούν στη διεργασία, δηλαδή εισόδους που δεν μπορούν να ελεγχθούν, και δεν επιδέχονται εφαρμογή ενεργοποιητή. Διεπαφή χρήστη-μηχανής, που αφορά σήμα πραγματικού χρόνου που παράγει ο χρήστης της διεργασίας επεμβαίνοντας άμεσα στην απόδοση της.
- Επιθυμητή απόδοση, που αφορά σήμα που εισάγεται στον ελεγκτή από το σχεδιαστή και αντιπροσωπεύει την επιθυμητή απόδοση της διεργασίας ή κατάλληλο μετασχηματισμό της.

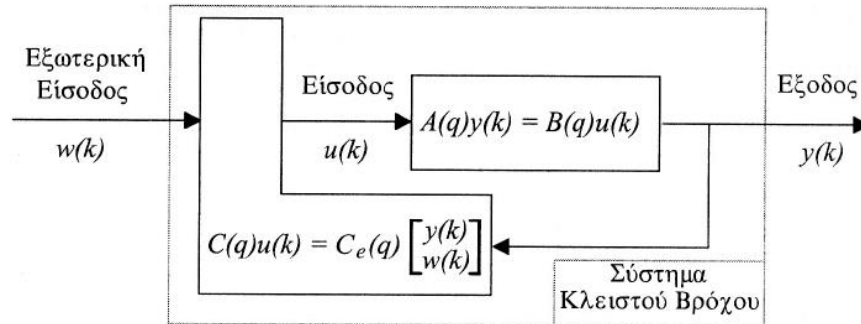


Σχήμα 23. Δομή βιομηχανικού ελέγχου (προσαρμογή από Βελώνη, 2015α³).

³ Βελώνη, Α. (2015α). Ολοκληρωμένος βιομηχανικός έλεγχος-ενότητα 5, Πρακτικές Εφαρμογές Των Συστημάτων SCADA Στην Βιομηχανία, παρουσίαση, Open Courses, TEI ΠΕΙΡΑΙΑ.



Στην περίπτωση που η διεργασία και ο ελεγκτής είναι γραμμικά χρονικά αμετάβλητα δυναμικά συστήματα η χονδρική δομή της διάταξης κλειστού βρόχου λαμβάνει την ειδική μορφή, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Κίνγκ, 1996):



Σχήμα 24. Δομή δυναμικού ελέγχου κλειστού βρόχου (προσαρμογή από Βελώνη, 2015β⁴).

Η διεργασία είναι ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα με μαθηματική περιγραφή (Κίνγκ, 1996):

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) \quad (12)$$

όπου

$$A(q) = q^n + a_1 q^{n-1} + \dots + a_n q^0 \quad (13)$$

και

$$B(q) = b_0 q^n + \dots + b_n q^0 \quad (14)$$

Ο ελεγκτής είναι ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα με μαθηματική περιγραφή:

$$C(q)u(q) = C_e(q) \begin{bmatrix} y(k) \\ w(k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

⁴ Βελώνη, Α. (2015β). Ολοκληρωμένος βιομηχανικός έλεγχος-ενότητα 2, Βιομηχανικός Αυτόματος Έλεγχος με PID Ελεγκτές, παρουσίαση, Open Courses, ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ.



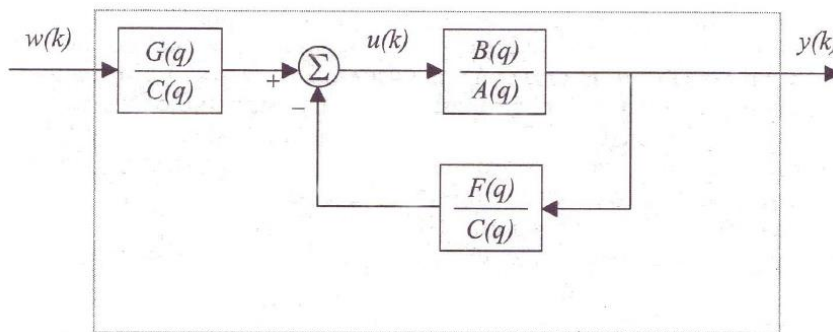
όπου $C(q)$ είναι ένα πολυώνυμο του τελεστή προήγησης q και $C_e(q)$ είναι πολυωνυμικό διάνυσμα 1×2 του τελεστή προήγησης q :

$$C(q) = q^\sigma + c_1 q^{\sigma-1} + \dots + c_\sigma q^0$$

$$C_e(q) = \langle -F(q) \mid G(q) \rangle$$

$$F(q) = f_0 q^\sigma + \dots + f_\sigma q^0, G(q) = g_0 q^\sigma + \dots + g_\sigma q^0 \quad (16)$$

όπου $\sigma = \text{deg}C$ η τάξη του ελεγκτή. Σύμφωνα με τους προηγούμενους μαθηματικούς φορμαλισμούς και αναλύοντας τον ελεγκτή, έχουμε το εξής σχήμα με τις αντίστοιχες μαθηματικές περιγραφές (Κίνγκ, 1996):



Σχήμα 25. Δομή συστήματος κλειστού βρόχου με ανάλυση του ελεγκτή σε δρόμο ανατροφοδότησης και δρόμο προαντιστάθμισης (προσαρμογή από Βελώνη, 2015β).

Η γενική δυναμική περιγραφή ενός ελεγκτή κλειστού βιομηχανικού ελέγχου, είναι (Κίνγκ, 1996):

$$C(q)u(k) = -F(q)y(k) + G(q)w(k) \quad (17)$$

και ονομάζεται νόμος ελέγχου. Η έξοδος (output) του ελεγκτή οδηγεί ως είσοδος τη διεργασία. Η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή εξαρτάται από (Κίνγκ, 1996; Χασάπη, 2015):

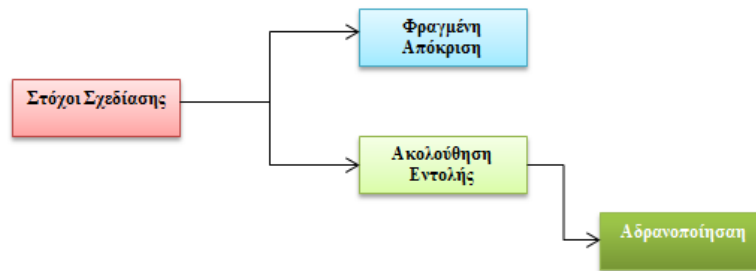
- τη δομή της διεργασίας,
- και τον σχεδιαστικό στόχο τον οποίο πρέπει αυτός να επιτύχει.

Οι απαιτήσεις συμπεριφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου, που συναντώνται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, συνοψίζονται στους ακόλουθους στόχους σχεδίασης (Σχ.26)(Κίνγκ, 1996; Χασάπη, 2015):

- *Φραγμένη Απόκριση (Bounded Response)*. Αφορά την έξοδο του συστήματος, που πρέπει να παραμένει φραγμένη, για οποιαδήποτε φραγμένη εξωτερική είσοδο και για οποιοδήποτε αρχικές τιμές εξωτερικής εισόδου και εξόδου.



- *Ακολουθήση Εντολής (Command Following)*. Αφορά την έξοδο $y(k)$ του συστήματος, που πρέπει να ακολουθεί μια επιθυμητή απόκριση (εντολή) $yd(k)$ ($y(k) \cong yd(k)$). Μια ειδική περίπτωση ακολουθήσης εντολής είναι η περίπτωση που το επιθυμητό σήμα είναι ίσο με το μηδέν, οπότε ο σχεδιαστικός στόχος αντιστοιχεί στην *αδρανοποίηση (relaxation)* του συστήματος κλειστού βρόχου.



Σχήμα 26. Στόχοι σχεδίασης βιομηχανικών συστημάτων κλειστού βρόχου.

Βασική αρχή στον βιομηχανικό έλεγχο είναι η *αρχή της ανατροφοδότησης*. Στόχος ενός ελεγκτή είναι ο *μηδενισμός του σφάλματος* για κάθε συνθήκη λειτουργίας. Ο *ελεγκτής τριών όρων (PID)* είναι ουσιαστικά ένας *ελεγκτής - αντισταθμιστής σειράς* που τοποθετείται στον απ' ευθείας κλάδο του κλειστού συστήματος και ρυθμίζει το σήμα $u(s)$ που οδηγεί το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη την *απόκλιση (σφάλμα)* $e(s)$ της εισόδου από την έξοδο (Σχ.27) Ο ελεγκτής τριών όρων περιγράφεται από τον εξής νόμο ελέγχου (Κίνγκ, 1994, 1996):

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) = PID \quad (18)$$

όπου:

- $u(t)$ είναι η μεταβλητή ελέγχου και αποτελεί την έξοδο του ελεγκτή και είσοδο της διαδικασίας.
- $e(t) = ysp - y(t)$ είναι το σφάλμα μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής τιμής της εξόδου $y(t)$ της διαδικασίας υπό έλεγχο.

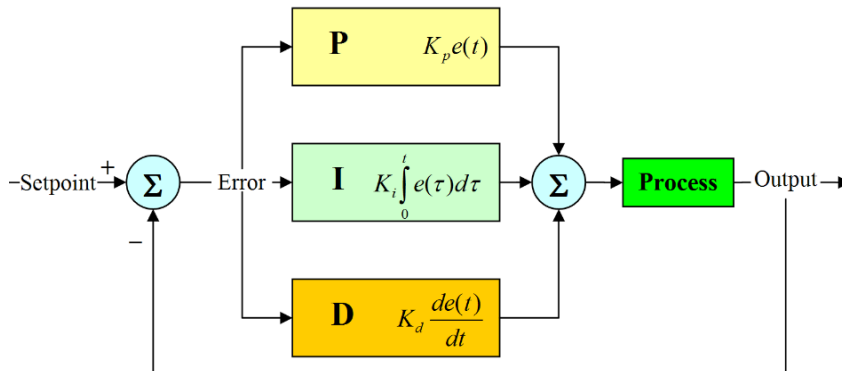
Η *μεταβλητή ελέγχου*, δηλαδή η έξοδος του ελεγκτή είναι το άθροισμα τριών όρων (Κίνγκ, 1996):

- του *αναλογικού όρου P* (ανάλογο του σφάλματος),
- του *ολοκληρωτικού όρου I* (ανάλογο του ολοκληρώματος του σφάλματος) και
- του *όρου παραγωγισμού D* (ανάλογο της παραγώγου του σφάλματος).



Γενικά, οι παράμετροι ενός βιομηχανικού ελεγκτή τριών όρων είναι (Κουμπουλής, 1999):

- το αναλογικό κέρδος K ,
- χρόνος ολοκλήρωσης T_i , και
- ο χρόνος παραγωγισμού T_d .



Σχήμα 27. Ελεγκτής τριών όρων PID (προσαρμογή από <http://wrohellas.ning.com>).

Η συνάρτηση μεταφοράς του PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{19}$$

Οι επιδράσεις των όρων K_p , K_i , K_d σε ένα βιομηχανικό σύστημα ελέγχου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Κουμπουλής, 1999):

Πίνακας 1. Επιδράσεις των τριών όρων του PID (προσαρμογή από Βελώνη 2015β)

Απόκριση Κλειστού Βρόχου	Χρόνος Ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα
K_p	Μείωση	Αύξηση	Μικρή αλλαγή	Μείωση
K_i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
K_d	Μικρή αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή αλλαγή

Ο βιομηχανικός έλεγχος συνήθως στρέφεται σε εμπειρικές μεθόδους για τον συντονισμό των ελεγκτών τριών όρων που κυριαρχούν στην παραγωγή (έλεγχο διεργασιών). Ο συντονισμός ενός τέτοιου ελεγκτή απαιτεί γνώση της σχέσης μεταξύ των τιμών των σταθερών του ελεγκτή και την παρατηρούμενη βηματική απόκριση της έλεγχο διαδικασίας. Η γνώση αυτή μπορεί να αποτυπωθεί ως ένα



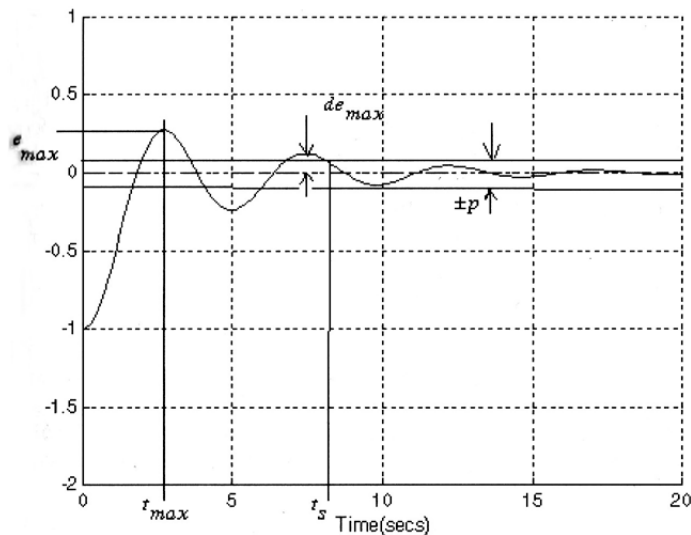
σύνολο κανόνων που ενσωματώνονται σε *αυτο-συντονιζόμενους ελεγκτές (auto-tuning)* νέας γενιάς (Χασάπης, 2015; Κουμπουλής, 1999).

Κάθε μέθοδος συντονισμού πρέπει να αποβλέπει στο συμβιβασμό μεταξύ πολλών και συχνά αλληλο-συγκρουόμενων απαιτήσεων. Οι πιο συνήθεις απαιτήσεις είναι οι εξής (Κίνγκ, 1996; Κουμπουλής, 1999):

- ταχεία απόσβεση των επιπτώσεων των διαταραχών φορτίου,
- ταχεία απόσβεση των επιπτώσεων του θορύβου στις μετρήσεις,
- χαμηλή ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων της διαδικασίας, και
- μικρός χρόνος απόκρισης του συστήματος.

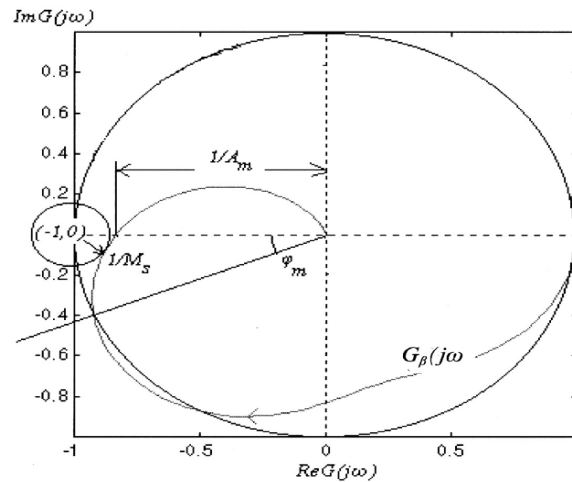
Οι προδιαγραφές ενός βιομηχανικού συστήματος ελέγχου όσο αφορά τον βιομηχανικό ελεγκτή, περιλαμβάνουν (Χασάπης, 2015):

- την *ικανότητα εξασθένισης των διαταραχών φορτίου*, αφού αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των μεταβλητών της διαδικασίας από τις επιθυμητές τους τιμές (Σχ.28).



Σχήμα 28. Τυπική απόκριση διαδικασίας με βηματική διέγερση της εισόδου. Τα χαρακτηριστικά της βηματικής απόκρισης χρησιμοποιούνται συχνά για να προσδιορίσουν την απόκριση σε διαταραχές φορτίου (προσαρμογή από Βελώνη, 2015β).

- την *ευαισθησία του συστήματος σε θόρυβο* στις μετρήσεις (Σχ.29).



Σχήμα 29. Ευαισθησία στα χαρακτηριστικά της διαδικασίας. Χαρακτηριστικά της καμπύλης Nyq (προσαρμογή από Βελώνη, 2015β).

- τη *σιβαρότητα* (ή *σθεναρότητα*) του ελεγκτή στην αβεβαιότητα του προτύπου.
- την *πιστότητα* της παρακολούθησης των επιθυμητών τιμών της εξόδου της διαδικασίας.

Οι παραπάνω προδιαγραφές μπορούν να εκφραστούν στο πεδίο χρόνου ή στο πεδίο συχνότητας. Στον επόμενο πίνακα, φαίνονται δύο βασικές μέθοδοι συντονισμού βιομηχανικών ελεγκτών PID (Κίνγκ, 1996; Κουμπουλής, 1999; Παρασκευόπουλος, 1991):

Πίνακας 2. Μέθοδοι Συντονισμού PID (προσαρμογή από Βελώνη 2015β)

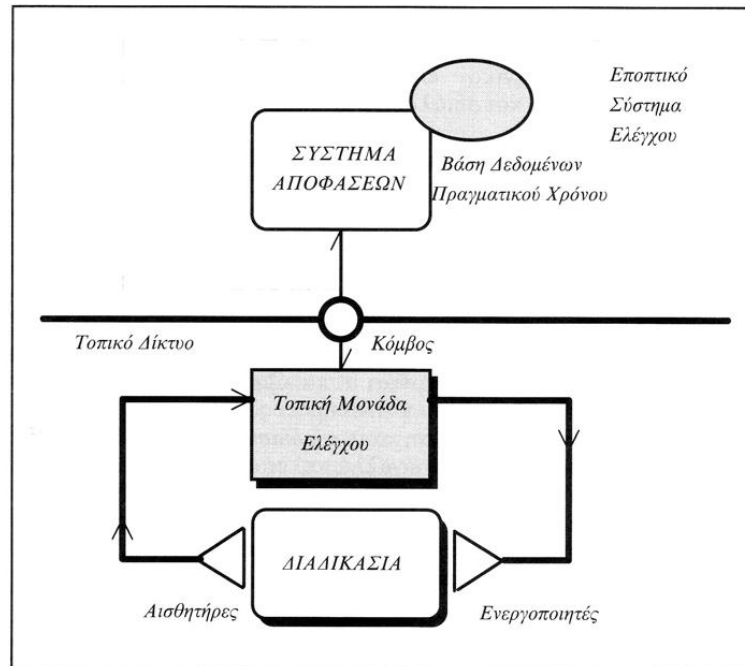
Τύπος ελεγκτή	Ziegler-Nichols Original Method	Μέθοδος τροποποίησης	Cohen-Coon Method
Αναλογία (Proportional)	$K_c = 0.5K_{cp}$	Προσαρμόζεται το κέρδος για να έχουμε στη δεύτερη περίοδο το 1/4 του εύρους που αντιστοιχεί στη πρώτη περίοδο.	$K_c = \frac{1}{K} \left(\frac{1}{a} + 0.333 \right)$
Αναλογία και Ολοκλήρωση (Proportional & Integral)	$K_c = 0.45K_{cp}$ $T_i = T_o / 1.2$ (min)	Προσαρμόζεται το κέρδος για να έχουμε στη δεύτερη περίοδο το 1/4 του εύρους που αντιστοιχεί στη πρώτη περίοδο. $T_i = T_o$ (min)	$K_c = \frac{1}{K} \left(\frac{0.9}{a} + 0.082 \right)$ $T_i = \tau \left[\frac{3.33a + 0.333a^2}{1 + 2.2a} \right]$
PID Proportional, Integral, derivative	$K_c = 0.6 K_{cp}$ $T_i = T_o / 2$ (min) $T_d = T_o / 8$ (min)	Προσαρμόζεται το κέρδος για να έχουμε στη δεύτερη περίοδο το 1/4 του εύρους που αντιστοιχεί στη πρώτη περίοδο. $T_i = T_o / 1.5$ (min) $T_d = T_o / 6$ (min)	$K_c = \frac{1}{K} \left[\frac{1.35}{a} + 0.270 \right]$ $T_i = \tau \left[\frac{2.5a + 0.5a^2}{1 + 0.6a} \right]$ $T_d = \tau \left[\frac{0.37a}{1 + 0.2a} \right]$



Υπάρχουν οι εξής βασικοί τύποι βιομηχανικού ελέγχου (Σχ.22)(Κίνγκ, 1994, 1996):

- *έλεγχος μοναδικού βρόχου* (single loop control) (περισσότερα), όπου μία μεταβλητή της ελεγχόμενης διαδικασίας ελέγχεται αποκλειστικά από έναν ελεγκτή που δεν έχει διασύνδεση με άλλον.
- *έλεγχος λόγου* (ratio control), όπου απαιτείται η τήρηση ενός σταθερού λόγου μεταξύ δύο (ή περισσότερων) μεταβλητών της ελεγχόμενης διαδικασίας.
- *διαδοχικός έλεγχος* (cascade control), όπου απαιτούνται δύο ή περισσότεροι διασυνδεδεμένοι βρόχοι ελέγχου.
- *έλεγχος πρόσμικξης* (blending control), όπου απαιτείται ο ποσοστιαίος έλεγχος δύο ή περισσότερων ποσοτήτων.

Τέλος, στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα σύγχρονο σύστημα ελέγχου:



Σχήμα 30. Δομή ενός σύγχρονου συστήματος ελέγχου (προσαρμογή από Βελώνη, 2015β).

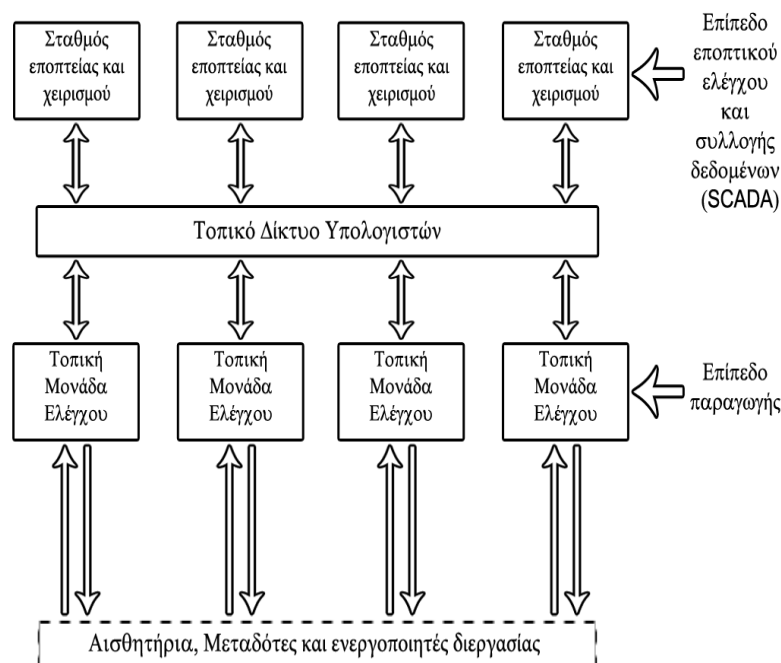
3.2 Αρχιτεκτονική Συστημάτων Βιομηχανικού Ελέγχου

Η αρχιτεκτονική συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου αφορά (Χασάπης, 2015; Κίνγκ, 1994): (α) τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται και με τα οποία δομείται συνήθως ένα τέτοιο σύστημα, (β) τις λειτουργίες που επιτελεί, (γ) τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η υλοποίηση των λειτουργιών αυτών στα επιμέρους στοιχεία καθώς και (δ) τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούν τα στοιχεία αυτά μεταξύ τους.



Κατά την ιστορική της διαδρομή η εφαρμογή των υπολογιστών στον βιομηχανικό αυτοματισμό και ειδικότερα η αρχιτεκτονική των πρώτων συστημάτων στηρίχθηκε στη χρήση ενός κεντρικού υπολογιστή. Το μεγάλο μειονέκτημα ήταν ότι οποιαδήποτε βλάβη του κεντρικού υπολογιστή είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη διακοπή της λειτουργίας των ελεγχόμενων βιομηχανικών μονάδων. Από τη δεκαετία του '60 και μετά, οι σχεδιαστές λαμβάνοντας υπόψη τα όποια προβλήματα, άρχισαν να σκέπτονται τη λύση της *αρχιτεκτονικής των κατανεμημένων υπολογιστικών συστημάτων*. Σύμφωνα με αυτή, οι λειτουργίες ελέγχου θα μπορούσαν να χωριστούν σε πολλές ομάδες *ομοειδών λειτουργιών*. Τις λειτουργίες καθεμιάς ομάδας ή μικρού αριθμού ομάδων θα τις αναλάμβαναν ανεξάρτητοι υπολογιστές *μικρής σχετικά υπολογιστικής ισχύος*. Επίσης, απαιτείται η επικοινωνία μεταξύ των μονάδων, για να υπάρχει συντονισμένη εκτέλεση του συνόλου των λειτουργιών. Το 1971 με την εμφάνιση του *μικροεπεξεργαστή*, η ιδέα της *κατανεμημένης αρχιτεκτονικής* αρχίζει να κερδίζει έδαφος. Από τότε αρχίζουν να κατασκευάζονται *μαζικά κατανεμημένα υπολογιστικά συστήματα*, ολοκληρωμένα από άποψη υλικού και λογισμικού και κατάλληλα για απευθείας σύνδεση με τα αισθητήρια και τους ενεργοποιητές κάθε βιομηχανικής διεργασίας.

Η αρχιτεκτονική των περισσότερων κατανεμημένων συστημάτων παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά και μπορεί να περιγραφεί αντιπροσωπευτικά από το επόμενο σχήμα. Πρόκειται για μια *αρχιτεκτονική αναφοράς* που περιγράφει στο μεγαλύτερο δυνατό επίπεδο *αφαίρεσης (abstract level)*, τη βασική δομή κάθε τέτοιου συστήματος και τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται (Χασάπης, 2015).

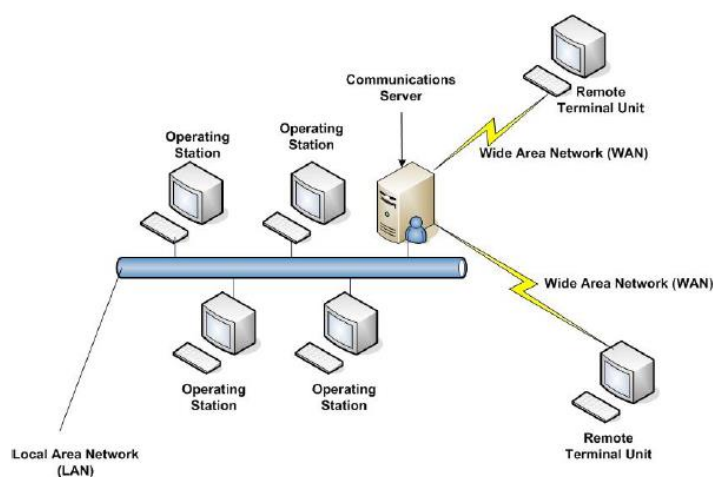


Σχήμα 31. Αρχιτεκτονική αναφοράς κατανεμημένου υπολογιστικού συστήματος βιομηχανικού ελέγχου (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).



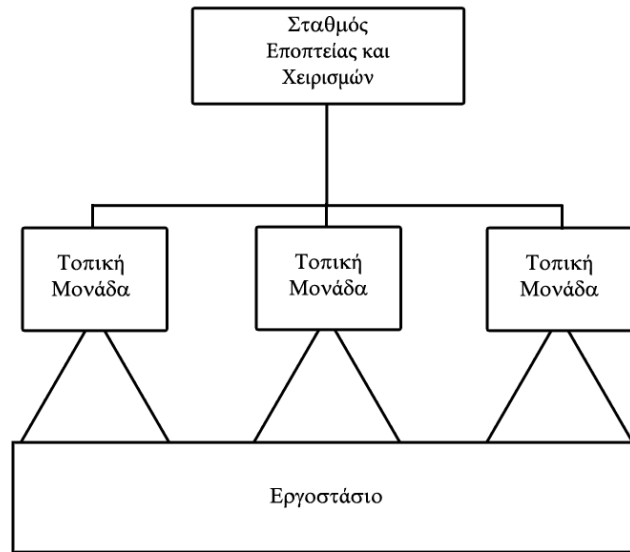
Η γενική αυτή αρχιτεκτονική εξαρτώμενη από το μέγεθος της βιομηχανικής διεργασίας και τη φύση των προβλημάτων ελέγχου, καθορίζεται επακριβώς από την περιγραφή του απαιτούμενου αριθμού των υπολογιστικών μονάδων και των επιπέδων της ιεραρχικής τους οργάνωσης, του τρόπου επικοινωνίας, των λειτουργιών που πρέπει να επιτελεστούν από τις μονάδες κάθε επιπέδου καθώς και της εσωτερικής δομής του υλικού, λογισμικού συστήματος και λογισμικού εφαρμογής καθεμίας χωριστά υπολογιστικής μονάδας. Ωστόσο, ως βασικός πυρήνας παραμένουν τα δύο πρώτα επίπεδα, δηλαδή το επίπεδο των μονάδων τοπικού ελέγχου και το επίπεδο των σταθμών εποπτείας και χειρισμών το οποίο εναλλακτικά ονομάζεται και επίπεδο εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (*Supervisory and Data Acquisition (SCADA)*)(Σχ.32). Ο όρος SCADA αναφέρεται σε ολόκληρο το κεντρικό σύστημα. Το κεντρικό σύστημα παρακολουθεί συνήθως τα δεδομένα από διάφορους αισθητήρες που βρίσκονται είτε σε κοντινή απόσταση ή εκτός του χώρου (Κίνγκ, 1994, 1996).

Σε αυτό το δεύτερο επίπεδο (SCADA) μπορεί να υπάρξουν άλλα υπολογιστικά μέσα που θα υλοποιούν πρόσθετες λειτουργίες ελέγχου. Συνήθως, αυτές αφορούν βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων και προγραμματισμό της παραγωγής (Χασάπης, 2015).



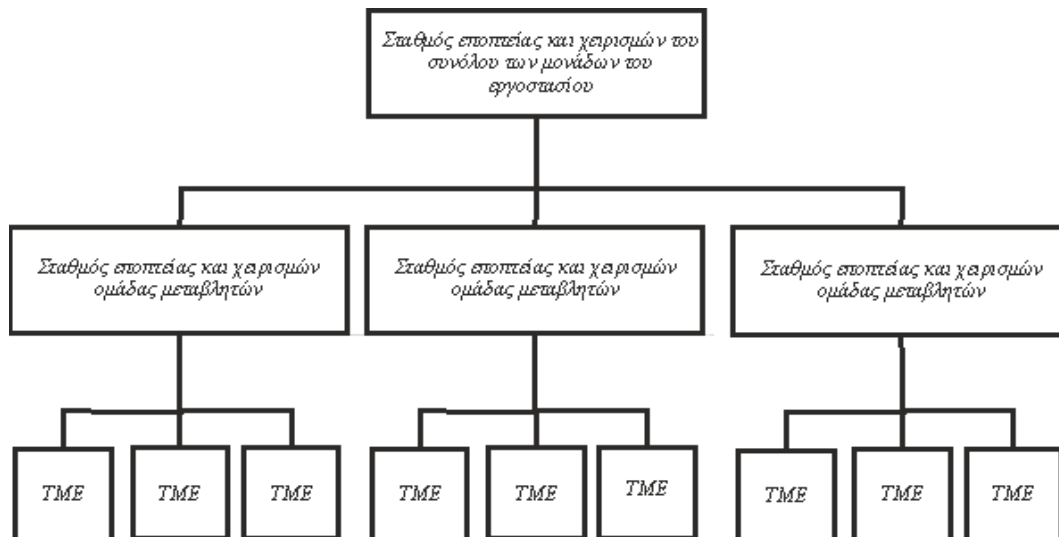
Σχήμα 32. Αρχιτεκτονική SCADA συστήματος (προσαρμογή από Βελώνη, 2015β).

Επομένως, για τον έλεγχο μιας μικρής βιομηχανικής μονάδας πιθανόν να επαρκούσε ένα υπολογιστικό σύστημα της μορφής που παριστάνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 33. Αρχιτεκτονική υπολογιστικού συστήματος ελέγχου μιας μικρής βιομηχανικής μονάδας (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Σε αντίθεση με το παραπάνω σύστημα, για τον έλεγχο ενός μεγάλου βιομηχανικού συγκροτήματος, χρησιμοποιείται ένα υπολογιστικό σύστημα με αρχιτεκτονική όπως αυτή απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 34. Αρχιτεκτονική υπολογιστικού συστήματος ελέγχου μιας μεγάλης βιομηχανικής μονάδας (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Ανάλογα με τον αν μια βιομηχανία είναι *συνεχούς παραγωγής* ή *κατασκευαστική*, οι λειτουργίες ελέγχου της μπορούν να ενταχθούν σε ένα διαφορετικό αριθμό ιεραρχικών επιπέδων. Οι λειτουργίες οργανισμών συνεχούς παραγωγής μπορούν να ενταχθούν στα εξής τέσσερα ιεραρχικά επίπεδα:

- *Επίπεδο 1:* άμεσος αυτόματος έλεγχος και παρακολούθηση λειτουργίας



- *Επίπεδο 2*: εποπτικός έλεγχος
- *Επίπεδο 3*: χρονοπρογραμματισμός και λογιστικός έλεγχος παραγωγής
- *Επίπεδο 4*: διαχείριση παραγωγής



Σχήμα 35. Ταξινόμηση λειτουργιών κατασκευαστικής βιομηχανίας σε ιεραρχικά επίπεδα (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Αναλυτικά ανά επίπεδο, οι λειτουργίες που το αφορούν είναι οι εξής (Χασάπης, 2015):

- ✚ *Επίπεδο 1*: Άμεσος αυτόματος έλεγχος και παρακολούθηση λειτουργίας
 - ✓ συλλογή δεδομένων,
 - ✓ εξακρίβωση ορθότητας δεδομένων,
 - ✓ παρακολούθηση λειτουργίας εργοστασίου,
 - ✓ αυτόματος έλεγχος μεταβλητών ανοικτού και κλειστού βρόχου,
 - ✓ αναφορές.
- ✚ *Επίπεδο 2*: Εποπτικός Έλεγχος
 - ✓ παρακολούθηση απόδοσης εργοστασίου,
 - ✓ συντονισμός εργοστασίου,
 - ✓ βέλτιστος έλεγχος διεργασιών,
 - ✓ προσαρμοστικός έλεγχος,
 - ✓ διάγνωση βλαβών.
- ✚ *Επίπεδο 3*: Χρονοπρογραμματισμός και λογιστικός έλεγχος παραγωγής
 - ✓ διάθεση παραγωγής,
 - ✓ έλεγχος αποθεμάτων,
 - ✓ επίβλεψη παραγωγής,
 - ✓ χρονοπρογραμματισμός παραγωγής.,
 - ✓ Αναφορές παραγωγής.
- ✚ *Επίπεδο 4*: Διαχείριση παραγωγής
 - ✓ ανάλυση αγοράς,
 - ✓ στατιστική παραγγελιών και πωλήσεων,
 - ✓ ισοζύγιο παραγωγής και παραγγελιών,

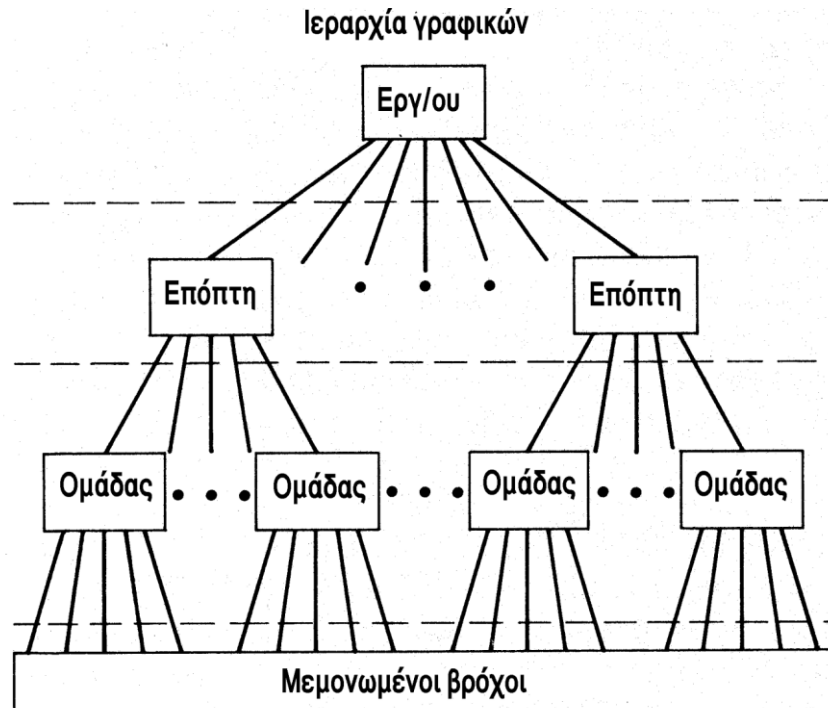


- ✓ ικανοποίηση παραγγελιών,
- ✓ σχεδιασμός παραγωγής,
- ✓ παρακολούθηση συμβολαίων,
- ✓ οικονομικές ανασκοπήσεις.

Ειδικότερα, το πρώτο κατώτερο επίπεδο της ταξινόμησης αυτής περιλαμβάνει τα αισθητήρια, τους ενεργοποιητές και άλλα εξαρτήματα υλικού που χρειάζονται για την υλοποίηση του ελέγχου των βασικών λειτουργιών τις οποίες εκτελεί κάθε μηχανή, όπως μια φρέζα, ένας τόννος, ένα βιομηχανικό ρομπότ, μια μεταφορική ταινία ή ένα αυτοκινούμενο όχημα. Στο αμέσως επόμενο επίπεδο, (επίπεδο μηχανής), προσδιορίζεται η ακολουθία βημάτων που πρέπει να εκτελέσει κάθε ελεγχόμενη από τον εξοπλισμό του πρώτου επιπέδου μηχανή και βάσει του αριθμητικού ελέγχου που υλοποιεί ένας υπολογιστής. Το τρίτο επίπεδο (επίπεδο κυψέλης (cell)) αναφέρεται σε σύνολο ομάδας μηχανών που μπορεί να αποτελείται από εργαλειομηχανές διασυνδεδεμένες με εξοπλισμό διακίνησης υλικών, όπως είναι ταινιόδρομοι ή ρομποτικοί βραχίονες ή αυτοκινούμενα οχήματα, ή από άλλο εξοπλισμό που σχετίζεται με συγκεκριμένη κατασκευαστική διεργασία. Στο τελευταίο υψηλότερο επίπεδο (επίπεδο διεύθυνσης) αφορούν την προώθηση των προϊόντων, το λογιστήριο, την έρευνα και ανάπτυξη καθώς και την εκπόνηση του μεσοπρόθεσμου ή μακροπρόθεσμου χρονοδιαγράμματος παραγωγής προϊόντων (Χασάπη, 2015).

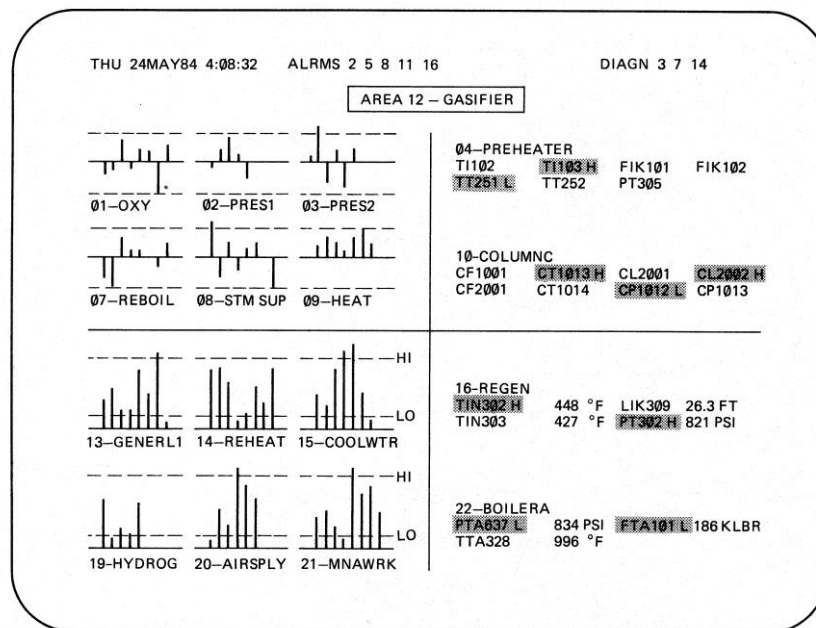
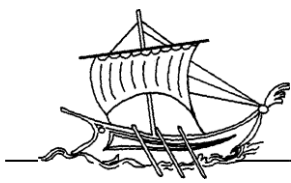
Για τον ασφαλή και αποτελεσματικό έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών είναι απολύτως απαραίτητο να υπάρχει κάποιο φιλικό προς τον άνθρωπο μέσο παρακολούθησης των δυναμικών μεταβολών των ελεγχόμενων και άλλων μεταβλητών και επέμβασής του κατά τη διάρκεια εκκίνησης, κανονικής λειτουργίας και παύσης των διεργασιών αυτών. Επίσης, είναι εξίσου απαραίτητο να επιτρέπει τη ρύθμιση και συντήρηση των τοπικών μονάδων ελέγχου. Έτσι, απαιτούνται γραφικά της μορφής (Σχ.36)(Κίνγκ, 1994, Χασάπη, 2015):

- Γραφικά επιπέδου εποπτικής παρακολούθησης της λειτουργίας ολόκληρου του βιομηχανικού συγκροτήματος (Plant Overview Display).
- Γραφικά επιπέδου εποπτικής παρακολούθησης της λειτουργίας ενός τμήματος του συγκροτήματος (Area Overview Display).
- Γραφικά επιπέδου ομάδας μεταβλητών (Group Display).
- Γραφικά μεμονωμένων βρόχων (Detailed Display).



Σχήμα 36. Τυπική ιεραρχική δομή οθονών εποπτείας και χειρισμού (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Η οθόνη ενός επιπέδου μπορεί να αναλύεται σε πολλές οθόνες του επόμενου προς τα κάτω επιπέδου (Εικ.3). Ο τρόπος παρουσίασης της πληροφορίας που χρειάζεται για τη λειτουργία ενός βιομηχανικού συγκροτήματος είναι πολύ κοντά στο νοητικό πρότυπο του κλασικού πίνακα ελέγχου, με τη χρήση του οποίου έχουν εξοικειωθεί οι περισσότεροι χειριστές. Ταυτόχρονα με τον τρόπο αυτό καλύπτονται όλες οι λεπτομέρειες που ενδέχεται να χρειαστεί ο χειριστής/χρήστης και παρέχεται η δυνατότητα διαχωρισμού των λεπτομερειών αυτών σε ομάδες που να ταιριάζουν στη δομή των φυσικών διεργασιών, ή των λογικών σχέσεων που μπορεί να υφίστανται μεταξύ των λεπτομερειών. Ωστόσο, η ακριβής επιλογή των γραφικών παραστάσεων μέσω των οποίων γίνεται η απεικόνιση της πληροφορίας δεν είναι τυποποιημένη και ποικίλλει μεταξύ των διαφόρων κατασκευαστών (Χασάπη, 2015).



Εικόνα 3. Οθόνη για την εποπτεία συνόλου μονάδων βιομηχανίας (προσαρμογή από Χασάπη, 2015)

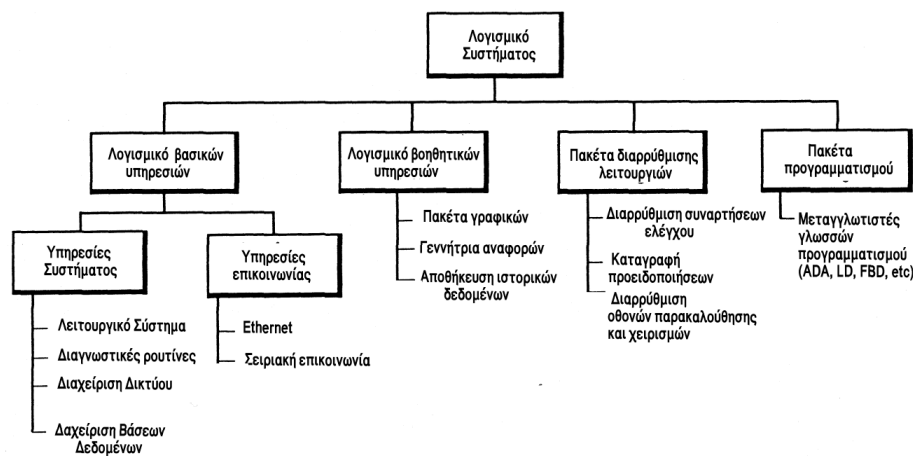
3.3 Λογισμικό

Για να επιτελούν τα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου τις λειτουργίες τους, και για να μπορούν να προγραμματίζονται εύκολα και αποτελεσματικά από τους χρήστες με σκοπό να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του ελέγχου των βιομηχανικών διεργασιών, χρειάζεται η ύπαρξη κατάλληλου λογισμικού (*software*). Όπως συμβαίνει σε κάθε υπολογιστικό σύστημα, έτσι και στα καταναμημένα συστήματα ελέγχου το λογισμικό διακρίνεται σε *λογισμικό του συστήματος* και σε *λογισμικό της εφαρμογής*. Το λογισμικό συστήματος αποτελείται από προγράμματα τα οποία βοηθούν το χρήστη να αναπτύξει, δημιουργήσει, δοκιμάσει, τρέξει και συντηρήσει το λογισμικό εφαρμογών. Το λογισμικό εφαρμογών αφορά σε προγράμματα που σχεδιάζονται από τους χρήστες του υπολογιστή για να επιλύσουν συγκεκριμένα προβλήματα που δεν μπορεί να τα γνωρίζει ο κατασκευαστής του υπολογιστή. Για την ανάπτυξη και εκτέλεση των προγραμμάτων αυτών προϋποτίθεται η ύπαρξη και χρήση του λογισμικού συστήματος. Τέτοια προγράμματα μπορεί να είναι αυτά που εκτελούν την επεξεργασία αναλογικών/ψηφιακών σημάτων από αισθητήρια και τον υπολογισμό των τιμών των χειριζόμενων μεταβλητών (Κίνγκ, 1994; Χασάπης, 2015).

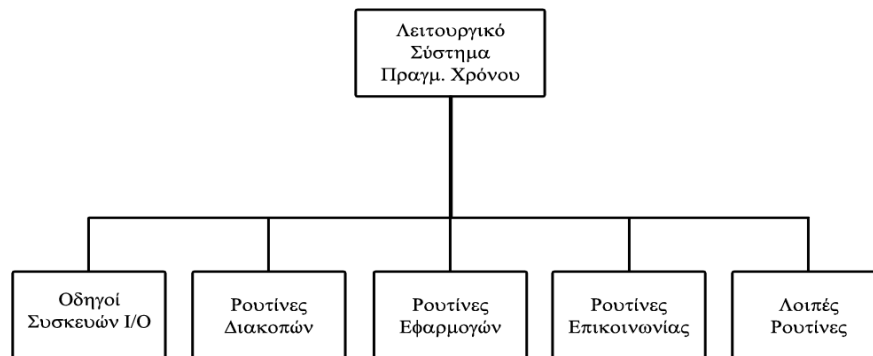
Τα *λογισμικό συστήματος* αποτελείται από το λογισμικό των *βασικών* και *βοηθητικών υπηρεσιών*, τα *πακέτα διαμόρφωσης* των προγραμμάτων εφαρμογής και τα *πακέτα προγραμματισμού*. Ένα δείγμα του είδους των προγραμμάτων που μπορεί να περιλαμβάνεται σε καθεμία από τις παραπάνω κατηγορίες λογισμικού



σε ένα τυπικό καταναμημένο σύστημα, δίνεται στο Σχ. 37 (Ρορονίς, 1990). Ωστόσο, η βάση του λογισμικού συστήματος είναι το *λειτουργικό σύστημα* (Σχ.38). Γενικά το λειτουργικό σύστημα είναι εγκατεστημένο σε καθένα από τα υπολογιστικά μέσα που διαθέτει το καταναμημένο σύστημα και διαχειρίζεται τη χρήση των πόρων του κάθε μέσου, όπως είναι ο επεξεργαστής, η μνήμη και οι περιφερειακές διατάξεις μαζικής αποθήκευσης δεδομένων. Επιπλέον, επιλύει συγκρούσεις αιτήσεων χρήσης ενός συγκεκριμένου μέσου από πολλούς χρήστες, βελτιστοποιεί την επίδοση του συνόλου των πόρων και βοηθά το χρήστη να υλοποιεί εύκολα προγράμματα εφαρμογών που εξαρτώνται από εξειδικευμένες περιφερειακές διατάξεις και προσαρμοστικά κυκλώματα. Ειδικά στον βιομηχανικό έλεγχο, πρέπει να διαχειρίζεται *προβλήματα χρονοπρογραμματισμού* της χρήσης των πόρων από πολλά προγράμματα σε *πραγματικό χρόνο (real-time)*. Συγκεκριμένα η διάθεση των απαιτούμενων μέσων για εκτέλεση επιλεγέντων προγραμμάτων και η εκτέλεση αυτή καθαυτή των προγραμμάτων πρέπει να υλοποιείται εντός *προδιαγεγραμμένων χρονικών ορίων*. Τα όρια αυτά προκύπτουν από την ανάγκη αντίδρασης του συστήματος σε σήματα που υποδηλώνουν την ύπαρξη *καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης* ή αντιστοιχούν σε *περιοδικές μετρήσεις ποσοτήτων* και μεταβλητών οι οποίες σχετίζονται με την *ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία των βιομηχανικών διεργασιών* (Κίνγκ, 1994; Χασάπης, 2015).



Σχήμα 37. Λογισμικό ενός τυπικού καταναμημένου συστήματος ελέγχου (προσαρμογή από Bernard, 1989).



Σχήμα 38. Δομή λειτουργικού συστήματος (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Σήμερα, το σύνολο των υπηρεσιών που αναφέρθηκαν τόσο για τοπικές μονάδες ελέγχου όσο και για σταθμούς εποπτείας και χειρισμών οι οποίοι χρησιμοποιούν πολυπύρηνους επεξεργαστές και υποστηρίζουν πολυεπεξεργασία (Χασάπης, 2015). Στον επόμενο πίνακα αναφέρονται ενδεικτικοί χρόνοι απόκρισης που απαιτούνται από τα υπολογιστικά μέσα για την πραγματοποίηση αντιπροσωπευτικών λειτουργιών ελέγχου του κάθε επιπέδου (Bernard, 1989).

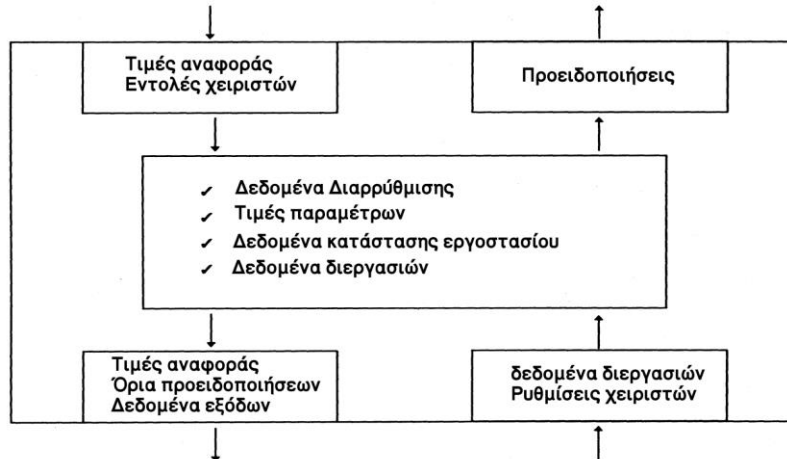
Πίνακας 3. Χρόνοι απόκρισης που απαιτούνται από τα υπολογιστικά μέσα καταναμημένου συστήματος βιομηχανικού ελέγχου (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Λειτουργία	Χρόνος απόκρισης	Μέγεθος και Τύπος Δεδομένων
Καθορισμός βέλτιστου σημείου λειτουργίας	2 – 6 sec	Μεταφορά μεγάλων αρχείων
Οδήγηση Μονάδων στο Σημείο Λειτουργίας	0.5 – 2 sec	Μεταφορά μεσαίου μεγέθους αρχείων
Διατήρηση Σημείου Λειτουργίας	0.01 – 1.0 sec	Ανταλλαγή μικρού μεγέθους δεδομένων
Μετρήσεις και άμεσος έλεγχος	0.001 – 0.1 sec	Ανταλλαγή μικρού μήκους δεδομένων
Αναγνώριση συνθηκών εκτάκτου ανάγκης	0.001 – 0.01 sec	Πολύ μικρού μήκους μηνύματα (1-12bits)

Επίσης, ένα άλλο είδος λογισμικού συστήματος είναι και οι βάσεις δεδομένων (*data base*) του συστήματος ελέγχου. Κάθε βάση δεδομένων περιέχει ένα σύνολο βασικών δεδομένων που σχετίζονται με μετρήσεις και με δεδομένα που δημιουργούνται από λειτουργίες του ιεραρχικού επιπέδου στο οποίο ανήκει. Η ροή δεδομένων προς τα ανώτερα ιεραρχικά επίπεδα είναι συνήθως μειωμένη, ενώ η ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση, αυξημένη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι λειτουργίες ελέγχου των χαμηλών επιπέδων συνδέονται άμεσα με ανάγκες καθημερινής λειτουργίας των βιομηχανικών διεργασιών, ενώ τα ανώτερα επίπεδα διεκπεραιώνουν το σχεδιασμό και το χρονοπρογραμματισμό της λειτουργίας των διεργασιών αυτών (Χασάπης, 2015).



Στο επόμενο σχήμα, φαίνεται η λειτουργία βάσεων δεδομένων που εξαρτώνται από τη σχετική θέση τους στην ιεραρχία του συστήματος. Καταγράφονται οι κατηγορίες των ομοειδών δεδομένων που αποθηκεύονται στη μια βάση δεδομένων και εκείνα τα δεδομένα που λαμβάνονται και αποστέλλονται από και προς τις άλλες βάσεις.



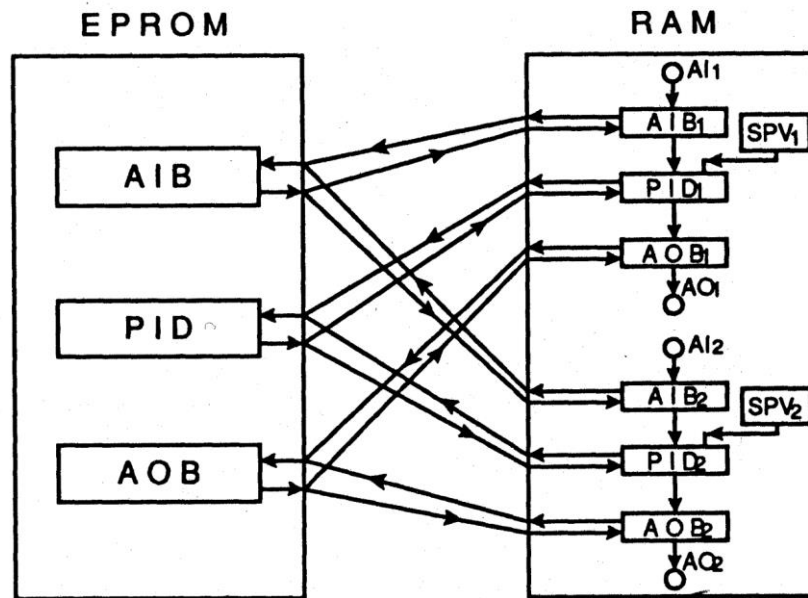
Σχήμα 39. Βάση Δεδομένων επιπέδου άμεσου ελέγχου (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Το λογισμικό εφαρμογών μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκει εκείνο το λογισμικό που εκτελεί τυποποιημένες λειτουργίες συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, ελέγχου μιας ανεξάρτητης μεταβλητής ή μερικών εξαρτώμενων μεταξύ τους μεταβλητών, γραφικής παρουσίασης δεδομένων κλπ. Το λογισμικό αυτό παρέχεται υπό τη μορφή παραμετροποιημένων προγραμμάτων βιβλιοθήκης, αποθηκευμένων, συνήθως, σε ROM ή EPROM. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει το λογισμικό που γράφεται από το χρήστη με στόχο να λύσει τις εξειδικευμένες ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής και οι οποίες μπορεί να μη λύνονται με τη χρήση των προγραμμάτων βιβλιοθήκης. Ως παράδειγμα αναφέρεται ο υπολογισμός των τιμών αναφοράς των διαφόρων ελεγχόμενων μεταβλητών που βελτιστοποιούν τη λειτουργία της βιομηχανικής διεργασίας. Αυτός ο υπολογισμός συνιστά μια εξειδικευμένη περίπτωση η οποία δε λύνεται με τη χρήση τυποποιημένων προγραμμάτων βιβλιοθήκης. Το αντίστοιχο λογισμικό που κάνει τους υπολογισμούς, γράφεται σε γλώσσες υψηλού επιπέδου, κατάλληλες για τέτοιες εφαρμογές (π.χ. C++, Python, ADA κλπ.). Τα κύρια χαρακτηριστικά των γλωσσών αυτών είναι η δυνατότητά τους να δημιουργούν πολλά προγράμματα τα οποία μπορούν να εκτελεστούν ταυτόχρονα από τα αντίστοιχα λειτουργικά συστήματα πολυ-προγραμματισμού και πραγματικού χρόνου (multitasking real-time systems)(Χασάπης, 2015).

Στο επόμενο σχήμα, παρουσιάζεται η χρήση στιγμιότυπων συναρτησιακών οντοτήτων για τη διαμόρφωση δύο διαφορετικών λογισμικών εφαρμογής (Poronic, 1990). Οι *συναρτησιακές οντότητες (functional blocks)* είναι ανεξάρτητα προγράμματα που αντιστοιχούν σε πολύ γνωστούς αλγορίθμους της μοντέρνας



θεωρίας του αυτόματου ελέγχου, επεξεργασίας σήματος και μηχανικής συστημάτων.

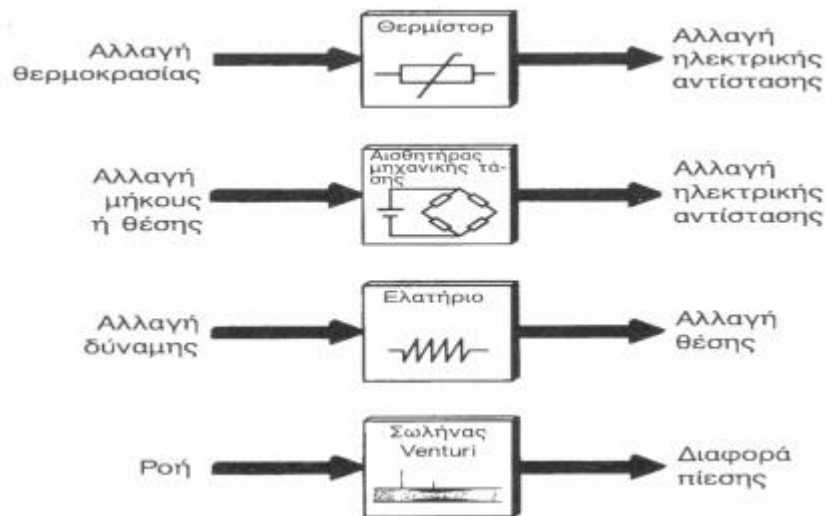


Σχήμα 40. Βάση Δεδομένων επιπέδου άμεσου ελέγχου (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

3.4 Υλοποίηση

Για να υλοποιηθούν τα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου, χρησιμοποιούνται διάφορα στοιχεία, όπως (Χασάπης, 2015; Κίνγκ, 1996; Κουμπουλής, 1999; Παρασκευόπουλος, 1991):

- *Αισθητήρας ή μετατροπέας (sensor)*, όπου είναι ένα στοιχείο που παράγει κάποιο ηλεκτρικό σήμα που αναλογεί σε κάποια ιδιότητα που μετριέται. Ειδικότερα, οι αισθητήρες είναι απλές ή σύνθετες συσκευές, όπου ανιχνεύουν ένα σήμα ή μια διέγερση, και παράγουν μια μετρήσιμη έξοδο. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, όπως στην βιομηχανία, στην ιατρική, στο στρατιωτικό ή οικιακό τομέα (Σχ.41). Από την άλλη, ο μετατροπέας είναι μια οποιαδήποτε συσκευή που μετασχηματίζει μια μορφή ενέργειας σε μία άλλη (λαμπτήρας πυράκτωσης). Ο αισθητήρας είναι συνήθως ένας μετατροπέας αλλά δεν ισχύει το αντίθετο (Χατζηευφραιμίδης, 2005).



Σχήμα 41. Βάση Δεδομένων επιπέδου άμεσου ελέγχου (προσαρμογή από Χατζηευφραιμίδης, 2005)

Η τεχνολογία των μετατροπέων εισόδου, αισθητηρίων έχει εξελιχθεί ώστε να είναι συμβατή κυρίως με τις περισσότερο σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των ελεγκτών. Μέχρι τη δεκαετία του '50, τα όργανα στις βιομηχανίες, όπως λεγόταν το σύνολο των μετατροπέων εισόδου, αισθητηρίων, ελεγκτών, μετατροπέων εξόδου, ενεργοποιητών και τελικών στοιχείων, χρησιμοποιούσαν αποκλειστικά σήματα πεπιεσμένου αέρα, για να μεταδώσουν την πληροφορία μέτρησης και να εκτελέσουν τους υπολογισμούς ελέγχου. Τα σήματα αυτά τυποποιήθηκαν στην περιοχή των $3-15 \text{ psig}$. Στη δεκαετία του '60, επικράτησαν τα ηλεκτρονικά όργανα που χρησιμοποιούσαν αναλογικά ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά σήματα στις περιοχές των $1-5 \text{ mA}$, $4-20 \text{ mA}$, $10-50 \text{ mA}$, $0-5 \text{ VDC}$ και -10 μέχρι $+10 \text{ VDC}$. Αργότερα, οι μεταδότες και οι ελεγκτές τυποποιήθηκαν στη χρήση σημάτων $4-20 \text{ mA}$ και $1-5 \text{ VDC}$, ενώ η χρήση πνευματικών σημάτων διατηρήθηκε μόνο στην ενεργοποίηση πνευματικών τελικών στοιχείων, όπως είναι οι βαλβίδες ρύθμισης της ροής υγρών καθώς και σε περιπτώσεις εγκατάστασης οργάνων σε βιομηχανικούς χώρους στους οποίους διακινούνται ουσίες σε αέρια ή υγρά σε φάση υψηλής εκρηκτικότητας. Σήμερα, στη χρήση των μεταδοτών αναλογικής τεχνολογίας και μετατροπέων υπάρχει και η δυνατότητα ανάγνωσης των παραγομένων αναλογικών σημάτων, μέσω κατάλληλων μετατροπέων αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (A/D converters) και ψηφιακών σημάτων σε αναλογικά (D/A converters), έτσι ώστε να μπορούν να συνεργάζονται αρμονικά με ψηφιακούς ελεγκτές (υπολογιστές, μικροεπεξεργαστές). Επιπλέον, η τεχνολογία των βιομηχανικών τοπικών δικτύων, καθώς και η ενοποίηση των αισθητηρίων, μεταδοτών και μετατροπέων σε ενιαία ολοκληρωμένα όργανα, παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμών και μετάδοσης των μετρήσεων μέσω ενός κοινού μέσου επικοινωνίας, όπως επίσης και η χρήση του διαδικτύου (*internet*) ως φορέα ασφαλούς και αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων. Στον επόμενο πίνακα

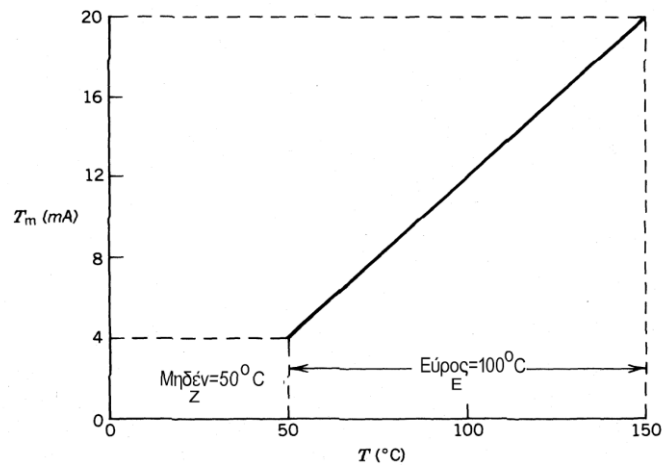


φαίνονται διάφοροι τύποι αισθητήρων, τα μετρούμενα μεγέθη και οι αρχές μετατροπής όπου βασίζονται:

Πίνακας 4. Είδη Αισθητήρων (προσαρμογή από Χατζηευφραιμίδα, 2005).

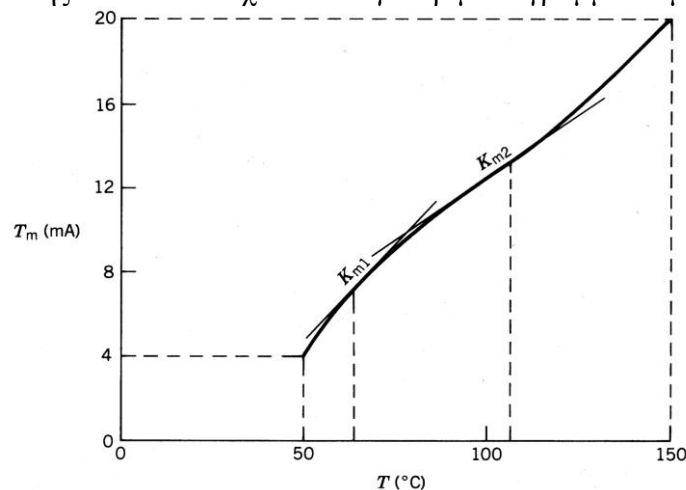
Αρχή μετατροπής Φυσικά μεγέθη	Ηλεκτρομηχανική	Ποτενσιόμετρο	Διαφορ. Μετασχ.	Πιεζοαντίσταση	Φωτοηλεκτρική	Πιεζοηλεκτρική	Θερμοηλεκτρική	Μεταβλ. Ηλ. Αντ.	Θερμοδιαστολή	Θερμ. Επίδρ. σε Ημιαγ.	Χωρητική	Ελαστική	Ταλαντωτή	Hall και μαγνητοαντιστ.
Γραμμική μετατόπιση	X	X	X	X	X						X	X		
Γωνία	X	X	X	X	X						X	X		
Δύναμη	X		X	X		X					X	X	X	
Ροπή	X		X	X	X									
Ταχύτητα	X	X	X	X	X	X						X		
Επιτάχυνση	X	X	X	X	X	X					X	X		
Πίεση		X	X	X		X					X	X		
Ροή		X	X	X		X					X	X		
Θερμοκρασία							X	X	X	X			X	
Μαγν. Ελαστική	X													X
Φωτισμός					X									
Υγρασία			X				X				X			

Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού σήματος που παράγεται είτε από τη συνδυασμένη χρήση απλού αισθητήριου και μεταδότη είτε από σύνθετο αισθητήριο, είναι μέσα στην περιοχή τιμών που δέχεται στην είσοδό του ο ελεγκτής, η οποία έχει τυποποιηθεί και είναι η ίδια για οποιαδήποτε φυσική μεταβλητή που μετριέται, π.χ. 4-20 mA, 1-5 VDC, ή άλλη τυποποίηση. Ανάλογα με τη μετρούμενη μεταβλητή, η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας τόσο του συνδυασμού απλού αισθητήριου και μεταδότη ή σύνθετου αισθητήριου μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Για παράδειγμα, στο επόμενο σχήμα φαίνεται η περιοχή λειτουργίας ενός αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας-θερμοστοιχείου (50 °C μέχρι 150 °C), με αντιστοίχιση με τα όρια του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του μεταδότη (4mA – 20mA).



Σχήμα 42. Χαρακτηριστική καμπύλη αισθητηρίου-μεταδότη με γραμμική απόκριση (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Τέλος, στο επόμενο σχήμα, φαίνεται μια χαρακτηριστική καμπύλη ενός αισθητηρίου με μη γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη, που χωρίζεται σε πολλά γραμμικά τμήματα, όπου σε καθένα από αυτά ο λόγος της κάθε τιμής του ηλεκτρικού σήματος εξόδου προς την αντίστοιχη τιμή της μετρούμενης μεταβλητής είναι ίσος με μια σταθερά, K_m . Η σταθερά αυτή, συνήθως, αποκαλείται το κέρδος του συγκεκριμένου γραμμικού τμήματος. Το κέρδος κάθε τέτοιου γραμμικού τμήματος μπορεί να προσδιοριστεί από την κλίση της εφαπτομένης στο μη γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο γραμμικό τμήμα

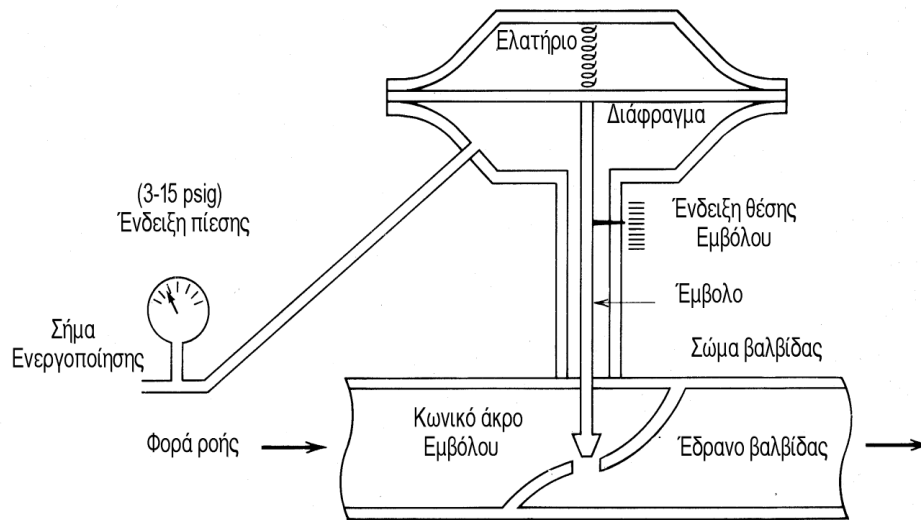


Σχήμα 43. Χαρακτηριστική καμπύλη αισθητηρίου-μεταδότη ή σύνθετου αισθητηρίου με μη γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

- *Μετατροπείς εξόδων, ενεργοποιητές και τελικά στοιχεία.* Κάθε βρόχος ελέγχου περιλαμβάνει ένα τελικό στοιχείο που αυξάνει ή μειώνει την τιμή μιας ελεγχόμενης (από χειριστή/χρήστη) μεταβλητής. Στις περισσότερες

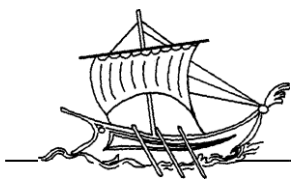


συνεχείς διεργασίες, τα τελικά στοιχεία ρυθμίζουν το ρυθμό της ροής υλών, στερεών υγρών και αερίων, και έμμεσα τους ρυθμούς μεταφοράς ενέργειας προς και από τις διεργασίες. Όσο αφορά τα υγρά, η απλούστερη και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη διάταξη για τη ρύθμιση της ροής τους είναι η βαλβίδα ελέγχου (Σχ.44).

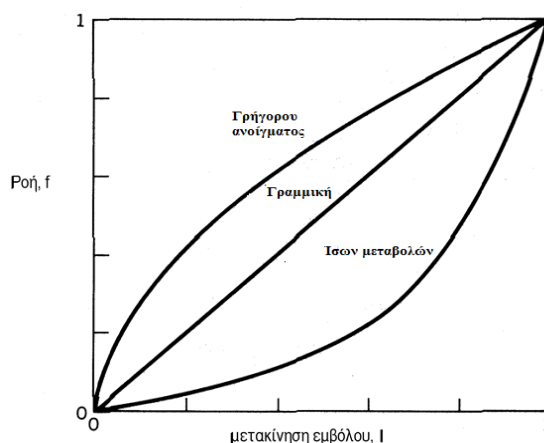


Σχήμα 44. Τομή πνευματικής βαλβίδας ελέγχου (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

Στο προηγούμενο σχήμα, το έμβολο στο κυρίως σώμα της βαλβίδας οδηγείται μέσω ενός μηχανισμού κίνησης προς τα κάτω ή προς τα πάνω ($\uparrow\downarrow$) ανάλογα με την επιδιωκόμενη μεταβολή στη χειριζόμενη μεταβλητή. Ο μηχανισμός κίνησης του εμβόλου μπορεί να είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος (*DC motor*), είτε ένας βηματικός κινητήρας (*stepper motor*), είτε ένα πνευματικά πιεζόμενο διάφραγμα συνδεδεμένο με το άνω άκρο του εμβόλου. Ο μηχανισμός αυτός είναι ο ενεργοποιητής (*actuator*) του τελικού στοιχείου και για να κινηθεί ανάλογα με την τιμή του ηλεκτρικού σήματος που παράγεται από την έξοδο του ελεγκτή, πρέπει να παρεμβληθεί μια νέα διάταξη μεταξύ του ελεγκτή και του ενεργοποιητή. Αυτή η διάταξη αποκαλείται μετατροπέας εξόδου, και έχει τη δυνατότητα της μετατροπής του ηλεκτρικού σήματος της εξόδου του ελεγκτή, προσδιορίζοντας έτσι, το πόσο πρέπει να αυξηθεί ή μειωθεί (+,-) η διερχόμενη από τη βαλβίδα ροή, σε πίεση αέρα ικανή να κάνει τον ενεργοποιητή να κινήσει ανάλογα το μηχανισμό του εμβόλου. Ο μετατροπέας αυτός δέχεται ως είσοδο το ηλεκτρικό σήμα από την έξοδο του ελεγκτή, π.χ. 4-20 mA και μια πηγή πεπιεσμένου αέρα π.χ. 15 psi, και παράγει μια έξοδο μεταβαλλόμενης πίεσης αέρα από 3 μέχρι 15 psi, ανάλογα με την τιμή του ηλεκτρικού σήματος. Σε πολλούς τύπους τελικών στοιχείων λόγω της κατασκευής τους, η αύξηση της τιμής του σήματος εξόδου του ελεγκτή στον μετατροπέα εξόδου δε συνεπάγεται πάντοτε την ανάλογη αύξηση της τιμής της χειριζόμενης μεταβλητής, αλλά αντίθετα μπορεί να συνεπάγεται ανάλογη μείωσή της. Μια τέτοια περίπτωση

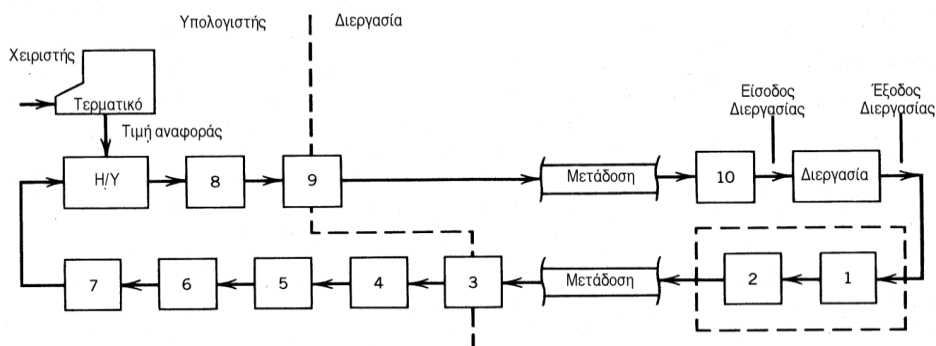


συναντάται και στις πνευματικές βαλβίδες ελέγχου. Όπως συμβαίνει και με τα απλά ή σύνθετα αισθητήρια, η συνδυασμένη λειτουργία του μετατροπέα εξόδου, ενεργοποιητή και τελικού στοιχείου περιγράφεται από μια χαρακτηριστική καμπύλη που μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική (Σχ.45).

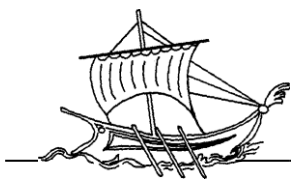


Σχήμα 45. Χαρακτηριστικές καμπύλες βαλβίδων ελέγχου (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

- *Υπολογιστής ελέγχου.* Η μεγάλη ευελιξία που παρουσιάζει ο ψηφιακός υπολογιστής (computer) στην αλλαγή των αλγορίθμων ελέγχου χωρίς να χρειάζεται η επανασυρμάτωση του συστήματος (αναλογικά συστήματα), τον κατέστησε ως *κυρίαρχη διάταξη* στην υλοποίηση τόσο των λειτουργιών ενός ή περισσότερων ελεγκτών βρόχων ελέγχου, όσο και της *συλλογής δεδομένων (data collection)* από τις διεργασίες, με τελικό σκοπό την *ψηφιακή καταγραφή τους (recording)* και την *εποπτική παρουσίασή τους (visualization, mimic diagrams)*. Στο επόμενο σχήμα, φαίνεται ένα σύστημα με πολλούς βρόχους ανατροφοδότησης, στο οποίο ο αναλογικός ελεγκτής έχει αντικατασταθεί από υπολογιστή (Seborg et al. 1989).

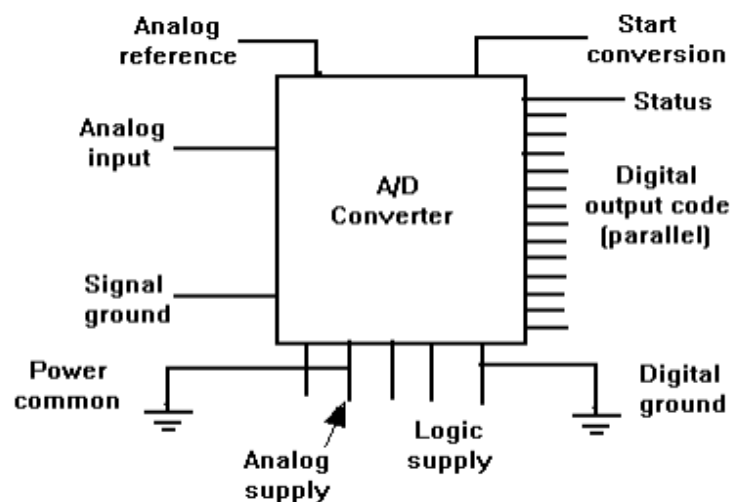


Σχήμα 46. Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα ελέγχου πολλών βρόχων ανατροφοδότησης με υπολογιστή (1-αισθητήριο, 2-μεταδότης,3-κλεμοσειρά, 4-φίλτρο, 5-πολυπλέκτης, 6-ενισχυτής, 7-μετατροπέας αναλογικού σήματος σε

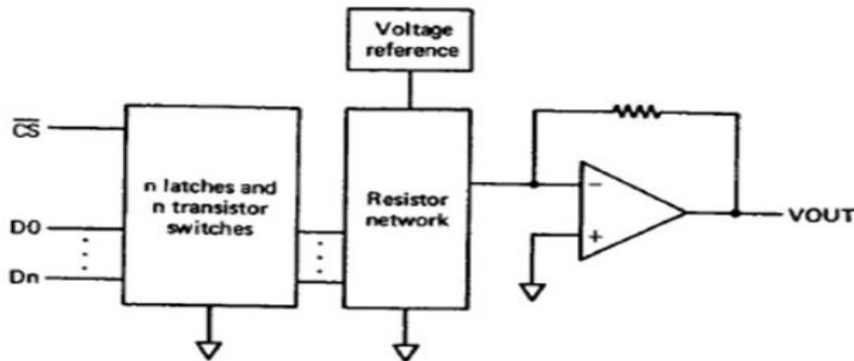


ψηφιακό, 8-μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό, 9-αποπλέκτης, 10-ενεργοποιητές, 11-τελικά στοιχεία)(προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

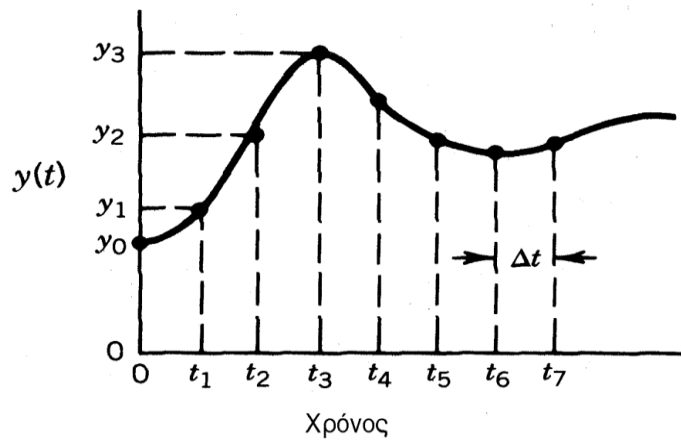
Στις βιομηχανικές διεργασίες οι μεταβολές μέσα στο χρόνο του μεγαλύτερου αριθμού των φυσικών μεταβλητών που μετρούνται και παρακολουθούνται, είναι αναλογικές. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται μετατροπείς που μετασχηματίζουν το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό αριθμό και αντίστροφα. Ειδικότερα, ο τον *μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D converter)* προκύπτει ο ψηφιακός αριθμός που αντιστοιχεί στην τιμή που μετρήθηκε (Σχ.47). Η αντίστροφη διαδικασία μετατροπής του αποτελέσματος των υπολογισμών που εκτέλεσε ο ελεγκτής σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα επιτυγχάνεται με μια άλλη διάταξη που ονομάζεται *μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (D/A converter)*(Σχ.48). Εκτός από τη μετατροπή του μεγέθους των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακό αριθμό, για να γίνεται συστηματική παρατήρηση των μεταβολών των τιμών των σημάτων αυτών, με την πάροδο του χρόνου χρειάζεται να μετατραπεί σε ψηφιακό αριθμό και ο χρόνος (t). Η μετατροπή αυτή προσδιορίζεται από το πόσο συχνά πρέπει να λαμβάνονται δείγματα των τιμών κάθε αναλογικού σήματος και να αποθηκεύονται στον υπολογιστή. Ο ρυθμός αυτός ονομάζεται, *ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate)*, με τον οποίο αποφασίζεται να διαβάζονται οι τιμές κάθε αναλογικού σήματος. Η επιλογή αυτού του ρυθμού, είναι μια *κρίσιμη παράμετρος* που επηρεάζει τον έλεγχο της κάθε βιομηχανικής διεργασίας (Σχ.49).



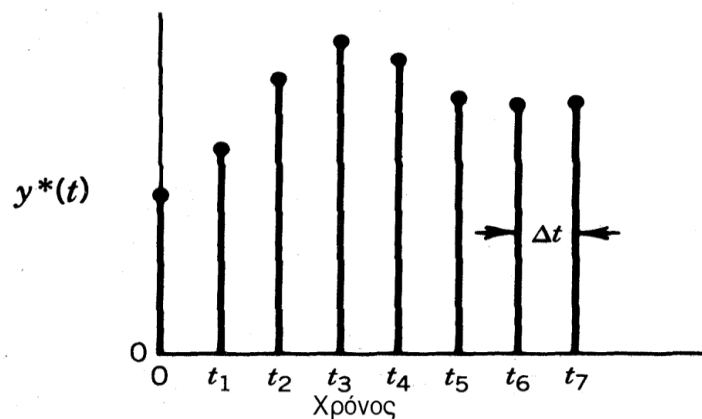
Σχήμα 47. Μετατροπέας A/D (προσαρμογή από www.lib.ntua.gr/gr/el_sources/ebooks/kagiafas/CHAPTER12.pdf).



Σχήμα 48. Μετατροπέας D/A (προσαρμογή από <http://slideplayer.com/slide/10508048/>).



(α) Αναλογικό σήμα $y(t)$ και δείγματα



(β) Σήμα μετά από δειγματοληψία

Σχήμα 49. Ιδανική περιοδική δειγματοληψία (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

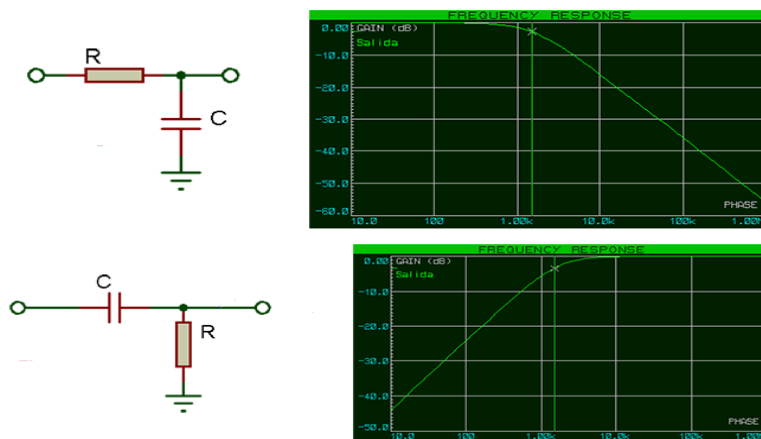
- *Φίλτρα (Filter)*. Στο βιομηχανικό έλεγχο ο θόρυβος που υπάρχει πάνω στα μεταδιδόμενα αναλογικά σήματα, μπορεί να προέρχεται τόσο από το



αισθητήριο, όσο από το μεταδότη και αυτή καθαυτή τη φυσική διεργασία. Η επίδραση του θορύβου που προέρχεται από τις ηλεκτρικές διατάξεις μπορεί να περιοριστεί *θωρακίζοντας* και *γειώνοντας* τα καλώδια. Ο θόρυβος που προέρχεται από τη φυσική διαδικασία μπορεί να παράγεται κατά τη στιγμή ανάμειξης υλών, στροβιλώδους ροής και ανομοιόμορφων πολυφασικών ροών. Όταν η επίδραση θορύβου προερχόμενου από τις παραπάνω πηγές δεν μπορεί να μειωθεί με άλλα μέσα, τότε η μείωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αναλογικών ή ψηφιακών φίλτρων. Για παράδειγμα, τα αναλογικά φίλτρα έχουν χρησιμοποιηθεί εδώ και πολλά χρόνια για να εξάγουν τη χρήσιμη πληροφορία από πειραματικά δεδομένα που έχουν διαβρωθεί από θόρυβο. Το πιο γνωστό φίλτρο είναι εκείνο που η λειτουργία του περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση της μορφής

$$\tau_F = \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (20)$$

όπου x , είναι η μετρούμενη τιμή (*input filter*), y είναι η επεξεργασμένη τιμή (*output filter*) και τ_F , η *σταθερά χρόνου* του φίλτρου. Το χαρακτηριστικό του φίλτρου αυτού είναι ότι επιτρέπει τη διέλευση των χαμηλής συχνότητας συνιστωσών του σήματος εισόδου και εισάγει μεγάλη απόσβεση στο πλάτος των υψηλής συχνότητας συνιστωσών (*χαμηλοπερατα φίλτρα*). Ονομάζεται και *εκθετικό φίλτρο*, ή *φίλτρο RC*, διότι μπορεί να κατασκευαστεί από ένα απλό κύκλωμα αντίστασης - πυκνωτή (RC) (Σχ.50). Επίσης, επειδή χρησιμοποιείται για να απομακρύνει τις συνιστώσες των υψηλών συχνοτήτων από αναλογικά σήματα μετρήσεων πριν από τη δειγματοληψία τους με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς, αναφέρεται και ως *αντί -ψευδές (anti-aliasing) φίλτρο*.



Σχήμα 50. Διατάξεις RC φίλτρων. Ο ρυθμός καμπύλης είναι 20 db ανά δεκάδα. Στη συχνότητα αποκοπής, η τάση εξόδου είναι 3 dB (0,707 φορές) κάτω από την τάση εισόδου (προσαρμογή από http://gzalo.com/rcfilter_en/).

Όσο μειώνεται το κόστος των μικροεπεξεργαστών σε συνδυασμό με την αύξηση των δυνατοτήτων τους, τόσο αυξάνεται η χρήση *ψηφιακών*



φίλτρων. Ένα ψηφιακό φίλτρο χρησιμοποιεί ένα μικροεπεξεργαστή για να εκτελέσει υπολογισμούς σε δειγματοληπτικές τιμές του σήματος. Ο επεξεργαστής μπορεί να είναι ένας γενικού σκοπού υπολογιστής όπως ένα PC, ή ένας ειδικού σκοπού DSP (Digital Signal Processor) chip (Εικ.4).



Εικόνα 4. DSP επεξεργαστής (προσαρμογή από www.slideshare.net/hichamberkouk/digital-signal-processors-dsps).

Τα ψηφιακά φίλτρα πλεονεκτούν έναντι των αναλογικών, αφού (Κόγιας, 2010; Φωτόπουλος, 2010):

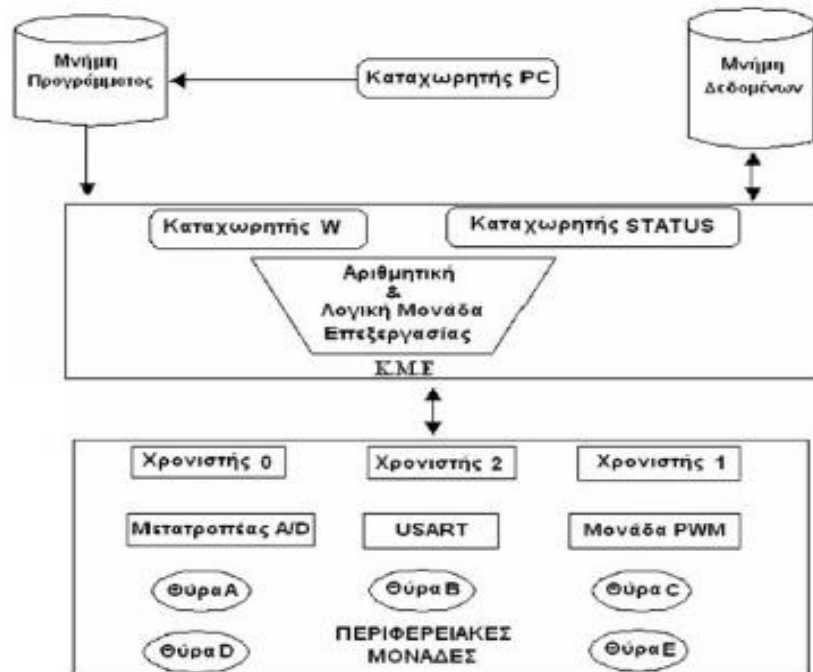
- ένα ψηφιακό φίλτρο είναι σε θέση να επαναπρογραμματισθεί, αφού η λειτουργία του καθορίζεται από ένα λογισμικό (software) στη μνήμη του επεξεργαστή (computer memory). Αυτό σημαίνει ότι το ψηφιακό φίλτρο μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα χωρίς να επηρεαστεί το ψηφιακό κύκλωμα (hardware). Ένα αναλογικό φίλτρο, μπορεί μόνο να τροποποιηθεί, με επανασχεδίαση του φίλτρου (ηλεκτρονικό κύκλωμα).
- είναι εύκολα στη σχεδίαση, στη δοκιμή, και στην υλοποίηση σε ένα γενικού σκοπού υπολογιστή ή σε ένα εξειδικευμένο επεξεργαστή (DSP processor).
- δεν εξαρτώνται από περιβαλλοντικούς και άλλους παράγοντες όπως τα αναλογικά, π.χ. τάση, θερμοκρασία κυκλώματος.
- μπορούν να χειριστούν χαμηλής συχνότητας σήματα με ακρίβεια.

Στο επόμενο σχήμα, φαίνεται μια διαδικασία oversampling, για αντικατάσταση ενός αναλογικού φίλτρου εξομάλυνσης με ψηφιακό φίλτρο περισσότερων ψηφίων και μετατροπέα D/A.



Σχήμα 51. Oversampling διαδικασία αντικατάστασης αναλογικού από ψηφιακό φίλτρο (προσαρμογή από www.avmentor.gr/tech/upsamplers_2.htm).

- *Μικροελεγκτής (micro-controller)*. Είναι ένας υπολογιστής σε μια πιο συμπαγή μορφή (Σχ.52). Έχει δηλαδή μία μονάδα μνήμης (CPU) στην οποία εκτελούνται τα προγράμματα, μία μνήμη στην οποία αποθηκεύονται και ανανεώνονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος οι διάφορες μεταβλητές καθώς και θύρες εισόδων – εξόδων (I/O ports) με τις οποίες μπορεί να επικοινωνήσει διαδραστικά και αμφίδρομα με τους χρήστες/χειριστές μιας βιομηχανικής διεργασίας. Η κύρια διαφορά τους από τους σύγχρονους υπολογιστές, είναι ότι οι μικροελεγκτές έχουν περιορισμένη μνήμη, ενώ δεν διαθέτουν και σκληρό δίσκο. Επιπλέον, λειτουργούν με χαμηλή ισχύ (~50mW) και έχουν μικρότερη ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων (~100 MIPS). Οι αιτίες για τις οποίες οι μικροελεγκτές έχουν αντικαταστήσει τους υπολογιστές είναι το *χαμηλό κόστος* τους, και το *μεγάλο πεδίο περιβαλλοντικών συνθηκών* που μπορούν να εφαρμοσθούν, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμους στο απαιτητικό βιομηχανικό περιβάλλον. Επιπρόσθετα, η *απόκριση πραγματικού χρόνου (real time processing)*, αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που εξασφαλίζει στους μικροελεγκτές τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται και να αποκρίνονται στον επιθυμητό χρόνο με μεγάλη ακρίβεια, σε σχέση με τις βιομηχανικές διεργασίες. Εταιρείες που παράγουν σήμερα στην παγκόσμια αγορά μικροελεγκτές, είναι κυρίως οι: *Atmel, Microchip, Motorola, Hitachi, Toshiba, AMD, Zilog, National Semiconductor, Philips/Signetics* (Αλατσαθανός, 2004).



Σχήμα 52. Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και Περιφερειακά Μικροελεγκτή τύπου PIC 16F877 (προσαρμογή από <http://slideplayer.gr/slide/2313275/>).

- *Προγραμματιζόμενοι Λογικοί ελεγκτές (PLC) (Εικ.5).* Είναι μια ψηφιακή ηλεκτρονική συσκευή με προγραμματιζόμενη μνήμη στην οποία αποθηκεύονται εντολές που μπορούν να πραγματοποιούν λογικές, ακολουθιακές, χρονικές, μετρητικές και αριθμητικές λειτουργίες. Μέσω των λειτουργιών αυτών είναι δυνατόν να επιτελείται αυτόματος έλεγχος διεργασιών, αλλά και μηχανών. Ειδικότερα, αφορούν εξειδικευμένες υπολογιστικές μονάδες με δυνατότητες διασύνδεσής τους σε τοπικά δίκτυα, εκτέλεσης αλγορίθμων αναλογικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων σχεδόν άμεσα από κάθε τύπο βιομηχανικού αισθητηρίου. Αποτελούνται από το υλικό (*hardware*), το λειτουργικό σύστημα (*operating system*) και το λογισμικό εφαρμογής (*application software*). Το υλικό προσδιορίζεται από την αρχιτεκτονική του, δηλαδή μια γενικευμένη περιγραφή των βασικών μονάδων από τις οποίες αποτελείται και του τρόπου διασύνδεσης και ροής δεδομένων μεταξύ των μονάδων αυτών. Το λειτουργικό σύστημα προσδιορίζεται από τις υπηρεσίες που προσφέρει για τη διαχείριση των μέσων του υλικού και την εκτέλεση του λογισμικού εφαρμογής. Τα τυπικά πεδία εφαρμογής των προγραμματιζόμενων ελεγκτών ήταν και είναι οι βασικοί αυτοματισμοί σχεδόν κάθε τύπου βιομηχανίας, όπως είναι τα χαλυβουργεία, οι βιομηχανίες χαρτομάζας και χαρτιού, οι μονάδες επεξεργασίας τροφίμων, η χημική βιομηχανία, η αυτοκινητοβιομηχανία και οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αυτοματισμοί που συνήθως πραγματοποιούνται από τους προγραμματιζόμενους ελεγκτές είναι ο ακολουθιακός και διακοπτικός (*ON/OFF*) έλεγχος μηχανών και διεργασιών, ο έλεγχος κλειστού βρόχου μιας ή περισσότερων μεταβλητών



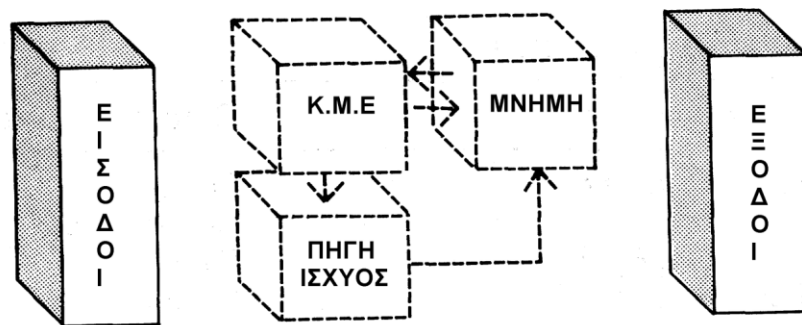
και μανταλώσεις (interlocks) μεταβλητών σε ασφαλείς τιμές. Για την εξυπηρέτηση τόσο των κλασικών όσο και των νέων λειτουργιών, η βασική απαίτηση στη συμπεριφορά ενός προγραμματιζόμενου ελεγκτή είναι η εκτέλεση του συνόλου των λειτουργιών που προγραμματίστηκαν μέσα σε προβλεπόμενο χρόνο. Επιπλέον βασική απαίτηση πέρα από το υλικό του είναι η δυνατότητα και η ευελιξία του να συνδέεται με τα αισθητήρια και τους ενεργοποιητές των τελικών στοιχείων της παραγωγικής διεργασίας, χωρίς την ανάγκη κατασκευής ή χρήσης άλλων ενδιάμεσων κυκλωμάτων. Η δεύτερη απαίτηση ικανοποιείται με την υιοθέτηση μιας αρχιτεκτονικής υλικού που συνίσταται βασικά από δύο μέρη: (α) την *Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (ΚΜΕ)* και (β) τα *κυκλώματα Εισόδων και Εξόδων (E/E)*. Η ΚΜΕ με τη σειρά της, αποτελείται από τρεις επιμέρους μονάδες που είναι: ο *Επεξεργαστής*, η *Μνήμη* και το *Τροφοδοτικό Ισχύος*, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα. Η υιοθέτηση των PLC στον βιομηχανικό έλεγχο, γίνεται με τα ακόλουθα βήματα (Πανταζής, 2001; Τζουνίδης, 2001):

- Περιγραφή του αυτοματισμού & της διεργασίας.
- Ανάπτυξη σχεδίου εφαρμογής.
- Κατασκευή πίνακα εγκατάστασης.
- Ανάπτυξη λογισμικού λειτουργίας του αυτοματισμού και εισαγωγή του στο PLC μέσω υπολογιστή.
- Εγκατάσταση και σύνδεση στους ακροδέκτες (κλέμες) του πίνακα αισθητήρων, που μεταφέρουν πληροφορίες από τις εισόδους (αισθητήρια) και τις συσκευές που εκτελούν εργασίες (έξοδοι).
- Δοκιμή λειτουργίας της εγκατάστασης.
- Πλήρης λειτουργία του αυτοματισμού.

Τέλος, τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των PLC είναι το *χαμηλό κόστος*, η *ευελιξία*, και η *επεκτασιμότητα* τους.



Εικόνα 5. Διατάξεις PLC/SIMATIC S7-1500 σε βιομηχανική μονάδα (προσαρμογή από <http://electrical-engineering-portal.com>).



Σχήμα 53. Αρχιτεκτονική PLC (προσαρμογή από Χασάπη, 2015).

3.5 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μεθοδολογία και οι τεχνολογίες του βιομηχανικού ελέγχου σε συνάρτηση με τον αυτόματο έλεγχο και τον βιομηχανικό αυτοματισμό. Ένα σύστημα αυτοματισμού είναι μία ειδική περίπτωση μηχανής. Στο σύστημα αυτοματισμού η ενέργεια γίνεται δεκτή κατά αυστηρά προκαθορισμένο τρόπο και μετατρέπεται ή μεταφέρεται επίσης κατά αυστηρά προκαθορισμένο τρόπο. Ο βιομηχανικός έλεγχος μέσω του αυτοματισμού επιδιώκει την υποκατάσταση ανθρώπινης εργασίας από συσκευές που μπορούν να εργάζονται με μεγαλύτερη ανεξαρτησία από τους ανθρώπους.



4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

4.1 Εννοιολογικό Πλαίσιο

Με τον όρο «έλεγχος ή ρύθμιση», εννοείται η ανάληψη και οργάνωση δράσης προς διατήρηση των επιθυμητών συνθηκών σε μια οποιαδήποτε βιομηχανική διεργασία. Αυτό μπορεί να συμβεί με ανθρώπινη επέμβαση (χειρισμό) ή και με κάποιο μηχανισμό. Στις εφαρμογές, ο έλεγχος αποβλέπει στην επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών λειτουργίας, με στόχο την δυνατότητα επαναφοράς στις επιθυμητές αυτές συνθήκες, όταν υπάρξει κάποια *διαταραχή*, όπως και στη δυνατότητα επίτευξης μόνιμης κατάστασης όταν ένα ή/και περισσότερα εξωτερικά αίτια τείνουν να δημιουργήσουν *μεταβατικές συνθήκες* (Κίνγκ, 1996; Κουμπουλής, 1999; Παρασκευόπουλος, 1991; Μπάφας και Σιέττος, 2015).

Μία από τις πρώτες εφαρμογές αυτόματου ελέγχου διεργασιών, εμφανίζεται στα *μηχανικά συστήματα αυτόματης ρύθμισης* του «*Ηρώνα (50 π.Χ.)*», όπως π.χ. ο διανομέας οίνου ή το αυτόματο άνοιγμα θυρών ενός βωμού (Εικ.6)(Καλλιγερόπουλος, 1996). Από την εποχή εκείνη μέχρι τους νεότερους χρόνους η εξέλιξη των συστημάτων ελέγχου υπήρξε αρκετά αργή. Σημαντικός σταθμός στην εξέλιξη του ελέγχου των μηχανικών συστημάτων, αποτέλεσε η εφαρμογή της αυτόματης ρύθμισης στη λειτουργία της ατμομηχανής κατά τη χρήση της για άντληση νερού στα ορυχεία της Αγγλίας. Η ανάγκη ελέγχου επιβλήθηκε από το γεγονός, ότι η φόρτιση σε μια ατμομηχανή μεταβαλλόταν τόσο γρήγορα, ώστε η σταθεροποίηση της ταχύτητας να είναι πέρα από τις ανθρώπινες δυνατότητες χειρισμού. Για να επιτευχθεί η ρύθμιση των στροφών της ατμομηχανής κατά τις μεταβολές του φορτίου ο *Watt* επινόησε και κατασκεύασε έναν ρυθμιστή με μηχανισμό μέτρησης των στροφών, το *φυγοκεντρικό εκκρεμές*, και ονομάστηκε για αυτό το λόγο *ρυθμιστής του Watt* (Εικ.7)(Cardwell, 2004). Μέχρι στις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, ο έλεγχος των διεργασιών ήταν περισσότερο θέμα επιδεξιότητας και λιγότερο θέμα επιστημονικής μεθοδολογίας. Συγκεκριμένα, βασιζόνταν στη διαίσθηση και στη δοκιμαστική προσέγγιση (*trial and error*) προς την επιθυμητή ή ακόμη και παραδεκτή λύση, παρά στην επιστημονική μεθοδολογία. Ο αντικειμενικός σκοπός περιοριζόταν πολλές φορές, στο να επιτευχθεί μηχανική σταθερότητα λειτουργίας, στο να λάβει, δηλαδή, χώρα απλή αντικατάσταση της ανθρώπινης προσπάθειας. Αυτή είναι η ειδοποιός διαφορά της σύγχρονης αντιμετώπισης του προβλήματος του ελέγχου από την αντίστοιχη παλιά. Στο παρελθόν, στις «μηχανές» και συσκευές εν γένει, δεν απαιτούνταν, συνεχή ανθρώπινη ρύθμιση, ωστόσο, χρειαζόταν κατά καιρούς επέμβαση, κυρίως σε περιπτώσεις αναπροσαρμογής των συνθηκών λειτουργίας. Σήμερα, ο σχεδιασμός και η κατασκευή τεχνολογικού εξοπλισμού κάθε είδους γίνεται με βάση την όσο το δυνατό υψηλότερη του χρησιμότητα και αυξημένες δυνατότητες διαχείρισης του (Μπάφας και Σιέττος, 2015).



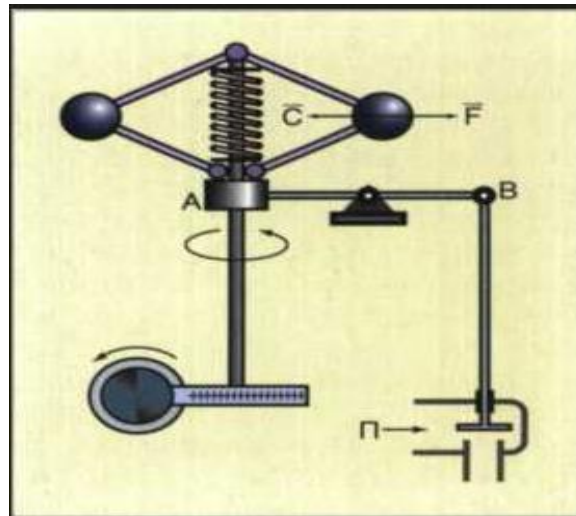
Η θεωρητική υποδομή στην ανάπτυξη του κλάδου της αυτόματης ρύθμισης τέθηκε στη δεκαετία του '30. Αυτό έγινε λόγω της ανάγκης αντιμετώπισης των απαιτήσεων της αναπτυσσόμενης βιομηχανίας, απαιτήσεων, που γίνονται διαρκώς περισσότερες, και μεγαλύτερες, εξαιτίας του πολυσύνθετου των διεργασιών, όπως επίσης και της τάσης προς αύξηση της παραγωγής και βελτίωση και τυποποίηση των προϊόντων. Εξάλλου, η ανάπτυξη, του κλάδου του αυτόματου ελέγχου βοήθησε στο σχεδιασμό και την κατασκευή καλύτερων συστημάτων ρύθμισης. Σημαντικό ρόλο έπαιξε και η ανάπτυξη και χρήση ορισμένων «τύπων ελεγκτών, ανάλογα με τον ειδικό σκοπό για τον οποίο προορίζονται, όπως π.χ. ελεγκτών με «αναλογική», «διαφορική», «ολοκληρωτική» κλπ. δράση (Παρασκευόπουλος, 1991; Μπάφας και Σιέττος, 2015; Rosen 2012).

Τα *οφέλη* της χρήσης του αυτόματου ελέγχου στις βιομηχανικές διεργασίες, μπορούν να συνοψιστούν στα εξής (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Rosen, 2012; Schmid, 2010):

- Αυξημένη παραγωγικότητα και χαμηλότερο κόστος παραγωγής.
- Δυνατότητα παραγωγής, ανεξάρτητα από ανθρώπινους παράγοντες, κατά συνέπεια καλύτερη και περισσότερο σταθερή ποιότητα παραγόμενου προϊόντος.
- Μείωση της καταβαλλόμενης ανθρώπινης προσπάθειας.
- Μεγαλύτερη ασφάλεια του προσωπικού που απασχολείται με την παραγωγή.

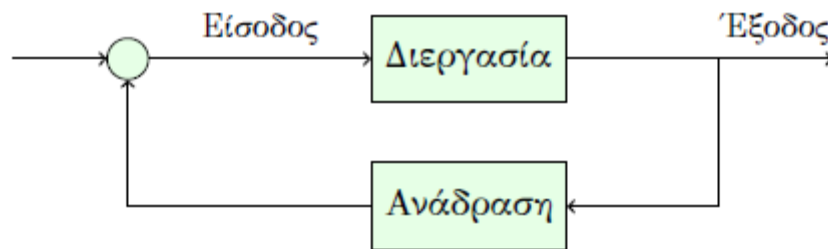
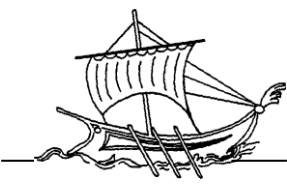


Εικόνα 6. Σύστημα αυτόματων θυρών βάσει υδραυλικής πίεσης (ανακατασκευή) (προσαρμογή από Wikipedia)



Εικόνα 7. Ρυθμιστής Watt (προσαρμογή από <http://www.greekencyclopedia.com>).

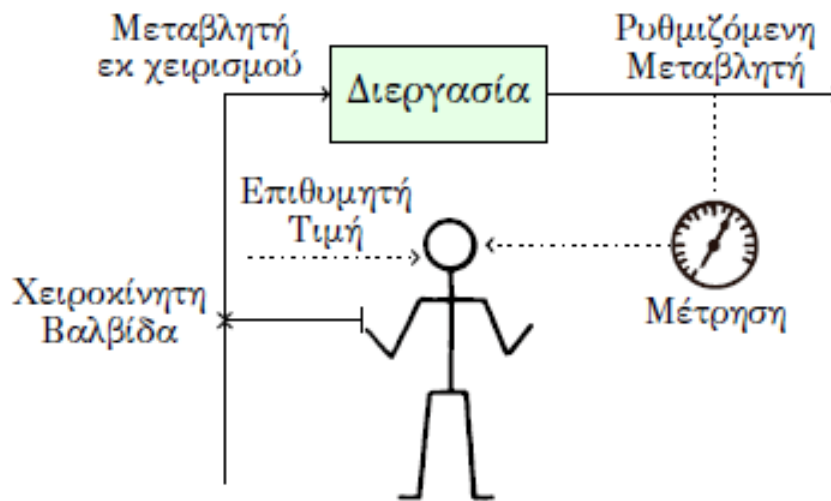
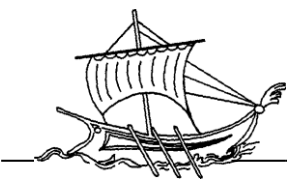
Η πραγματοποίηση του αυτόματου ελέγχου οποιασδήποτε μορφής στηρίζεται στη λειτουργία της ανατροφοδότησης ή ανάδρασης (*feedback*), δηλαδή της μέτρησης προς δραστηριοποίηση ενός ρυθμιστικού μηχανισμού. Η λειτουργία αυτή είναι πρωταρχικής σημασίας για κάθε σύστημα, που περιλαμβάνει διεργασίες, είτε «φυσικές» είναι αυτές, είτε βιολογικές/βιοχημικές, είτε τεχνικές διεργασίες κατασκευασμένων από τον άνθρωπο. Ο Wiener (1948) όρισε την ανατροφοδότηση ως «τη μέθοδο ρύθμισης ενός συστήματος, με επαναφορά σε αυτό των αποτελεσμάτων της προηγούμενης συμπεριφοράς του». Ένας πιο σαφής ορισμός είναι ο ακόλουθος: «Ένα σύστημα αυτόματης ρύθμισης με ανατροφοδότηση είναι ένα σύστημα, που προσπαθεί να διατηρεί μία προκαθορισμένη σχέση μιας μεταβλητής του προς μία άλλη μεταβλητή, συγκρίνοντας κατάλληλες συναρτήσεις των μεταβλητών αυτών και χρησιμοποιώντας τη διαφορά αυτή ως μέσο ρύθμισης» (Μπάφας και Σιέττος, 2015). Ουσιαστικά, η ανατροφοδότηση είναι το φαινόμενο της σύζευξης του «αποτελέσματος» μιας διεργασίας με το «αίτιο», προς το σκοπό της αποκατάστασης της τιμής του αποτελέσματος στο επιθυμητό «ύψος». Έτσι, αν η τιμή του αποτελέσματος της διεργασίας (θερμοκρασία, στάθμη, πίεση, συγκέντρωση κλπ.) είναι διαφορετική από την επιθυμητή τιμή (*set value*), η ανατροφοδότηση έχει ως σκοπό να «ενημερώσει» άμεσα, σε τρόπο ώστε να λάβει χώρα διαφοροποίηση της διεργασίας, προς διόρθωση του αποτελέσματος και αποκατάστασή του στο επιθυμητό ύψος. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η διασύνδεση της εξόδου (αποτελέσματος) με την είσοδο που επηρεάζει τη διεργασία (Παρασκευόπουλος, 1991; Μπάφας και Σιέττος, 2015; Schmid, 2010).



Σχήμα 54. Σχηματική παράσταση συστήματος ρύθμισης με ανάδραση (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

Σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη του κλάδου της αυτόματης ρύθμισης, έδωσε η επινόηση και ο σχεδιασμός των «σερβομηχανισμών» (Younkin, 2007). Προέρχεται από τον ξένο όρο *servo mechanism*, που και αυτός προέρχεται από τις λέξεις *servant* και *mechanism*. Σερβομηχανισμός ή μηχανισμός εξυπηρέτησης, είναι η διάταξη, που τείνει να θέσει σε κίνηση ή στάση ένα αντικείμενο ή συγκρότημα αντικειμένων (συσκευή) σύμφωνα με μια εντολή, που δίνεται από ένα εντολέα (χρήστη/χειριστή). Βασικό χαρακτηριστικό του σερβομηχανισμού είναι η ενεργοποίησή του από σχετικά μικρή ισχύ σε σύγκριση προς το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Η λειτουργία του σερβομηχανισμού εξαρτάται από τη διαφορά ανάμεσα στην πραγματική και την επιθυμητή θέση ενός αντικειμένου ή μιας διάταξης. Ο σερβομηχανισμός δρα προς την κατεύθυνση της μείωσης της διαφοράς αυτής, που είναι γνωστή και ως ρυθμιστική απόκλιση, παρά την ενδεχόμενη ύπαρξη εξωτερικών και άλλων παρενοχλήσεων. Οι αρχές του αυτόματου ελέγχου έχουν βρει δυνατότητα εφαρμογής σε διάφορα πεδία της επιστήμης και της τεχνολογίας. Σήμερα το σύνολο των διεργασιών πάσης φύσης, προέλευσης και αποστολής επιδέχεται αυτόματη ρύθμιση (Πανταζής, 2015; Κοτζαμπάσης, 1994; Schmid, 2010).

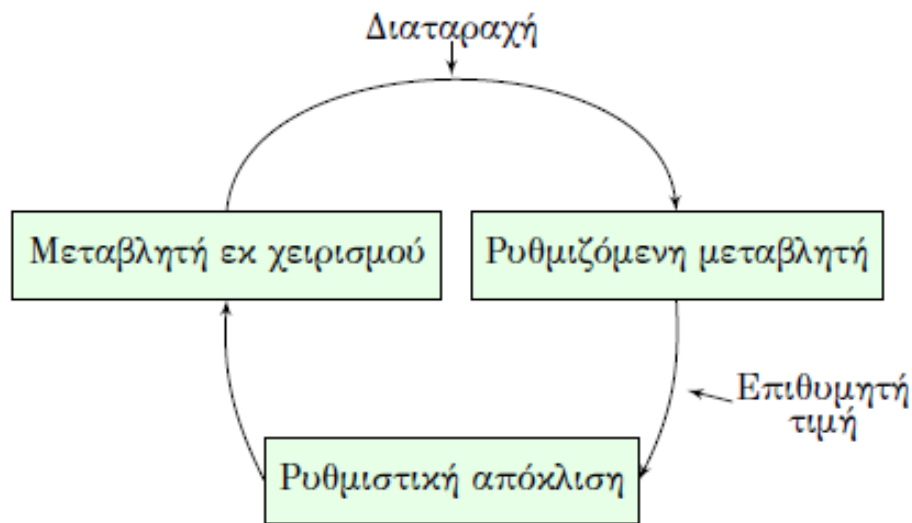
Με τον όρο «χειροκίνητος έλεγχος» εννοούμε τη ρυθμιστική διεργασία, που χρησιμοποιείται η ανθρώπινη επέμβαση. Τέτοια τυπική μορφή εικονίζεται σχηματικά στο επόμενο σχήμα. Σε πολλές περιπτώσεις η επιδέξια ανθρώπινη επέμβαση είναι δυνατό να συνεπάγεται και επιτυχία στη ρύθμιση πολλών διεργασιών, ωστόσο, η αδυναμία μακρόχρονης συγκέντρωσης της ανθρώπινης προσοχής αφενός και η σωματική κόπωση αφετέρου θέτουν, περιορισμούς στη δυνατότητα της χρησιμοποίησης της ανθρώπινης επέμβασης στον έλεγχο βιομηχανικών διεργασιών (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991).



Σχήμα 55. Σχηματική παράσταση χειροκίνητου ελέγχου (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

Αυτόματη ρύθμιση ή έλεγχος είναι η διατήρηση της τιμής ενός μεγέθους, ή συνθηκών, σε επιθυμητή στάθμη ή κατάσταση, χωρίς την ανθρώπινη επίδραση ή παρουσία. Η διατήρηση αυτή επιτυγχάνεται με τη μέτρηση, σε δεδομένη χρονική στιγμή, της τιμής ή των συνθηκών, τη σύγκριση της μετρούμενης προς την επιθυμητή τιμή και στη συνέχεια τη χρήση της μεταξύ τους διαφοράς προς έναρξη δράσης για τη μείωση της διαφοράς αυτής. Από την άλλη, η ρυθμιζόμενη μεταβλητή είναι, η ποσότητα ή η συνθήκη ενός ελεγχόμενου συστήματος, η οποία μετά τη μέτρηση και σύγκριση προς μία επιθυμητή τιμή, υπόκειται σε μεταβολή (αυξομείωση, $\uparrow\downarrow$), έτσι ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή τιμή. Αντίστοιχα, η μεταβλητή εκ χειρισμού, είναι το μέγεθος ή η συνθήκη, που μεταβάλλεται μέσω του συστήματος έλεγχου, με σκοπό να διατηρεί τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή (Βελώνη, 2011; Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991; Dorf and Bishop, 2016; Golnaraghi and Kuo, 2011).

Σε κάθε σύστημα έλεγχου, τύπου κλειστού βρόχου, μεταξύ της ρυθμιζόμενης μεταβλητής, της ρυθμιστικής απόκλισης και της μεταβλητής εκ χειρισμού υφίσταται αλληλεπίδραση κατά μονόδρομο κυκλικό τρόπο, ο οποίος, σχηματικά εικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Οποτεδήποτε η ρυθμιζόμενη μεταβλητή υφίσταται από την επιθυμητή της τιμή, η ρυθμιστική απόκλιση που προκαλείται, επενεργεί πάνω στη μεταβλητή εκ χειρισμού, η οποία με την σειρά της, τείνει να καταστήσει τιμή της ρυθμιζόμενης μεταβλητής ίση προς την επιθυμητή τιμή (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991; Dorf and Bishop, 2016; Golnaraghi and Kuo, 2011).



Σχήμα 56. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στη ρυθμιζόμενη μεταβλητή, τη ρυθμιστική απόκλιση και τη μεταβλητή εκ χειρισμού (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

Τα συστήματα ελέγχου κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον κύριο αντικειμενικό σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιούνται (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Βελώνη, 2011; Schmid, 2010):

- *συστήματα με διαταραχή φορτίου ή συστήματα καθορισμού (regulator control).* Στοχεύουν να κρατήσουν τη ρυθμιζόμενη μεταβλητή κατά το δυνατό σταθερή σε μια προκαθορισμένη τιμή, παρά τις μεταβολές που θα παρουσιαστούν στη μεταβλητή φορτίου του συστήματος. Στα συστήματα αυτά η είσοδος που προκαλεί τη διαταραχή και την απόκλιση από τις συνθήκες ισορροπίας, είναι η *μεταβλητή φορτίου*.
- *συστήματα καθοδήγησης ή συστήματα εξυπηρέτησης (servo control).* Στοχεύει να ακολουθεί η ρυθμιζόμενη μεταβλητή τις μεταβολές της επιθυμητής τιμής κατά το δυνατόν πιο πιστά. Στην περίπτωση αυτή η επιθυμητή τιμή είναι η είσοδος που προκαλεί τη διαταραχή της ισορροπίας και συχνά αναφέρεται και ως *μεταβλητή καθοδήγησης*.

Τα στοιχεία μιας ελεγχόμενης διεργασίας είναι τα εξής (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Μποντοζόγλου, 2015):

- *διεργασία.* Είναι η διεργασία που αφορά το σύστημα ελέγχου που έχει ως σκοπό να την εξυπηρετήσει, και είναι δυνατό να είναι μηχανική, ηλεκτρική, φυσική, χημική, βιολογική ή και οποιοσδήποτε συνδυασμός τους.
- *στοιχείο μέτρησης.* Είναι το όργανο που χρησιμεύει για τη διακρίβωση των διακυμάνσεων των τιμών της ρυθμιζόμενης μεταβλητής και διαβιβάζει το ανάλογο σήμα στον ελεγκτή (ρυθμιστή).
- *ελεγκτής (ρυθμιστής).* Στοχεύει να παρεμβαίνει για τη διατήρηση της επιθυμητής τιμής της ρυθμιζόμενης μεταβλητής. Στον ελεγκτή περιλαμβάνονται: ο μηχανισμός με τη βοήθεια του οποίου καθορίζεται η



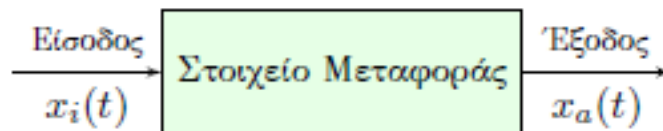
επιθυμητή τιμή, ο μηχανισμός διακρίβωσης ρυθμιστικής απόκλισης που συγκρίνει την πραγματική (μετρούμενη) με την επιθυμητή τιμή και ο κυρίως ελεγκτής που υπολογίζει το κατάλληλο σήμα το οποίο τροφοδοτεί στοιχείο τελικής ρύθμισης.

- *τελικό στοιχείο ελέγχου.* Ενεργοποιείται από τον ελεγκτή και με κατάλληλα προκαθορισμένη σχέση δρα για τον καθορισμό του ρυθμού με τον οποίο θα συνεχισθεί η όποια διεργασία. Σε χημικές διεργασίες το στοιχείο τελικής ρύθμισης είναι συνήθως μια *ρυθμιστική βαλβίδα* που ανάλογα με το σήμα του ελεγκτή μετατοπίζει το στέλεχος της βαλβίδας ώστε να μεταβάλλεται η διατομή του ανοίγματος μέσω του οποίου γίνεται η ροή.

Τέλος, εκτός από τα βασικά στοιχεία, σε ένα σύστημα ελέγχου είναι δυνατό να περιλαμβάνονται μηχανισμοί για μετατροπή, ενίσχυση, ένδειξη και καταγραφή των διαφόρων σημάτων (Μπάφας και Σιέττος, 2015).

4.2 Διάγραμμα Βαθμίδων

Διάγραμμα βαθμίδων ονομάζεται η *συμβατική απεικόνιση* μιας διεργασίας ελέγχου με την οποία παριστάνονται οι σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου στα διάφορα στοιχεία ενός συστήματος, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο οι πληροφορίες αυτές (σήματα) διακινούνται από το ένα στοιχείο στο άλλο, την κατεύθυνση δράσης των σημάτων. Η απλούστερη μορφή διαγράμματος είναι ένα ορθογώνιο που έχει μια είσοδο και μια έξοδο, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:

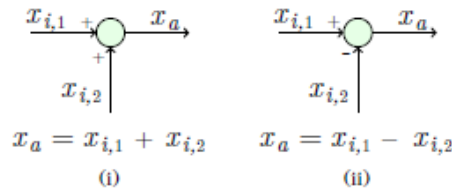


Σχήμα 57. Αναπαράσταση στοιχείου μεταφοράς (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

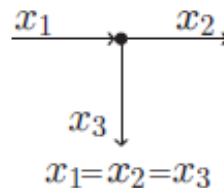
Κάθε ορθογώνιο σε ένα διάγραμμα βαθμίδων παριστάνει μία «βαθμίδα» ή αλλιώς ένα «στοιχείο μεταφοράς». Ως βαθμίδα ή στοιχείο μεταφοράς μπορεί να χαρακτηριστεί κάθε αυτοτελής μηχανισμός του συστήματος ρύθμισης. Επίσης, η *συνάρτηση μεταφοράς* $G(s)$ ορίζεται από τη σχέση: $x_a = G(s)x_i$, όπου x_a και x_i , είναι η έξοδος και η είσοδος κατάλληλα μετασχηματισμένες. Επιπλέον, εκτός από τα στοιχεία μεταφοράς σε ένα διάγραμμα βαθμίδων, υπάρχουν και στοιχεία συνδυασμού σημάτων που συμβολίζονται με ένα κύκλο όπως στο επόμενο σχήμα (Σχ.58). Το Σχ.58i υποδηλώνει ότι το αποτέλεσμα (έξοδος x_a) είναι το άθροισμα των επί μέρους μεγεθών (εισόδων) $x_{i,1}$ και $x_{i,2}$. Η μαθηματική διατύπωση της σχέσης είναι: $x_a = x_{i,1} + x_{i,2}$. Το σχήμα 58ii παριστάνει συγκριτική δράση της μορφής: $x_a = x_{i,1} - x_{i,2}$. Η έξοδος x_a αφορά τη διαφορά των δύο σημάτων εισόδου ($x_{i,1} - x_{i,2}$). Τέλος η απλή διασύνδεση σε ένα σημείο χωρίς την ύπαρξη κάποιας διεργασίας παρίσταται με κόμβο. Ο κόμβος είναι ένα σημείο διακλάδωσης



σήματος και παριστά τη μαθηματική σχέση της μορφής: $x_1 = x_2 = x_3$ (Σχ.59)(Μπάφας και Σιέττος, 2015).

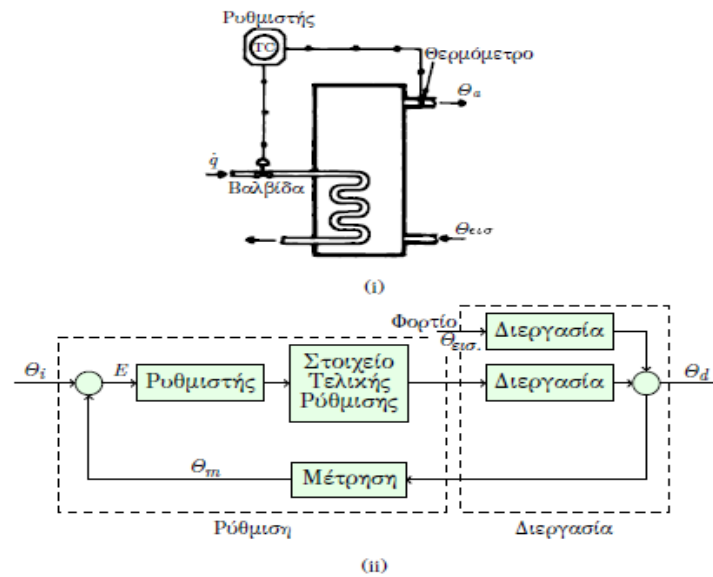


Σχήμα 58. Στοιχεία συνδυασμού σημάτων (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).



Σχήμα 59. Κόμβος ή σημείο διακλάδωσης (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

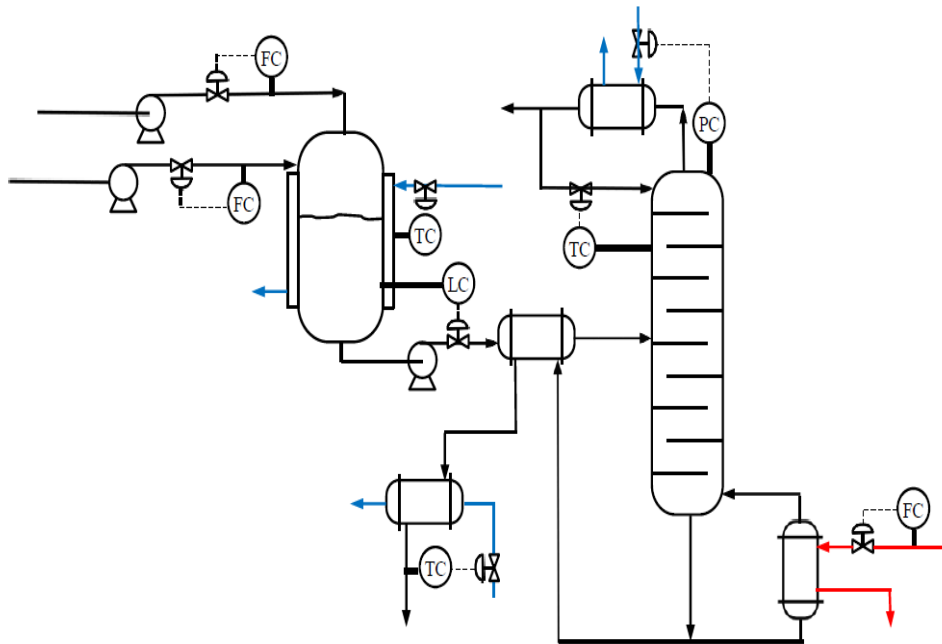
Στο επόμενο σχήμα, παρατίθεται το φυσικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας σε ένα θερμαντήρα και το αντίστοιχο διάγραμμα βαθμίδων. Με το σύστημα αυτό επιδιώκεται η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του θερμαντήρα Θ_a να είναι ίση με την επιθυμητή τιμή Θ_i . Η θερμοκρασία Θ_a μετράται με ένα θερμόμετρο, συγκρίνεται η τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας Θ_m με την επιθυμητή τιμή και η ρυθμιστική απόκλιση $E = \Theta_i - \Theta_m$ τροφοδοτείται ως σήμα εισόδου στον ελεγκτή. Ο ελεγκτής ανάλογα με την απόκλιση ενεργοποιεί το στοιχείο τελικής ρύθμισης που καθορίζει το ποσό θερμότητας που παρέχεται στο θερμαντήρα. Στο διάγραμμα βαθμίδων Σχ.60ii περιλαμβάνονται δυο κλάδοι και συγκεκριμένα στο αριστερό μέρος ο κλάδος της ρύθμισης και στο δεξιό ο κλάδος της διεργασίας. Στον κλάδο της διεργασίας αθροίζονται οι επιδράσεις των δύο μεταβλητών που επηρεάζουν τη θερμοκρασία U_a , δηλαδή η επίδραση της θερμοκρασίας $\Theta_{είσ}$ και του ρυθμού ροής ενέργειας q . Στον κλάδο της ρύθμισης περιλαμβάνονται το στοιχείο μέτρησης, ο ρυθμιστής με το μηχανισμό διακρίβωσης απόκλισης και το στοιχείο τελικής ρύθμισης. Είσοδος στο σύστημα είναι η επιθυμητή τιμή της θερμοκρασίας Θ_i .



Σχήμα 60. Το φυσικό διάγραμμα και το διάγραμμα βαθμίδων συστήματος ρύθμισης θερμοκρασίας σε ένα θερμαντήρα (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

Τέλος, ανεξέλεγκτες μεταβολές παραμέτρων εισόδου που προέρχονται από εξωτερικούς της διεργασίας παράγοντες ονομάζονται *διαταραχές φορτίου*. Το σύστημα αυτόματου ελέγχου έχει ακριβώς σκοπό να ελαχιστοποιεί τα αποτελέσματα τέτοιων διαταραχών στη διεργασία. Η συμπεριφορά της διεργασίας κατά την επιβολή μιας διαταραχής φορτίου ονομάζεται *απόκριση*. Αν στη διεργασία δεν ασκείται έλεγχος έχουμε την *απόκριση ανοικτού βρόγχου (open-loop)*. Αντίστοιχα, η συμπεριφορά του συμπλέγματος διεργασίας-ελεγκτή ονομάζεται *απόκριση κλειστού βρόγχου (closed-loop)* (Μποντοζόγλου, 2015; Basu and Debnath, 2014).

Η γραφική αναπαράσταση των βρόγχων ελέγχου μιας βιομηχανικής μονάδας γίνεται με προσθήκη κατάλληλων πληροφοριών στο διάγραμμα ροής των διεργασιών που την απαρτίζουν. Έτσι, παράλληλα με τις γραμμές που αναπαριστούν τα ρεύματα εισόδου/εξόδου των συσκευών, σημειώνονται οι μεταβλητές που μετρώνται ή/και ελέγχονται. Οι πληροφορίες που αφορούν στον έλεγχο εμφανίζονται με κυκλικό πλαίσιο, και το συνθετότερο διάγραμμα που προκύπτει ονομάζεται *διάγραμμα ροής και οργάνων*. Ένα παράδειγμα προσφέρεται από το επόμενο σχήμα, που αποτελεί το διάγραμμα ροής και οργάνων μιας χημικής μονάδας. Δύο υγρά ρεύματα τροφοδοτούνται σε δοχείο ανάδευσης όπου αντιδρούν εξώθερμα ενώ το δοχείο ψύχεται με μανδύα νερού. Τα προϊόντα της αντίδρασης οδηγούνται σε *αποστακτική στήλη* και διαχωρίζονται. *Ψύξη* και *θέρμανση* ρευμάτων πραγματοποιείται με εναλλάκτες θερμότητας. Επίσης, υπάρχουν ελεγκτές ροής για την τροφοδοσία του αντιδραστήρα, ελεγκτές θερμοκρασίας και στάθμης για το δοχείο του αντιδραστήρα και μία σειρά από άλλους ελεγκτές για την αποστακτική στήλη και τους εναλλάκτες. Οι μεταβλητές χειρισμού συνδέονται σχηματικά με τις αντίστοιχες μεταβλητές ελέγχου με διακεκομμένες γραμμές (Μποντοζόγλου, 2015; Basu and Debnath, 2014).



Σχήμα 61. Διάγραμμα ροής και οργάνων μιας απλής χημικής μονάδας. Τα ρεύματα με κόκκινο και μπλε χρώμα είναι αντίστοιχα παροχές ατμού και νερού ψύξης (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

Επίσης, στον χαρακτηρισμό των *σημείων ελέγχου* σε μια διεργασία, το πρώτο γράμμα παριστάνει με λατινικό χαρακτήρα την μεταβλητή για την οποία είναι διαθέσιμη πληροφορία. Οι συνηθέστερες μεταβλητές των φυσικών διεργασιών είναι οι εξής, όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα (Μποντοζόγλου, 2015; Basu and Debnath, 2014):

Πίνακας 4. Συμβολισμοί βασικών μεταβλητών σε βρόχους ελέγχου (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

<i>Συμβολισμός</i>	<i>Όνομα μεταβλητής</i>	<i>Αγγλική ονομασία</i>
P	Πίεση	Pressure
T	Θερμοκρασία	Temperature
F	Παροχή	Flow
L	Στάθμη	Level
C	Συγκέντρωση	Concentration

Πίνακας 5. Συμβολισμοί ενδεικτικών, καταγραφικών και ελεγκτών σε βρόχους ελέγχου (προσαρμογή από Μποντοζόγλου, 2015).

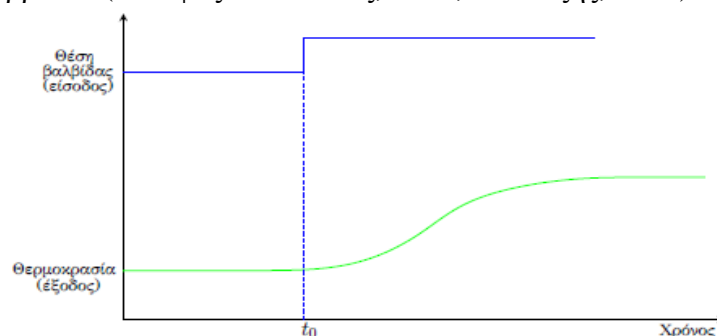


Συμβολισμός	Σημασία	Αγγλική ονομασία
I	Ενδεικτικό	Indicator
R	Καταγραφικό	Recorder
C	Ελεγκτής	Controller
IC	Ενδειξη-Έλεγχος	Indicator-Controller
RC	Καταγραφή-Έλεγχος	Recorder-Controller

4.3 Δυναμική Συμπεριφορά Συστήματος Ελέγχου

Η συμπεριφορά ενός συστήματος, όταν επιβληθούν σ' αυτό εξωτερικές διαταραχές δηλαδή μεταβολές σε μια ή περισσότερες από τις μεταβλητές εισόδου του συστήματος, είναι γνωστή ως *απόκριση του συστήματος*. Χαρακτηριστικό τόσο των επί μέρους διεργασιών όσο και ολόκληρου του συστήματος ρύθμισης είναι ότι μια μεταβολή στην είσοδο δεν προκαλεί αμέσως την αντίστοιχη μεταβολή στην απόκριση. Υπάρχει μια *καθυστέρηση* μεταξύ αιτίας και αποτελέσματος που οφείλεται στις φυσικές ιδιότητες του συστήματος. Καθυστέρηση εκτός από την κυρίως διεργασία παρουσιάζεται και σε άλλα σημεία του βρόχου ρύθμισης και κυρίως στα όργανα μέτρησης. Οι καθυστερήσεις αυτές πολλές φορές δυσχεραίνουν τη ρύθμιση (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991; Dorf and Bishop, 2016).

Η μεταβολή στη θέση της βαλβίδας που εικονίζεται στο επόμενο σχήμα, είναι μια από τις *χαρακτηριστικές μορφές διαταραχής* που χρησιμοποιούμε για τη μελέτη των συστημάτων που λειτουργούν σε *μεταβατικές συνθήκες*. Μια τέτοια ξαφνική μεταβολή από μια σταθερή τιμή σε μια νέα, μεγαλύτερη ή μικρότερη, σταθερή τιμή λέγεται *βαθμωτή ή βηματική μεταβολή* και η διαφορά μεταξύ αρχικής και τελικής τιμής λέγεται *ύψος βήματος ή βαθμίδας*. Η *καμπύλη της απόκρισης* δείχνει τη *δυναμική συμπεριφορά του συστήματος* δηλαδή την αλλαγή των μεταβλητών με τον χρόνο από τη στιγμή που θα επιβληθεί μια διαταραχή μέχρι να αποκατασταθεί μια νέα ισορροπία (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015).



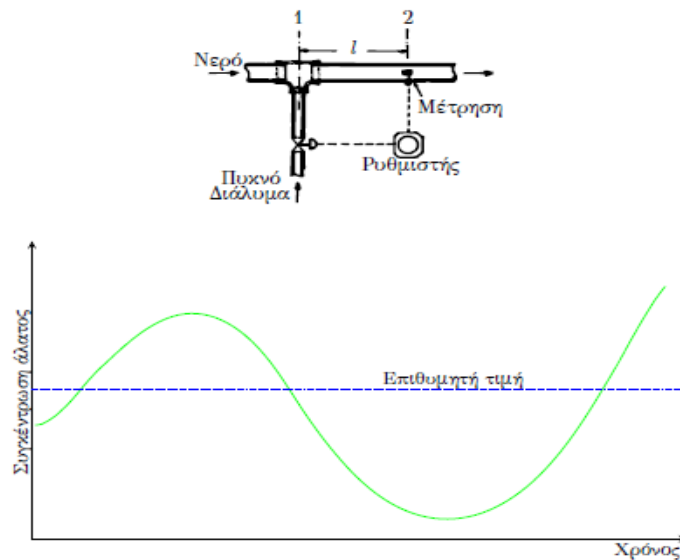
Σχήμα 62. Χρονική καθυστέρηση απόκρισης. Μεταβολή θερμοκρασίας με το χρόνο για αιφνίδια (βαθμωτή) μεταβολή του περιεχόμενου ποσού θερμότητας σε θερμαντήρα (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

Στο διάγραμμα του προηγούμενου σχήματος φαίνεται ότι μετά την αύξηση του παρεχόμενου ποσού θερμότητας η θερμοκρασία αποκαθίσταται σε μια νέα υψηλότερη τιμή. Το επιπλέον ποσό θερμότητας που προσδίδεται αυξάνει τη



θερμοκρασία του νερού κατά ένα δεδομένο ποσό σύμφωνα με τη γνωστή σχέση: $q = m \cdot C_p(\Theta_2 - \Theta_1)$. Διεργασίες όπου η έξοδος αποκαθίσταται σε μια νέα σταθερή τιμή μετά την επιβολή μιας διαταραχής πεπερασμένου εύρους λέγονται *ευσταθείς διεργασίες* (Μπάφας και Σιέττος, 2015).

Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται ως *ευσταθές*, όταν οι *παροδικές διαταραχές* ή αποκλίσεις από την κατάσταση ισορροπίας εξαφανίζονται με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, ένα σύστημα χαρακτηρίζεται ως *ασταθές*, αν μία παροδική διαταραχή προκαλέσει σε αυτό συνεχώς αυξανόμενο εύρος απομακρύνσεως από την κατάσταση ισορροπίας (Σχ.63). Πρακτικά, το μέγιστο εύρος μιας τέτοιας απομακρύνσεως σε ένα ασταθές σύστημα περιορίζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της διεργασίας (Μπάφας και Σιέττος, 2015).



Σχήμα 63. Αστάθεια συστήματος ρύθμισης λόγω μεγάλης ενίσχυσης του ρυθμιστικού βρόχου (προσαρμογή από Μπάφας και Σιέττος, 2015).

4.4 Σύνοψη

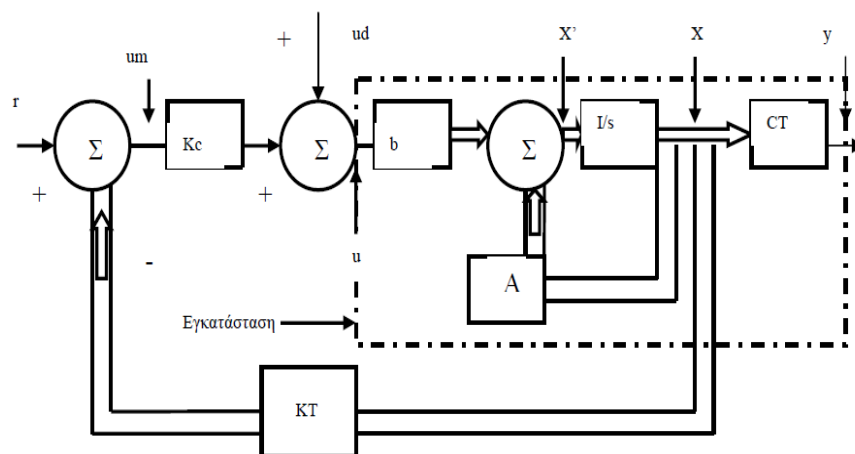
Στο παρόν κεφάλαιο, αναπτύχθηκαν τα επιμέρους θέματα που αφορούν τον έλεγχο μιας βιομηχανικής διεργασίας. Στόχος του ελέγχου είναι συνήθως η διατήρηση ορισμένων παραμέτρων σε τιμές κοντά στην *ονομαστική (set-point)* ή, σπανιότερα, η μεταβολή τους με έναν καθορισμένο τρόπο. Οι λειτουργικές αυτές παράμετροι ονομάζονται *μεταβλητές ελέγχου ή ρύθμισης* και μπορεί για παράδειγμα να είναι παροχές, θερμοκρασίες, πιέσεις ή συστάσεις. Ο αυτόματος έλεγχος ή ρύθμιση επιτυγχάνεται με συστηματική μεταβολή άλλων παραμέτρων που ονομάζονται *μεταβλητές χειρισμού*. Μεταβλητές χειρισμού είναι συνήθως παροχές στο πεδίο των βιομηχανικών διεργασιών, οι οποίες αυξομειώνονται με τη χρήση κατάλληλων στοιχείων ελέγχου (π.χ. βάνες).



5 ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

5.1 Μοντέρνος Έλεγχος

Στο *μοντέρνο έλεγχο* ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου υλοποιείται με *ανάδραση των μεταβλητών κατάστασης* (Σχ.64). Εδώ υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθούν *πόλοι (pole)* σε οποιοδήποτε σημείο του μιγαδικού επιπέδου χωρίς να επηρεαστούν οι *μηδενιστές (zero)*. Αυτό δίνει μεγαλύτερη *ευελιξία* και μπορεί να μετατραπούν οι διεργασίες που είναι τελείως *ασταθείς* και που ο κλασικός έλεγχος δεν θα μπορούσε να ελέγξει, σε *ευσταθείς*. Επίσης, ο μοντέρνος έλεγχος δίνει τη δυνατότητα να ελεγχθούν *συστήματα πολλών εισόδων και πολλών εξόδων* χωρίς να υπάρχει *αλληλεπίδραση* των διαφορετικών ελεγχόμενων μεταβλητών μεταξύ τους. Τέλος, ο μοντέρνος έλεγχος προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης κάποιου *Δείκτη Λειτουργικής Απόδοσης (ΔΛΑ)* για να γίνει ένα σύστημα βέλτιστο ως προς την ταχύτητα απόκρισης, ή την οικονομία χρήσης της ενέργειας. Η υλοποίηση αυτού του είδους ελέγχου γίνεται με κατάλληλε μετρήσεις των μεταβλητών καταστάσεων, χωρίς την παραγωγή κανενός σήματος. Αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με την κλασική μεθοδολογία. Για παράδειγμα, σε ένα μηχανικό σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές κατάστασης η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Η ανατροφοδότηση μεταβλητών κατάστασης απαιτεί μέτρηση των τριών αυτών ποσοτήτων δια μέσου κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας. Μερικές φορές τέτοιες μετρήσεις μπορεί να είναι είτε δύσκολες είτε πολύ δαπανηρές. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να γίνει χρήση παρατηρητή (*observer*) για την λήψη έμμεσων μετρήσεων των μεταβλητών καταστάσεων (Dorf and Bishop, 2016; Golnaraghi and Kuo, 2011).



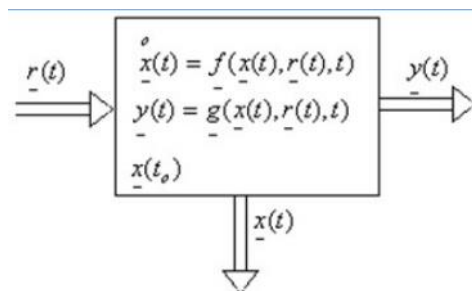


Σχήμα 64. Σύστημα ελέγχου με ανάδραση μεταβλητών κατάστασης (προσαρμογή από Κοτζαπέτρος, 2012⁵).

5.2 Βέλτιστος Έλεγχος

Ο *Βέλτιστος Έλεγχος* χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτείται *ελαχιστοποίηση* συγκεκριμένης απόδοσης ή *κριτηρίου κόστους* (χρόνος, ενέργεια). Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο κριτήριο ή συνάρτηση σχεδιάζεται κατάλληλος κανόνας ελέγχου που εφαρμόζεται με ελεγκτή που ονομάζεται *τετραπλός γραμμικός ρυθμιστής LQR (Linear Quadratic regulator)* (Dorf and Bishop, 2016; Golnaraghi and Kuo, 2011). Ειδικότερα, το πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου αφορά στον προσδιορισμό ενός διανύσματος ελέγχου $r(t)$ ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κριτήριο κόστους (Σχ.65):

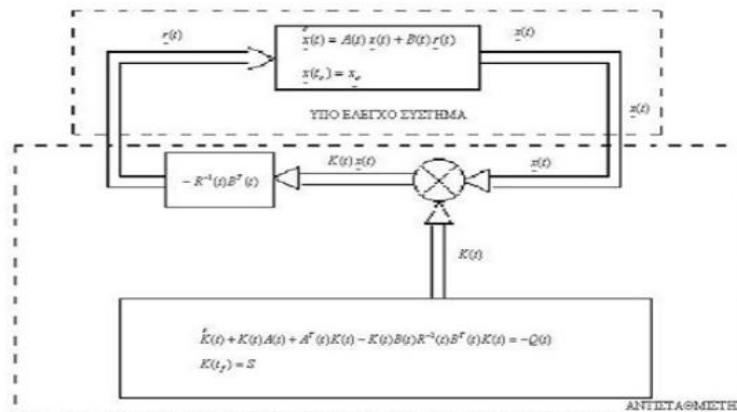
$$J = \theta[\underline{x}(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} \phi[\underline{x}(t), \underline{r}(t), t] dt \quad (21)$$



Σχήμα 65. Πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου (προσαρμογή από <http://slideplayer.gr/slide/11208084/>).

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στο κόστος στα άκρα του χρονικού διαστήματος, ενώ ο δεύτερος όρος είναι ολοκληρωτικός, και αναφέρεται στο κόστος σε όλο το διάστημα βελτιστοποίησης. Το κριτήριο εκφράζει συνήθως κάποια ποσότητα που να έχει φυσική σημασία (π.χ. ενέργεια), με στόχο την ελαχιστοποίηση. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης οι συναρτήσεις θ και ϕ παίρνουν κάποιες συγκεκριμένες μορφές. Ο βέλτιστος έλεγχος θεωρείται μια σύγχρονη μεθοδολογική προσέγγιση σχεδίασης συστημάτων ελέγχου των διεργασιών (Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991). Στο επόμενο σχήμα, φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός βέλτιστου γραμμικού ρυθμιστή:

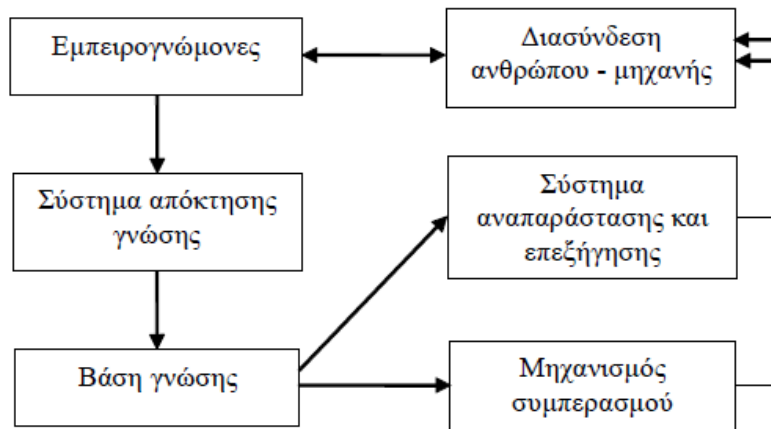
⁵ Κοτζαπέτρος, Α. (2012). Αυτόματος Έλεγχος μονάδας ενεργού υλίου χρησιμοποιώντας προηγμένα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης. Πρόταση διδακτορικής διατριβής, τμ. Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.



Σχήμα 65. Βέλτιστος γραμμικός ρυθμιστής (προσαρμογή από <http://slideplayer.gr/slide/11208084/>).

5.3 Ευφυής Έλεγχος

Ο έλεγχος αυτός αντλεί τεχνικές από διάφορες επιστήμες όπως η νευρολογία, η ψυχολογία τα μαθηματικά κλπ., αφού διαθέτει διεπιστημονική προέλευση και βάση. Ο στόχος ενός ευφυούς ελεγκτή είναι να λειτουργεί όπως ένας επιτυχημένος άνθρωπος ελεγκτής με τους ίδιους κανόνες χωρίς όμως τα μειονεκτήματά του. Το ανθρώπινο πλεονέκτημα ως ελεγκτής μιας διεργασίας είναι ότι μπορούν να ανταπεξέλθουν και να πάρουν αποφάσεις κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας και να αντιδράσουν άμεσα σε απρόβλεπτες καταστάσεις. Ένας καλά σχεδιασμένος ευφυής ελεγκτής πρέπει να μπορεί να «μιμηθεί» αυτή την ανθρώπινη ικανότητα, σαν να ήταν ο καλύτερος άνθρωπος ελεγκτής μια συγκεκριμένης διεργασίας. Έτσι ένα πρώτο πρόβλημα που πρέπει να απαντηθεί από τον σχεδιαστή ενός ευφυούς ελεγκτή είναι η καταγραφή των κανόνων με βάση τους οποίους λειτουργεί ένας επιτυχημένος άνθρωπος ελεγκτής της διεργασίας. Η εξόρυξη αυτής της γνώσης γίνεται είτε με συνέντευξη του χειριστή είτε με τεχνικές γενετικών αλγορίθμων κλπ. Δεύτερο βήμα είναι η αποθήκευση αυτής των κανόνων σε μια *βάση γνώσης* χρησιμοποιώντας είτε συμβολική μορφή (LISP, C++, κλπ) είτε αριθμητική μορφή (ασαφής λογική, νευρωνικά δίκτυα). Έπειτα ακολουθεί η επιλογή και υλοποίηση ενός *μηχανισμού συμπερασμού* ο οποίος παίρνοντας σαν είσοδο κάποιες μετρήσεις από την ελεγχόμενη διαδικασία και χρησιμοποιώντας την βάση γνώσης που έχει δημιουργηθεί, εξάγει κάποια έξοδο που ανατροφοδοτείται στην ελεγχόμενη διαδικασία. Τα βήματα αυτά, απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα (Κίνγκ, 2004):

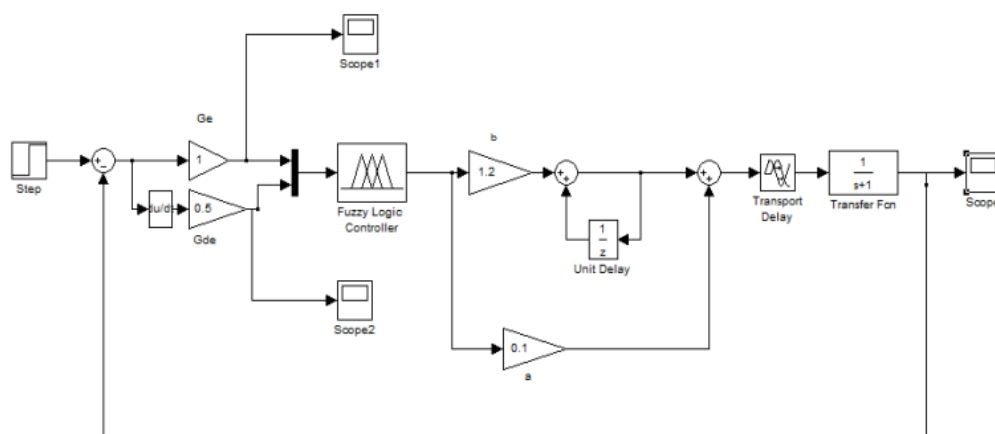


Σχήμα 66. Διαδικασία ανάπτυξης ευφυή ελεγκτή (προσαρμογή από Κίνγκ, 2004).

Ο ευφυής έλεγχος συνήθως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας, όταν είναι πρακτικά αδύνατη η εφαρμογή κλασικών τεχνικών. Οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες σχεδιάζεται ένας ευφυής ελεγκτής είναι οι ακόλουθες (Κίνγκ, 2004):

- *Ορθότητα*: Η ικανότητα εκτέλεσης των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος με ασφάλεια.
- *Ευρωστία*: Η ικανότητα του συστήματος να παραμένει λειτουργικό κάτω από μη αναμενόμενες συνθήκες.
- *Επεκτασιμότητα*: Η δυνατότητα επέκτασης του υλικού και του λογισμικού χωρίς επανασχεδίαση του συστήματος από την αρχή.

Τέλος, στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένας ευφυής ελεγκτής τριών όρων (PID):



Σχήμα 67. Διάταξη ευφυή ελεγκτή τύπου PID σχεδιασμένου σε περιβάλλον Simulink (προσαρμογή από <http://eclass.teipir.gr/openelect>).



5.4 Μηχανική Μάθηση

Ως κλάδος της *Τεχνητής Νοημοσύνης (TN)*, η *Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)* ασχολείται με τη μελέτη αλγορίθμων που βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους σε κάποια εργασία που τους έχει ανατεθεί χρησιμοποιώντας την *εμπειρία* τους. Όσον αφορά τη σχεδίαση των *συστημάτων Μηχανικής Μάθησης*, για τα συστήματα που ανήκουν στη συμβολική TN, η δυνατότητα μάθησης προσδιορίζεται ως η *ικανότητα πρόσκτησης επιπλέον γνώσης*, που επιφέρει μεταβολές στην υπάρχουσα καταχωρημένη γνώση είτε αλλάζοντας χαρακτηριστικά της είτε με αυξομειώσή της. Στην περίπτωση των συστημάτων TN που ανήκουν στη Μη Συμβολική TN (όπως η περίπτωση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων), ως μάθηση προσδιορίζεται η δυνατότητα που διαθέτουν τα συστήματα στο να μετασχηματίζουν την *εσωτερική τους δομή*, παρά στο να μεταβάλλουν κατάλληλα τη γνώση που έχει καταχωρηθεί μέσα σε αυτά κατά το σχεδιασμό τους (Βλαχάβας κ.α. 2011; Γεωργούλη, 2015; Mitchel. 1997; Russel and Norvig, 2003).

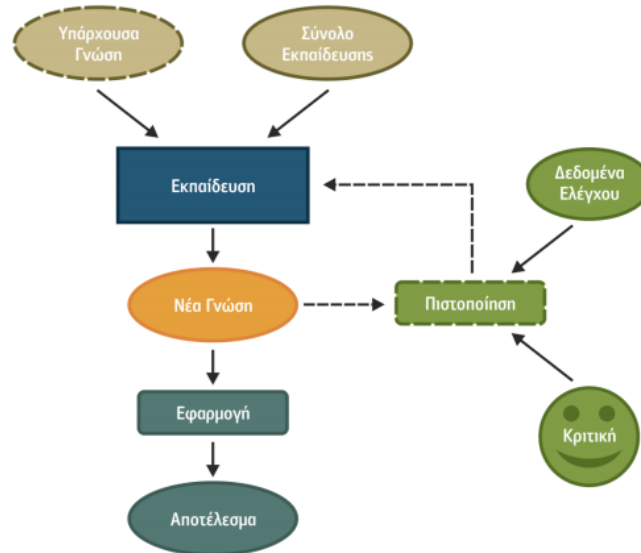
Ο τομέας της *Μηχανικής Μάθησης* αναπτύσσει τρεις *τρόπους μάθησης*, ανάλογους με τους τρόπους με τους οποίους μαθαίνει ο άνθρωπος (Βλαχάβας κ.α. 2011; Γεωργούλη, 2015; Καμπουρλάζος και Παπακώστας, 2015; Mitchel. 1997; Russel and Norvig, 2003):

- *Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning)*, όπου είναι η διαδικασία που ο αλγόριθμος κατασκευάζει μια συνάρτηση απεικόνισης δεδομένων εισόδων (σύνολο εκπαίδευσης) σε γνωστές επιθυμητές εξόδους, με σκοπό τη γενίκευση της συνάρτησης αυτής και για εισόδους με άγνωστη έξοδο. Χρησιμοποιείται σε προβλήματα: *ταξινόμησης (Classification)*, *πρόγνωσης/πρόβλεψης (Prediction)* και *διερμηνείας (Interpretation)*.
- *Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση (Unsupervised Learning)*, όπου ο αλγόριθμος κατασκευάζει ένα μοντέλο για κάποιο σύνολο εισόδων υπό μορφή παρατηρήσεων χωρίς να γνωρίζει τις επιθυμητές εξόδους. Χρησιμοποιείται συνήθως σε προβλήματα: *ανάλυσης συσχετισμών (Association Analysis)* και *ομαδοποίησης (Clustering)*.
- *Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning)*, όπου ο αλγόριθμος μαθαίνει μια στρατηγική ενεργειών μέσα από άμεση αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα *σχεδιασμού (Planning)*, όπως για παράδειγμα ο *έλεγχος κίνησης ρομπότ* και η *βελτιστοποίηση εργασιών* σε βιομηχανικές μονάδες.

Τέλος, στο επόμενο σχήμα, φαίνεται ο *γενικός τρόπος λειτουργίας των αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης*. Η *βασικότερη φάση* είναι η *εκπαίδευση*, όπου ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ως *είσοδο* ένα *σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης (training set)* προς επίτευξη του σκοπού του, τη δημιουργία *νέας γνώσης*. Επιπλέον, μπορεί είτε να χρησιμοποιήσει λιγότερο ή περισσότερο την υπάρχουσα γνώση είτε να μην τη χρησιμοποιήσει καθόλου, ανάλογα με το πρόβλημα. Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται ευρέως στην διάγνωση βλαβών και στη βελτιστοποίηση ελέγχου



διεργασιών (Βλαχάβας κ.α. 2011; Γεωργούλη, 2015; Καμπουρλάζος και Παπακόστας, 2015; Mitchel. 1997; Russel and Norvig, 2003).



Σχήμα 68. Φάσεις Μηχανικής Μάθησης (προσαρμογή από Γεωργούλη, 2015).

5.5 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα-TNΔ* (*Artificial Neural Networks, ANN*) επεξεργάζονται πληροφορίες ανταποκρινόμενα δυναμικά σε εξωτερικά ερεθίσματα (εισόδους). Κάθε τεχνητός νευρώνας αποτελείται από πολλές εισόδους x_i και μία μόνο έξοδο y . Κάθε είσοδος x_i «ζυγίζεται» με ένα βάρος w_i και τα αποτελέσματα αθροίζονται μέσω της *συνάρτησης αθροίσματος* (*summation function*) F (Βλαχάβας κ.α. 2011; Γεωργούλη, 2015; Καμπουρλάζος και Παπακόστας, 2015; Russel and Norvig, 2003):

$$F = \sum_i^n x_i w_i \quad (22)$$

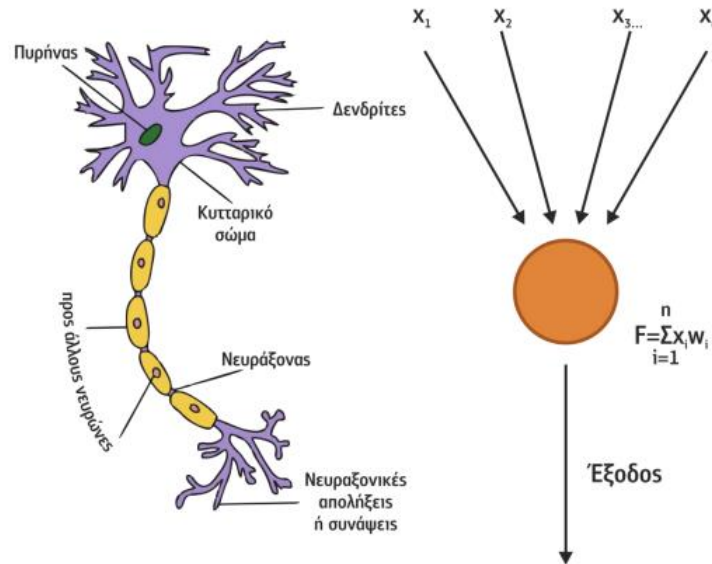
Ο τεχνητός νευρώνας δίνει έξοδο μέσω της *συνάρτησης μετάβασης* (*transfer function*), μόνο όταν το ζυγισμένο άθροισμα των εισόδων είναι μεγαλύτερο μιας ορισμένης τιμής *κατωφλίου* (*threshold value*) θ , δηλαδή όταν (Βλαχάβας κ.α. 2011; Γεωργούλη, 2015; Russel and Norvig, 2003):

$$\sum_i^n x_i w_i - \theta > 0 \quad (23)$$

Ένας τεχνητός νευρώνας αποτελεί απλοποιημένο μοντέλο του φυσικού νευρώνα κατά το ότι τα βάρη διασύνδεσης σχηματίζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της



επαφής της σύναψης και η τιμή καταφλίου προσομοιώνει τη συμπεριφορά κορεσμού του φυσικού νευρώνα (Σχ.69)(Βλαχάβας κ.α. 2011; Γεωργούλη, 2015; Καμπουρλάζος και Παπακώστας, 2015; Russel and Norvig, 2003).

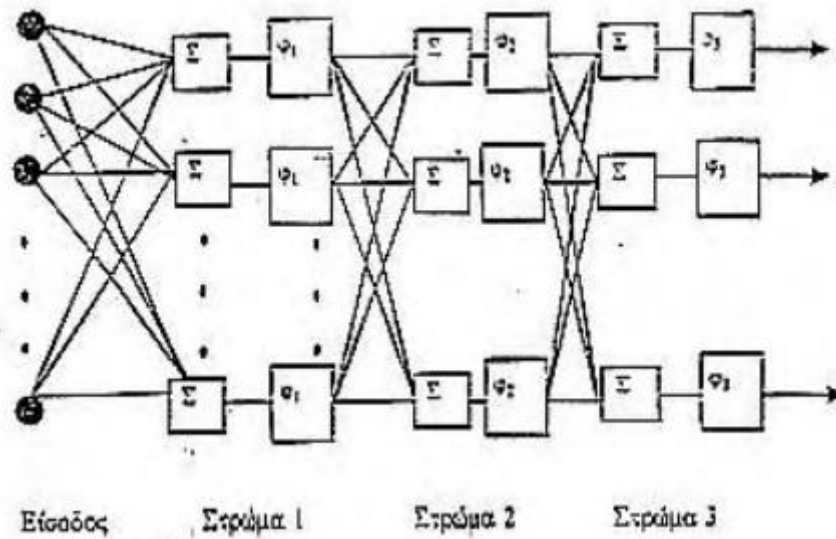


Σχήμα 69. Ο φυσικός νευρώνας σε σχέση με τον στοιχειώδη τεχνητό νευρώνα (Perceptron) (προσαρμογή από Γεωργούλη, 2015).

Ένα από τα απλούστερα ΤΝΔ που προσομοιώνουν τον φυσικό νευρώνα είναι ο στοιχειώδης *Perceptron (basic Perceptron)*, δηλαδή ένα ΤΝΔ που αποτελείται από έναν μόνο νευρώνα. Η έξοδος a του Perceptron για ένα διάνυσμα εισόδου $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ δίνεται μέσω της συνάρτησης μετάβασης g ως ακολούθως (Βλαχάβας κ.α. 2011; Γεωργούλη, 2015; Καμπουρλάζος και Παπακώστας, 2015; Russel and Norvig, 2003):

$$a = g \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i \right) \tag{24}$$

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική των ΤΝΔ, τα διακρίνουμε σε: (α) *πρόσθιας τροφοδότησης (feed forward)* και (β) *οπίσθιας τροφοδότησης (feed backward)*. Τα σύγχρονα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από πολλούς απλούς νευρώνες, όπως αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω, οι οποίοι συνθέτουν αρχικά ένα στρώμα και στη συνέχεια ένα σύστημα πολλαπλών στρωμάτων (Hopfield)(Σχ.70).

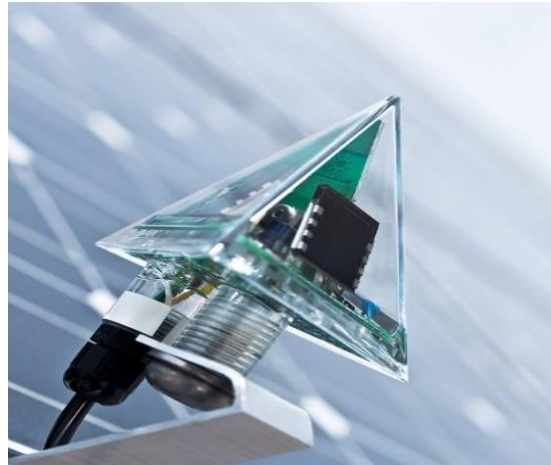


Σχήμα 70. Τεχνητό Νευρωνικό δίκτυο τριών στρωμάτων (προσαρμογή από <http://eprints.pascal-network.org/archive/00004161/01/ShalevThesis07.pdf>).

Τέλος, τα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται ευρέως στην παρακολούθηση (monitoring) και έλεγχο διεργασιών, μηχανημάτων (Haykin, 1999; Διαμαντάρας, 2007).

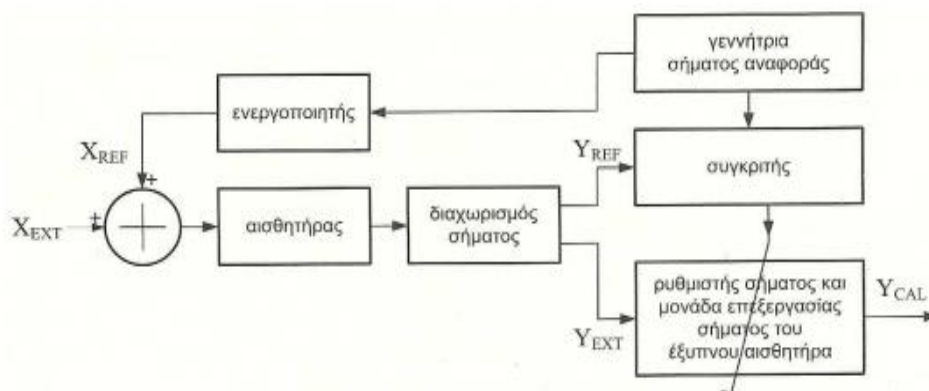
5.6 Έξυπνα Αισθητήρια

Ο «έξυπνος αισθητήρας (*smart sensor*)» είναι μια συσκευή που περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα αισθητήριο στοιχείο και ένα κύκλωμα επεξεργασίας σήματος. Ο όρος *έξυπνος* (*smart*) διατηρείται για να δηλώσει την επιμέρους ή την ολοκληρωτική ενσωμάτωση της κύριας μονάδας επεξεργασίας, η οποία προσθέτει ευφυΐα (Εικ.8). Σε έναν έξυπνο αισθητήρα, εκτός από τον υπολογισμό του μετρούμενου μεγέθους, η μονάδα επεξεργασίας πραγματοποιεί λειτουργίες, όπως αυτοέλεγχο, πολυανίχνευση (*multisensing*), αυτόματη βαθμονόμηση (*auto-calibration*), επικοινωνία με αναλογικούς και ψηφιακούς διαύλους επικοινωνίας (πχ. 4-20 mA, RS232, κλπ.), έλεγχο ενεργοποιητών κλπ. Ανάλογα με την εφαρμογή, η έξοδος ενός έξυπνου αισθητήρα μπορεί να είναι αναλογική ή ψηφιακή. Έτσι, ο αισθητήρας μετασχηματίζεται από ένα απλό παθητικό εξάρτημα σε ένα ολοκληρωμένο περιφερειακό υποσύστημα μιας διάταξης μέτρησης και ελέγχου. Η ανάπτυξη τέτοιων αισθητήρων συμβάλλει στη μείωση του μεγέθους και του κόστους των συστημάτων μέτρησης, καθώς η ρύθμιση και η επεξεργασία του σήματος του αισθητήρα γίνονται εσωτερικά σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, χωρίς να απαιτούνται εξωτερικές ηλεκτρονικές διατάξεις και καλωδιώσεις, και συνεπώς κόστος.



Εικόνα 8. Ο αισθητήρας MLD μετράει διαρκώς την ένταση και την γωνία της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και προσανατολίζει ανάλογα τον κάθε ιχνηλάτη ξεχωριστά. Κατά τη διαδικασία αυτή ο αισθητήρας MLD δεν λαμβάνει απλά υπόψη την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και το φως, το οποίο αντανακλάται από το χιόνι ή/και το διάχυτο φως που περνά μέσα από τα σύννεφα (προσαρμογή από http://www.degerhellas.gr/el/teχνologia_MLD).

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ενός έξυπνου αισθητήρα γίνεται αυτόματα μέσω κατάλληλων αναλογικών ή ψηφιακών κυκλωμάτων, που έχουν κατασκευαστεί μέσα στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του έξυπνου αισθητήρα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *αυτόματη βαθμονόμηση (auto-calibration)*. Ο έξυπνος αισθητήρας μπορεί να εφαρμόσει αυτή τη διαδικασία σε ένα σύστημα μέτρησης σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να μειώσει την επίδραση της ολίσθησης των χαρακτηριστικών λειτουργίας του πάνω στην ακρίβεια των μετρήσεων. Τέλος, το γενικό διάγραμμα της διαδικασίας *αυτόματης βαθμονόμησης* σε έναν έξυπνο αισθητήρα φαίνεται στο επόμενο σχήμα ():



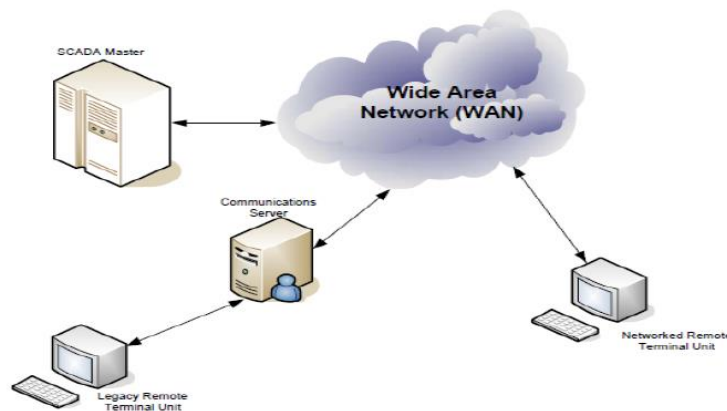
Σχήμα 71. Το γενικό διάγραμμα της διαδικασίας αυτοβαθμονόμησης σε έναν έξυπνο αισθητήρα (προσαρμογή από Βερυκοκίδης, 2010⁶).

⁶ Βερυκοκίδης, Μ. (2010). *Έξυπνοι αισθητήρες (Smart Sensors)*. Πτυχιακή Εργασία, τμ. Ηλεκτρολογίας, ΤΕΙ Κρήτης.



5.7 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) είναι το δίκτυο των φυσικών αντικειμένων ή «πραγμάτων», ενσωματωμένο με ηλεκτρονικά, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα έτσι ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί η μεγαλύτερη αξία και η αξία καλύτερη εξυπηρέτηση μέσω ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ του κατασκευαστή, του χειριστή/χρήστη και άλλων συνδεδεμένων συσκευών. Κάθε πράγμα είναι μοναδικά αναγνωρίσιμο μέσω του ενσωματωμένου συστήματος, αλλά είναι σε θέση να συνεργάζεται με την υφιστάμενη υποδομή του Διαδικτύου⁷. Το διαδίκτυο, τα κινητά και οι M2M (Machine 2 Machine) τεχνολογίες μπορούν να θεωρηθούν ως η πρώτη φάση ανάπτυξης του IoT. Προβλέπεται στο μέλλον το IoT να γεφυρώσει διαφορετικές τεχνολογίες δημιουργώντας νέες εφαρμογές που συνδέονται με τα φυσικά αντικείμενα παρέχοντας τη δυνατότητα για λήψη «έξυπνων» αποφάσεων. Τα πιθανά οφέλη από τη χρήση φαίνονται καταρχήν να είναι τεράστια αφού οι εφαρμογές του αλλάζουν τον τρόπο εργασίας αλλά και παραγωγικής λειτουργίας της βιομηχανικής μονάδας. Έτσι, πιο εύκολα νέες καινοτομικές προσεγγίσεις μπορούν να εισαχθούν στο πεδίο του βιομηχανικού ελέγχου (Παπασταθοπούλου, 2017; Mulani and Pingle, 2016). Για παράδειγμα, η υιοθέτηση του διαδικτύου ως βασικού φορέα μεταφοράς πληροφοριών σε ένα βιομηχανικό σύστημα SCADA, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 72. Το γενικό διάγραμμα SCADA τρίτης γενιάς (προσαρμογή από Βελώνη 2015^α).

Η αρχιτεκτονική του IoT βασίζεται σε τέσσερα κυρίως μοντέλα επικοινωνίας (Παπασταθοπούλου, 2017; Mulani and Pingle, 2016):

- *Μοντέλο Device to Device:* αντιπροσωπεύει δύο ή περισσότερες συσκευές που συνδέονται άμεσα και επικοινωνούν μεταξύ τους, και όχι μέσω ενδιάμεσου εξυπηρετητή εφαρμογών (server). Αυτές οι συσκευές επικοινωνούν μέσω πολλών τύπων δικτύων (IP, Internet) αλλά και πρωτοκόλλων όπως Bluetooth, 40 Z-Wave, ZigBee42 (Σχ.73).

⁷ Ορισμός Wikipedia.



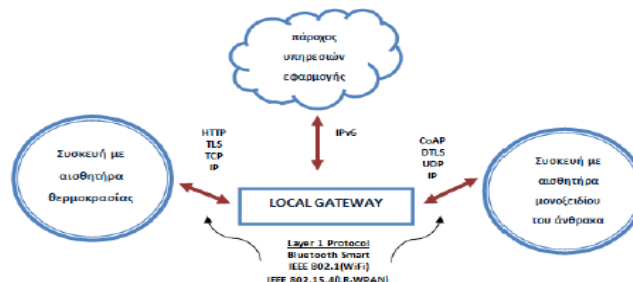
Σχήμα 73. Παράδειγμα μοντέλου Device to Device (προσαρμογή από Παπασταθοπούλου, 2017).

- *Μοντέλο Device to Cloud:* σε αυτό το μοντέλο, η IoT συσκευή συνδέεται άμεσα σε μια *διαδικτυακή υπηρεσία υπολογιστικού νέφους (cloud)*, που είναι πάροχος υπηρεσιών εφαρμογής, έτσι ώστε να ανταλλάξει δεδομένα και να διαχειρίζεται μηνύματα. Αυτό το μοντέλο αξιοποιεί υπάρχοντες επικοινωνιακούς μηχανισμούς (Ethernet, Wi-Fi), για να εγκαταστήσει μια σύνδεση μεταξύ μιας συσκευής και του δικτύου IP, το οποίο τελικά συνδέεται με την υπηρεσία cloud (Σχ.74).

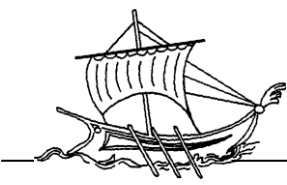


Σχήμα 74. Παράδειγμα μοντέλου Device to Cloud (προσαρμογή από Παπασταθοπούλου, 2017).

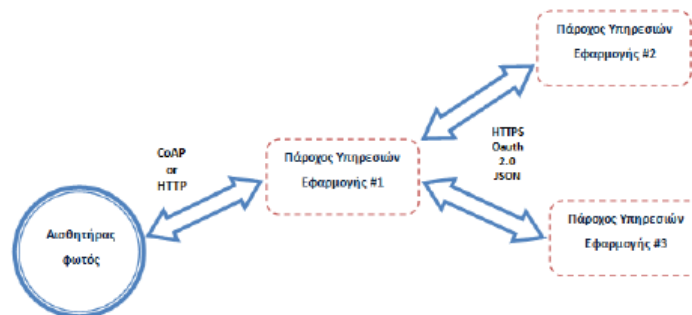
- *Μοντέλο Device to Gateway:* σε αυτό το μοντέλο η συσκευή IoT συνδέεται μέσω μιας υπηρεσίας ALG (Application-Layer-Gateway) ως αγωγός για να επιτευχθεί μια σύνδεση με την υπηρεσία cloud. Αυτό συνεπάγεται ότι αυτό το μοντέλο διαθέτει λογισμικό εφαρμογής που δρα ως ενδιάμεσος φορέας μεταξύ συσκευής και της υπηρεσίας cloud, και προσφέρει ασφάλεια και άλλες επιπρόσθετες λειτουργίες όπως δεδομένα ή μετάφραση πρωτοκόλλων (Σχ.75).



Σχήμα 75. Παράδειγμα μοντέλου Device to Gateway (προσαρμογή από Παπασταθοπούλου, 2017).

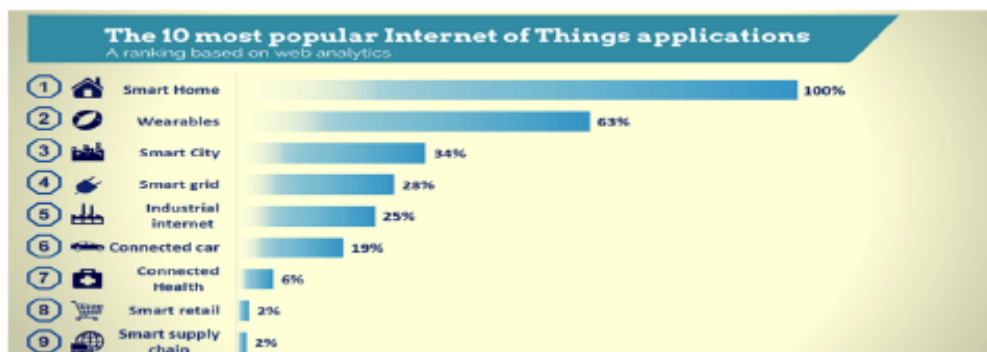


- *Μοντέλο Back - End Data – sharing*: σε αυτό το μοντέλο, επιτρέπεται στους χρήστες να εξάγουν και να αναλύσουν τα δεδομένα του έξυπνου αντικειμένου από μια υπηρεσία cloud, σε συνδυασμό με δεδομένα από άλλες πηγές. Αυτή προσέγγιση αφορά μια επέκταση του μοντέλου Device to cloud, που επιτρέπει στις συσκευές IoT να ανεβάζουν δεδομένα αποκλειστικά για ένα πάροχο υπηρεσιών εφαρμογής. Ειδικότερα, η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει τη δυνατότητα στα δεδομένα που συλλέγονται να υποβάλλονται και σε επεξεργασία & ανάλυση (Σχ.76).



Σχήμα 76. Παράδειγμα μοντέλου Back - End Data – sharing (προσαρμογή από Παπασταθοπούλου, 2017).

Στην επόμενο σχήμα φαίνονται οι πιο δημοφιλείς εφαρμογές IoT διεθνώς σύμφωνα με την ιστοσελίδα IoT analytics:



Σχήμα 77. Οι πλέον δημοφιλείς εφαρμογές του IoT διεθνώς (προσαρμογή από Παπασταθοπούλου, 2017).

Τέλος, ο ρόλος του IoT στην βιομηχανία θεωρείται σημαντικός ειδικά στο μέλλον, αφού η είσοδος του στα ψηφιακά συστήματα παραγωγής θα επιτρέψει να αναπτυχθεί μια σειρά νέων υπηρεσιών και εφαρμογών, που θα περιλαμβάνουν σύνδεση βιομηχανικής μονάδας με έξυπνο δίκτυο, διαμοιρασμό της εγκατάστασης παραγωγής ως υπηρεσίας ή τη μεγαλύτερη ευελιξία και ελαστικότητα στο πλαίσιο της παραγωγής των ίδιων των συστημάτων. Έτσι, το σύστημα παραγωγής θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα από τα πολλά IoT, σαν ένα



οικοσύστημα για πιο έξυπνη και πιο αποδοτική παραγωγή. Το ΙοΤ αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα προς την δημιουργία του *έξυπνου εργοστασίου*, συνδυαζόμενο με νέα τεχνολογικά εργαλεία όπως τα ρομπότ (Mulani and Pingle, 2016).

5.8 Ρομποτική

Ένα βιομηχανικό ρομπότ (*industrial robot*) αποτελεί μια προγραμματιζόμενη μηχανή γενικού σκοπού, που χρησιμοποιείται για την αυτόματη εκτέλεση διάφορων εργασιών συναρμολόγησης, μορφοποίησης και επεξεργασίας (Εικ.9). Υπάρχουν ρομπότ που διαθέτουν, κάποιους είδους *ανθρωπομορφικά χαρακτηριστικά*, όπως ο μηχανικός βραχίονας, στον οποίο προσομοιώνεται η δομή και λειτουργία του ανθρώπινου βραχίονα (Εικ.10). Επίσης, κάποια άλλα *ανθρωπομορφικά* («έξυπνα») *χαρακτηριστικά* που μπορεί να διαθέτουν τα ρομπότ είναι η προσαρμογή της λειτουργίας βάσει αισθητηριακών δεδομένων, η δυνατότητα επικοινωνίας με άλλες μηχανές και η δυνατότητα λήψης αποφάσεων, καθώς και η δυνατότητα κίνησης εντός ενός χώρου. Ο συνδυασμός των δυνατοτήτων αυτών παρέχει ευελιξία στα ρομπότ να επιτελούν μια ποικιλία εργασιών και προσφέρει συνάμα την εξήγηση γιατί η ρομποτική θεωρείται για πολλούς η βάση για το σχεδιασμό μιας μελλοντικής μηχανής, που θα μπορεί να αντικαταστήσει τον άνθρωπο σε νοητικά και σωματικά πολύπλοκες εργασίες, και ιδιαίτερα στο χώρο των βιομηχανικών διεργασιών (Phillips and Nagle, 1994; Εμίρης και Κουλουριώτης, 2006; Γιαννατσής κ.α. 2015).



Εικόνα 9. Βιομηχανικό ρομπότ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας μηχανή χύτευσης (προσαρμογή από ("*Automation of foundry with robot*" by KUKA Roboter GmbH).



Εικόνα 10. Βιομηχανικό ρομπότ μιμούμενο την ανθρώπινη γραφή (προσαρμογή από *KUKA Industrial Robot Writer*).

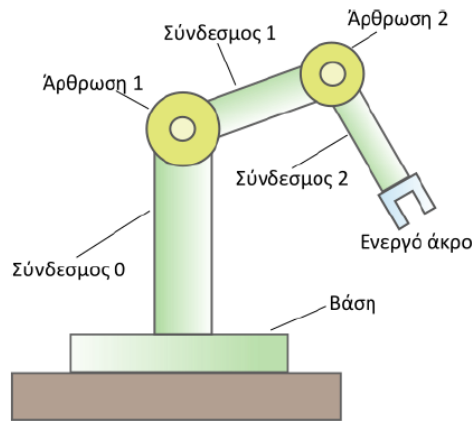
Τα οφέλη από την χρήση ρομπότ στην βιομηχανική παραγωγή είναι τα εξής (Εμίρης και Κουλουριώτης, 2006; Γιαννατσής κ.α. 2015):

- Τα ρομπότ μπορούν να αντικαταστήσουν τον άνθρωπο σε σχετικά επικίνδυνα και μονότονα περιβάλλοντα εργασίας.
- Ένα ρομπότ επιτελεί τον κύκλο εργασιών του με μεγαλύτερη ακρίβεια και συνέπεια από έναν άνθρωπο-χειριστή.
- Τα ρομπότ μπορούν να επαναπρογραμματιστούν για ποικιλία εργασιών που διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του εργαλείου/ενεργού άκρου (effector) που προσαρμόζεται στο κινούμενο άκρο τους.
- Τα ρομπότ διαθέτουν τη δυνατότητα ψηφιακής επικοινωνίας με άλλα συστήματα ψηφιακής κατασκευής και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής.

Όσο αφορά την *ανατομία* ενός ρομπότ, αυτή περιλαμβάνει το κυρίως σώμα που περιγράφεται συχνά και με τον όρο «*σύστημα χειρισμού*» ή «*χειριστής*» (*manipulator*). Το *σύστημα χειρισμού* αποτελείται από ένα σύνολο *συνδέσμων* (*links*) και *αρθρώσεων* (*joints*) που καθορίζουν ουσιαστικά το πεδίο και το εύρος κινήσεων του ρομπότ. Ο τύπος των συνδέσμων και των αρθρώσεων καθώς και το μέγεθος αυτών καθορίζει την ανατομία του ρομπότ καθώς και τη φυσική/μηχανολογική του διάταξη. Οι σύνδεσμοι είναι τα συμπαγή, σταθερά τμήματα της κατασκευής. Μια *άρθρωση* συνδέει δύο συνδέσμους, το *σύνδεσμο εισόδου* (*input link*) και το *σύνδεσμο εξόδου* (*output link*), επιτρέποντας ένα συγκεκριμένο εύρος κινήσεων, οι οποίες συνδέουν δύο τμήματα του σκελετού. Το εύρος και ο τύπος κίνησης που επιτρέπει μια άρθρωση περιγράφεται συχνά και με τον όρο *βαθμός ελευθερίας* (*degree of freedom*) της κίνησης. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ένας τύπος άρθρωσης αντιστοιχίζεται με ένα βαθμό ελευθερίας της κίνησης. Οι βαθμοί ελευθερίας περιγράφονται συχνά και με τον όρο *άξονες* της κίνησης. Επίσης, τα περισσότερα βιομηχανικά ρομπότ είναι σταθεροποιημένα/πακτωμένα σε μια βάση, συνήθως το δάπεδο ή κάποια άλλη



οριζόντια βάση (Σχ.78)(Εμίρης και Κουλουριώτης, 2006; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991; Γιαννατσής κ.α. 2015).



Σχήμα 78. Αρίθμηση αρθρώσεων και συνδέσμων σε ένα βιομηχανικό ρομπότ (προσαρμογή από Γιαννατσής κ.α. 2015).

Επιπλέον, ο έλεγχος της κίνησης των αρθρώσεων ενός ρομπότ, κατά τη διάρκεια ενός προγραμματισμένου κύκλου εργασιών, επιτελείται μέσω του ψηφιακού συστήματος ελέγχου, το οποίο αποτελείται, συνήθως, από έναν υπολογιστή, εξοπλισμένο με το κατάλληλο λογισμικό. Τα συστήματα ψηφιακού ελέγχου των ρομπότ μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες (Εμίρης και Κουλουριώτης, 2006; Schmid and Dietmar, 1999; Groover, 2007):

- Συστήματα ελέγχου κινήσεων περιορισμένης αλληλουχίας (limited sequence control).
- Συστήματα σημειακού ελέγχου (point-to-point control).
- Συστήματα ελέγχου συνεχούς τροχιάς (continuous path control).
- Συστήματα ευφυούς ελέγχου (intelligent control).

Τέλος, τα ρομπότ μπορούν θεωρητικά να επιτελέσουν πολλή μεγάλη ποικιλία εργασιών με την εφαρμογή του κατάλληλου εργαλείου. Στην περίπτωση αυτή, το ψηφιακό σύστημα ελέγχου του ρομπότ χειρίζεται την κίνηση του εργαλείου (π.χ. πιστόλι βαφής) σε σχέση με ένα ακίνητο (ή πολύ αργά κινούμενο) κομμάτι, καθώς και κάποιες από τις παραμέτρους λειτουργίας του (π.χ. την πίεση ψεκασμού). Συνήθη παραδείγματα εργαλείων, που προσαρμόζονται σε ένα ρομπότ ως ενεργά άκρα, αποτελούν η λαβίδα συγκόλλησης (welding gun) ή ηλεκτροσυγκόλλησης, το πιστόλι βαφής ψεκασμού, περιστρεφόμενα εργαλεία για διάνοιξη οπών, λείανση και άλλες παρόμοιες εργασίες, εργαλεία συναρμολόγησης (π.χ. ηλεκτρικά κατσαβίδια), εργαλεία υδροκοπής και κοπής με λέιζερ και άλλα. Σε όσες εφαρμογές απαιτείται, ο καρπός είναι σχεδιασμένος για την υποδοχή πολλών εργαλείων τα οποία είναι προσαρμοσμένα σε έναν εργαλειοφορέα (μοιάζει με αυτό της εργαλειομηχανής), που επιτρέπει τη γρήγορη εναλλαγή εργαλείων κατά τη διενέργεια σύνθετων επεξεργασιών. Ωστόσο, βασική προϋπόθεση, είναι το κόστος στην όποια χρήση τους (Schmid and Dietmar, 1999; Groover, 2007; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991).



5.9 Μοντέρνες Τάσεις στον Βιομηχανικό Αυτοματισμό

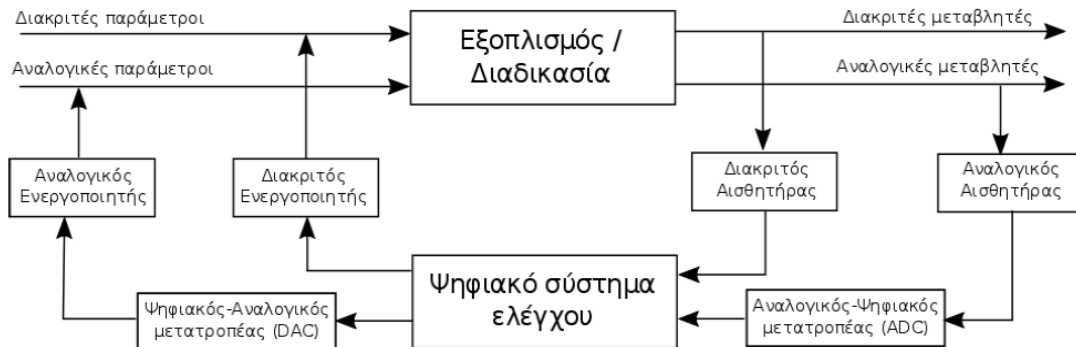
Ο αυτοματισμός είναι κάθε τεχνολογία που επιτρέπει την *αυτοματοποίηση* μιας *διεργασίας/εργασίας*. Σε μια παραγωγική μονάδα μπορεί να διακρίνει κανείς πολλά επίπεδα αυτοματοποίησης, αυξανόμενης πολυπλοκότητας και εύρους. Στα χαμηλότερα επίπεδα η αυτοματοποίηση συνδέεται με το παραγωγικό εξοπλισμό και τις μηχανές (π.χ. CNC). Σε ένα υψηλότερο επίπεδο, η λειτουργία της εργαλειομηχανής μπορεί ελέγχεται αυτόματα στο πλαίσιο ενός *κυττάρου παραγωγής*, μέσω ενός κεντρικού υπολογιστή που ελέγχει ένα αυτόματο σύστημα φόρτωσης/εκφόρτωσης υλικών. Το κύτταρο με τη σειρά του μπορεί να αποτελεί υποσύστημα ενός μεγαλύτερου αυτόματου συστήματος σε επίπεδο εργοστασίου ή ενός *ευέλικτου συστήματος παραγωγής (FMS)*. Γενικά, υπάρχουν τα εξής πέντε επίπεδα αυτοματοποίησης (Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991; Εμίρης και Κουλουριώτης, 2006; Schmid and Dietmar, 1999; Shell and Hall, 2000; Ogata, 1995):

- *Επίπεδο μηχανικού υποσυστήματος*. Το χαμηλότερο επίπεδο, περιλαμβάνει στοιχεία ή συσκευές (κινητήρες, αισθητήρες κα.), που λειτουργούν ως ενιαίο σύστημα ελέγχου μιας σχετικά απλής λειτουργίας.
- *Επίπεδο μηχανής*. Συσκευές και άλλα υποσυστήματα συναρμολογούνται σε μηχανές που λειτουργούν σύμφωνα με ένα πρόγραμμα εντολών.
- *Επίπεδο κυττάρου ή γραμμής παραγωγής*. Στο επίπεδο του κυττάρου μπορεί να αυτοματοποιηθεί η συνεργασία διάφορων μηχανών, που επιτελούν τα διάφορα στάδια βιομηχανικής επεξεργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή ενός προϊόντος. Εδώ αφορά, συνήθως, τη ανταλλαγή υλικών και πληροφοριών μεταξύ των μηχανών αλλά και την επεξεργασία δεδομένων ποιοτικού ελέγχου.
- *Επίπεδο εργοστασίου*. Στο επίπεδο αυτό, ο πυρήνας της αυτοματοποίησης είναι το πληροφοριακό σύστημα διαχείρισης της παραγωγής, το οποίο επιβλέπει λειτουργίες όπως η διαχείριση παραγγελιών, ο προγραμματισμός παραγωγής, ο έλεγχος αποθεμάτων και ο ποιοτικός έλεγχος.
- *Επίπεδο επιχείρησης*. Είναι το υψηλότερο επίπεδο αυτοματοποίησης που υποστηρίζεται από το πληροφοριακό σύστημα διοίκησης, μέσω του οποίου συντονίζονται οι βασικές λειτουργίες (τμήματα) της επιχείρησης όπως το μάρκετινγκ και οι πωλήσεις, η οικονομική διαχείριση, ο σχεδιασμός νέων προϊόντων και η παραγωγή.

Τέλος, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται διαγραμματικά, ένα μοντέρνο *ψηφιακά ελεγχόμενο σύστημα διεργασιών*. Ο ρόλος του υπολογιστή σε ένα τέτοιο σύστημα είναι *κομβικός*, και έγκειται στη *μεταφορά εντολών* προς τον εξοπλισμό επεξεργασίας/μηχανή και την επεξεργασία δεδομένων προερχόμενων από αυτόν. Οι εντολές αφορούν στην εκτέλεση του *κύκλου εργασιών* και τη *ρύθμιση των παραμέτρων* της διεργασίας (*process parameters*) έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι παράμετροι αποτελούν τις εισόδους της διεργασίας και καθορίζουν διάφορες φυσικές μεταβλητές, όπως η *θερμοκρασία των διαφόρων*



στοιχείων, η θέση των εργαλείων, η ταχύτητα κατεργασίας, ο χρόνος επεξεργασίας, η ενεργοποίηση ενός μηχανισμού κ.ο.κ. Η φυσική μεταβολή στην τιμή μιας παραμέτρου υλοποιείται από τον αντίστοιχο ενεργοποιητή (*actuator*), τη συσκευή, που ελέγχει τη σχετική μεταβλητή (Schmid and Dietmar, 1999; Shell and Hall, 2000; Ogata, 1995; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991).



Σχήμα 79. Διαγραμματική Αναπαράσταση συστήματος ψηφιακού ελέγχου διεργασίας/διαδικασίας (προσαρμογή από Γιαννατσής κ.α. 2015).

5.9 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν διάφορες μέθοδοι, τεχνικές του σύγχρονου αυτοματισμού διεργασιών, όπως επίσης και οι μοντέρνες τάσεις του βιομηχανικού αυτοματισμού, συμπεριλαμβανομένου και της υποστηρικτικής τεχνολογίας.



6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συζήτηση

Η λειτουργία κάθε βιομηχανικού οργανισμού χαρακτηρίζεται από ροή ενέργειας, υλών και πληροφορίας. Ο βασικός στόχος ελέγχου είναι ο βέλτιστος χειρισμός με μηχανικά μέσα των ροών ενέργειας και υλών μέσω της παρακολούθησης της ροής πληροφορίας. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ κάποιων οικονομικών και ποιοτικών παραγόντων που θα οδηγήσει σε κάποια άλλα οφέλη. Τα οφέλη που προκύπτουν από τον έλεγχο του βιομηχανικού οργανισμού είναι συνήθως (Μποντοζόγλου, 2015; Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991):

- αύξηση του όγκου παραγωγής λόγω της καλύτερης αξιοποίησης των δυνατοτήτων των μέσων παραγωγής,
- μείωση του κόστους παραγωγής ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος,
- βελτίωση της ποιότητας των παραγομένων προϊόντων,
- ευελιξία παραγωγής.

Τυπικό παράδειγμα είναι οι βιομηχανίες διεργασιών διαλείποντος έργου στις οποίες απαιτούνται συχνές ρυθμίσεις για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων μέσα στην ίδια ημέρα. Ο ρόλος του υπολογιστή στην περίπτωση αυτή είναι να παράγει γρήγορα το πρόγραμμα παραγωγής, επιτυγχάνοντας βέλτιστη αξιοποίηση των μέσων παραγωγής και των αποθεμάτων. Ωστόσο, εκτός από τα οικονομικά οφέλη, υπάρχουν και άλλα οφέλη, όπως η βελτίωση των συνθηκών εργασίας και η μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ειδικότερα, με τον έλεγχο της βιομηχανικής διεργασίας οι χειριστές απαλλάσσονται από μονότονες και επικίνδυνες εργασίες όπως είναι η χειροκίνητη ρύθμιση βαλβίδων με αποτέλεσμα να εξασφαλίζονται ανθρώπινες συνθήκες εργασίας. Όσον αφορά τη μείωση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, με τον έλεγχο μπορούν να μειωθούν αέριοι ρύποι, όπως είναι τα εκλυόμενα αέρια από την καύση. Επιπρόσθετα, ο έλεγχος είναι αδύνατον να γίνεται τόσο γρήγορα και τόσο συχνά μόνο με ανθρώπινους χειρισμούς.

Οι εξειδικευμένοι υπολογιστές, ηλεκτρονικές, ηλεκτρομηχανικές και πνευματικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για να υλοποιήσουν το βιομηχανικό έλεγχο των διεργασιών, συνιστούν τα *Βιομηχανικά Συστήματα Ελέγχου*. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα εποπτικά συστήματα ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA), τα κατανεμημένα συστήματα ελέγχου (Distributed Control Systems), και άλλα μικρότερου μεγέθους όπως είναι οι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (PLC).

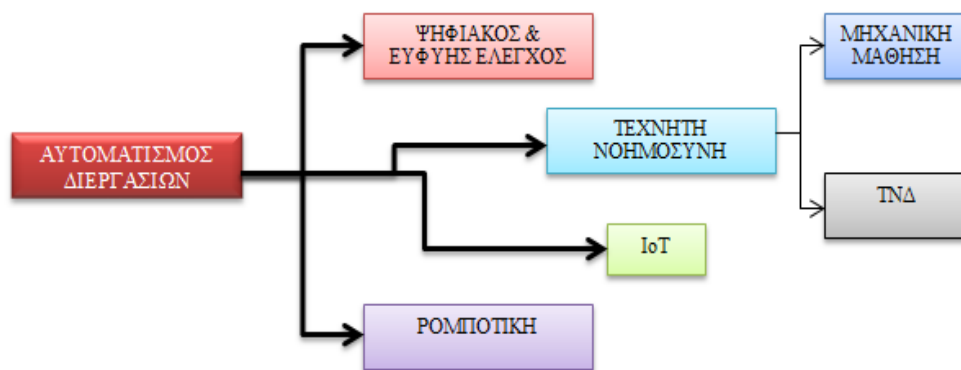
Είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να διευκρινιστούν ορισμένοι όροι που χρησιμοποιούνται στον χαρακτηρισμό των παραμέτρων (μεταβλητών) της διεργασίας από τη σκοπιά του αυτόματου ελέγχου. Στόχος του ελέγχου είναι συνήθως η διατήρηση ορισμένων παραμέτρων σε τιμές κοντά στην ονομαστική (*set-point*) ή, σπανιότερα, η μεταβολή τους με έναν καθορισμένο τρόπο. Οι



λειτουργικές αυτές παράμετροι ονομάζονται *μεταβλητές ελέγχου* και μπορεί για παράδειγμα να είναι παροχές, θερμοκρασίες, πιέσεις ή συστάσεις. Ο αυτόματος έλεγχος επιτυγχάνεται με συστηματική μεταβολή άλλων παραμέτρων που ονομάζονται *μεταβλητές χειρισμού*. Αυτές είναι συνήθως παροχές, οι οποίες αυξομειώνονται με τη χρήση κατάλληλων βανών. Το σύστημα αυτόματου ελέγχου έχει σκοπό να ελαχιστοποιεί τα αποτελέσματα τέτοιων διαταραχών στη διεργασία. Η συμπεριφορά της διεργασίας κατά την επιβολή μιας διαταραχής φορτίου ονομάζεται *απόκριση*. Αν στη διεργασία δεν ασκείται έλεγχος έχουμε την *απόκριση ανοικτού βρόγχου (open-loop)*. Αντίστοιχα, η συμπεριφορά του συμπλέγματος διεργασίας-ελεγκτή ονομάζεται *απόκριση κλειστού βρόγχου (closed-loop)*.

Συνοψίζοντας, διαπιστώθηκε από την παρούσα εργασία ότι, ο μελλοντικός αυτοματισμός διεργασιών θα στηριχτεί στις εξής τεχνολογίες και μεθόδους (Σχ.80)(Βελώνη, 2011; Μπάφας και Σιέττος, 2015; Πανταζής, 2015; Παρασκευόπουλος, 1991; Dorf and Bishop, 2016; Golnaraghi and Kuo, 2011; Μποντοζόγλου, 2015; Γιαννατσής κ.α. 2015):

- ψηφιακό και ευφυές έλεγχος,
- τεχνητή νοημοσύνη (μηχανική μάθηση, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα),
- διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), και
- ρομποτική.



Σχήμα 80. Διαγραμματική Αναπαράσταση των μελλοντικών τάσεων στον αυτοματισμό βιομηχανικών διεργασιών.

6.2 Μελλοντική Επέκταση Εργασίας

Δεδομένου ότι η εργασία περιορίστηκε στην βιβλιογραφική μελέτη και έρευνα των τεχνολογιών και μεθόδων του αυτοματισμού διεργασιών, προτείνεται η διενέργεια έρευνα αγοράς με σκοπό την ανάδειξη των απόψεων των στελεχών της παραγωγής σχετικά με τις μελλοντικές τάσεις στην αυτόματη ρύθμιση βιομηχανικών διεργασιών.



Τα δεδομένα της έρευνας, σε επίπεδο ελληνική βιομηχανίας, μπορεί να αποτελέσει το υλικό για τη δημιουργία μιας Εθνικής Βάσης Δεδομένων που θα λειτουργεί ως ένα σημαντικό εργαλείο άσκησης πολιτικής ανάπτυξης της.



7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

[1] Αλατσαθιανός, Σ. (2004). *Ανάπτυξη συστημάτων με μικροελεγκτές*. Εκδ. Γκιούρδας, Αθήνα.

[2] Αυλωνίτης, Δ.Α. (2017). *Γενική και Τεχνική Θερμοδυναμική*. Εκδ. Ζήτη, Θεσ/νίκη.

[3] Βελώνη, Α. (2011). *Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*. Εκδ. Τζιόλας, Αθήνα.

[4] Βλαχάβας, Ι., Κεφαλάς, Π., Βασιλειάδης, Ν., Ρεφανίδης, Ι., Κοκκοράς, Φ. & Σακελλαρίου, Η. (2011). *Τεχνητή Νοημοσύνη* (3η έκδοση). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Μακεδονίας.

[5] Cardwell, D. (2004). *Ιστορία της τεχνολογίας*. Μεταφρ. Δ. Κατσέρης, Εκδ. Μεταίχιμο, Αθήνα.

[6] Γιαννατσής, Ι., Δεδούσης, Β., Κανελλίδης, Β. 2015. *Σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής με τη βοήθεια Η/Υ*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

[7] Γεωργούλη, Α., 2015. *Τεχνητή νοημοσύνη*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

[8] Διαμαντάρας, Κ. (2007) *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα*, Κλειδάριθμος.

[9] Dorf, R. and Bishop, R. (2016). *Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*. Μτφρ. Ν. Κωφίδης, Εκδ. Τζιόλας, Αθήνα.

[10] Εμίρης, Δ., Κουλουριώτης, Δ. (2006) *Ρομποτική*, 3η έκδοση, ΣΕΛΚΑ-4Μ Τεκδοτική, Αθήνα.

[11] Golnaraghi, F. and Kuo, B. (2011). *Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*. Εκδ. ΙΩΝ, Αθήνα.

[12] Καλλιγερόπουλος, Δ. Μτφρ. (1996). *Ήρωνα του Αλεξανδρινού, Αυτοματοποιητική, Η τέχνη της κατασκευής των αυτομάτων*. Εκδόσεις Αρχαία Ελληνική Τεχνολογία, Αθήνα.

[13] Κίνγκ, Ρ. (1994). *Πληροφορικός Έλεγχος*. Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.

[14] Κίνγκ, Ρ. (1996). *Βιομηχανικός Έλεγχος*. Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.

[15] Κίνγκ, Ρ. (2004). *Ευφλής Έλεγχος*. Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα.



- [16] Κόγιας, Γ. (2010). *Εισαγωγή στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος*. Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα.
- [17] Καμπουρλάζος, Β., Παπακόστας, Γ., 2015. *Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών
- [18] Κοτζαμπάσης, Μ. (1994). *Αυτοματισμοί, διατάξεις-εφαρμογές, προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC)*. Εκδ. ΙΩΝ, Αθήνα.
- [19] Κουμπουλής, Φ.Ν. *Βιομηχανικός Έλεγχος*. εκδ. Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα 1999.
- [20] Κυπαρισσίδα, Κ. (1993). *Ανάλυση και σχεδιασμός των ομογενών χημικών αντιδραστήρων*. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
- [21] Λιακοπούλου-Κυριακίδου, Μ. (2017). *Βιοτεχνολογία με στοιχεία βιοχημικής μηχανικής*. Εκδ. Ζήτη, Θεσ/νίκη.
- [22] Λυμπεράτος, Γ. και Παύλου, Σ. (2010). *Εισαγωγή στη βιοχημική μηχανική*. Εκδ. Τζιόλας, Θεσ/νίκη.
- [23] Μαρίνος - Κουρής Δ., Μαρούλης Ζ. (1993). *Σχεδιασμός χημικών βιομηχανιών*. Εκδοτικός Οίκος: Παπασωτηρίου.
- [24] Μπάφας, Γ. και Σιέττος, Κ. (2015). *Γραμμικά και Μη Γραμμικά Συστήματα Αυτόματης Ρύθμισης Διεργασιών και Συστημάτων*. ΣΕΑΒ, Αθήνα, www.kallipos.gr.
- [25] Μποντοζόγλου, Β. (2015). *Εισαγωγή στις Φυσικές Διεργασίες – θεωρητικό υπόβαθρο και βασικές εφαρμογές*. ΣΕΑΒ, Αθήνα, www.kallipos.gr.
- [26] Νταρακάς, Ε. (2014). «Τεχνική Περιβάλλοντος». Έκδοση: 1.0. Open Courses, Θεσσαλονίκη.
- [27] Πανταζής, Ν. Α. (2001). *PLC, Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές*. Εκδ. ΙΩΝ, Αθήνα.
- [28] Πανταζής, Ν. Α. (2015). *Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου και Αυτοματισμοί*. Εκδ. Σταμούλη, Αθήνα.
- [29] Παπασταθοπούλου, Α. (2017). *Internet of Thing*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Θεσ/νίκη.
- [30] Παρασκευόπουλος, Π.Ν. (1991). *Έλεγχος Συστημάτων με Υπολογιστές*. Έκδοση ιδίου, Αθήνα.



- [31] Ross, A. (2016). *Οι βιομηχανίες του μέλλοντος*. Εκδ. Ίκαρος, Αθήνα.
- [32] Τεκερλοκοπούλου, Αθ. (2015). *Χημικές και βιομηχανικές διεργασίες*. Εκπαιδευτικό υλικό, Open Courses, Παν. Πατρών, έκδοση 1.0, Αγρίνιο.
- [33] Τζουνίδης, Γ. (2001). *Εφαρμογές αυτοματισμών με PLCs*. Εκδ. Σταμούλης, Αθήνα.
- [33] Schmid, D. (2010). *Αυτοματισμοί, έλεγχοι και ρυθμίσεις*. Εκδ. Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις, Αθήνα.
- [34] Σδούκος, Α.Θ. και Πομώνης, Φ.Ι. (2010). *Χημικές Διεργασίες της Χημικής Τεχνολογίας*. Εκδ. Τζιόλας, Θεσ/νίκη.
- [35] Φωτόπουλος, Σ.Δ. (2010). *Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος*. Αυτοέκδοση, Πάτρα.
Χασάπης, Γ. (2015). *Μηχανική Λογισμικού Συστημάτων Βιομηχανικού Ελέγχου*. ΣΕΑΒ, Αθήνα, www.kallipos.gr.
- [36] Χατζηευφραιμίδης, Α. (2005). *Σημειώσεις Τεχνολογία Μετρήσεων*. ΤΕΙ Χαλκίδας, Χαλκίδα.
- ΞΕΝΗ*
- [37] Adamson A.W. and Gast A.P. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces*. Wiley.
Bernard, J. (1989). *CIM in the Process Industries*. North Carolina: Instrument Society of America.
- [38] Basu S and Debnath AK (2014) *Power Plant Instrumentation and Control Handbook: A Guide to Thermal Power Plants*. Academic.
- [39] Groover, M.P. (2007) *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 3rd Edition, Prentice Hall.
- [40] Haykin, S. (1999) *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice.Hall.
- [41] Himmelblau D. (2006). *Βασικές αρχές και υπολογισμοί στη χημική μηχανική*. Εκδοτικός Οίκος: ΤΖΙΟΛΑ.
- [42] Himmelblau D.M. and Riggs J.B. (2004). *Βασικές Αρχές και Υπολογισμοί στη Χημική Μηχανική*. Prentice Hall (μετ. Εκδόσεις Τζιόλας).
- [43] Karapetsas G. and Bontozoglou V. (2015). Non-linear dynamics of a viscoelastic film subjected to a spatially periodic electric field. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 217, 1-13.



- [44] Kister, H. Z. (1992). *Distillation Design* (1st έκδοση). McGraw-Hill.
Mitchell, T.M. (1997). *Machine Learning*. Maidenhead, H.B.:McGraw-Hill International Editions.
- [45] Mulani, T.T. and Pingle, S.V. (2016). Internet of Things. Int. Research Journal of Multidisciplinary Studies & SPPP's, Vol. 2, Special Issue 1, March, 2016, pp. 1-4.
- [46] Nguyen N.-T. and Wereley S.T. (2002). *Fundamentals and Applications of Microfluidics*. Artech House.
- [47] Ogata, K. (1995) *Discrete-Time Control Systems*, 2nd Edition, Prentice Hall.
- [48] Perry, R. H. and Green, D. W. (1984). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (6th έκδοση). McGraw-Hill.
- [49] Phillips, C.L., Nagle, H.T. (1994) *Digital Control System Analysis and Design*, 3rd Edition, Prentice Hall.
- [50] Popovic, D. (1990). *Distributed Computer Control for Industrial Control*. New York: Marcel Dekker Inc.
- [51] Rosen, W. (2012). *The Most Powerful Idea in the World: A Story of Steam, Industry and Invention*. University of Chicago Press.
- [52] Russel, S. J. and Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence-A Modern Approach* (2nd edition). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- [53] Schmid, Dietmar (1999) *CIM ολοκληρωμένη παραγωγή με υπολογιστές*, επιμ. Μ. Βούλγαρης, Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις.
- [54] Schuegerl, K. (1987). *Bioreaction engineering*. New York: John Wiley & Sons.
Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (1989). *Process Control Dynamics and Control*. New York: John Wiley & Sons.
- [55] Shell, R.L., Hall, E.L. (2000) *Handbook of Industrial Automation*, Marcel Dekker, New York.
- [56] Smith J.M. and Van Ness H. (2004). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. McGraw-Hill.
- [57] Stouffer, K. (2013). *Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security*. National Institute of Standards and Technology.
- [58] Tominaga, H. & Tamaki, M. (1997). *Chemical Reaction and Reactor Design*. New York: John Wiley & Sons.



[59] Younkin, G. W. (2007). *Industrial Servo Control Systems - Fundamentals and Applications*. Taylor and Francis, 2nd ed., 2007.

[60] Wilkes, C.E. Summers, J.W. Daniels, C.A. (2005). *PVC Handbook*. Carl H. Verlag, Munich.

[61] Wiener, N. (1948). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press.