

Ευχαριστώ θερμά τον επίκουρο καθηγητή κ. Νικόλαο Τσουρβελούδη για την επίβλεψη και καθοδήγηση του καθ'όλο το διάστημα εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τον υποψήφιο διδάκτωρ κ. Στράτο Ιωαννίδη για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και το προσωπικό ενδιαφέρον που επέδειξε για την πορεία της έρευνας.

Ευχαριστώ επίσης τους γονείς και τον αδερφό μου για την αμέριστη ηθική και υλική συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια και όλους εκείνους που πιστεύουν σε μένα τις στιγμές που το χρειάζομαι.

Στο Θοδωρή

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Περιγραφή του προβλήματος.....	5
1.3 Στοιχεία βιβλιογραφίας συστημάτων παραγωγής.....	7
1.4 Συνεισφορά της εργασίας	8
1.5 Συνοπτική περιγραφή των μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος	9
1.6 Περιγραφή της δομής της διπλωματικής	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο – ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Νευρωνικά Δίκτυα	12
2.2.1 Εισαγωγή	12
2.2.2 Μάθηση.....	13
2.2.3 Γενίκευση.....	14
2.2.4 Αφαιρετική Ικανότητα	14
2.2.4 Δομή.....	14
2.2.5 Τρόπος Λειτουργίας.....	17
2.3 Ασαφής Λογική.....	18
2.3.1 Εισαγωγή	18
2.3.2 Ασαφή σύνολα και γλωσσικές μεταβλητές	19
2.3.3 Ασαφείς Κανόνες.....	21
2.3.4 Σύστημα Εξαγωγής Συμπεράσματος	22
2.4 Νεύρο-Ασαφή συστήματα	26
2.4.1 Εισαγωγή	26
2.4.2 Χαρακτηριστικά νεύρο-ασαφών συστημάτων.....	27
2.4.3 Το νεύρο-ασαφές σύστημα NEFCON	28
2.4.3.1 Γενικά.....	28
2.4.3.2 Αρχιτεκτονική	30
2.4.3.3. Αλγόριθμοι μάθησης.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο – ΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	40
3.1 Εισαγωγή.....	40
3.2 Ασαφής Κατανεμημένος Έλεγχος	40
3.3 Ασαφής Επιβλέπων Έλεγχος	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	51
4.1 Εισαγωγή.....	51
4.2 ΜΕΘ.1 : Υπολογισμός Μέγιστης Φόρτισης.....	56
4.3 ΜΕΘ.2 : Σύγκριση Μέγιστης Φόρτισης & Δυναμικότητας	57
4.4 ΜΕΘ.3 : Νεύρο-Ασαφής Έλεγχος (NEFCON)	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	63
5.1 Εισαγωγή.....	63
5.2 Σενάριο 1 ^ο	65
5.2.1 Αποτελέσματα.....	65
5.2.2 Συμπεράσματα	74
5.3 Σενάριο 2 ^ο	76
5.3.1 Αποτελέσματα.....	76
5.3.2 Συμπεράσματα	85
5.4 Γενικά Συμπεράσματα	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	89
Βιβλιογραφία	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο**ΕΙΣΑΓΩΓΗ****1.1 Γενικά**

Σημαντικές αλλαγές έχουν πραγματοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες, οι οποίες οδήγησαν σε σημαντική πρόοδο τη βιομηχανική παραγωγή. Η απόδοση ενός συστήματος βιομηχανικής παραγωγής μετριέται συνήθως από την παραγωγικότητα, τον χρόνο παραμονής των παραγόμενων προϊόντων στο σύστημα, το απόθεμα στο σύστημα, την ευελιξία, την ποιότητα, το βαθμό χρήσης των εγκαταστάσεων κ.α. Η αυξανόμενη ανάγκη για ταχύτητα και συγκεκριμένους χρόνους παράδοσης, έχει δώσει έμφαση στην μείωση του χρόνου παραμονής των παραγόμενων προϊόντων στο σύστημα και των εξόδων που συνδέονται με την παραγωγική διαδικασία. Ο προγραμματισμός παραγωγής με πολιτικές ελέγχου που κρατούν χαμηλό το απόθεμα στο σύστημα παραγωγής, είναι πολύ σημαντικές για τους ακόλουθους λόγους:

- 1) Το επενδυμένο κεφάλαιο σε αποθέματα που παραμένουν στους χώρους του εργοστασίου ή στις αποθήκες δεν αποδίδει κέρδος.
- 2) Το υψηλό απόθεμα σε ένα σύστημα παραγωγής αυξάνει το χρόνο παραμονής των παραγόμενων προϊόντων στο σύστημα και ταυτόχρονα μειώνει το χρόνο παράδοσης στους πελάτες. Επίσης, απαιτεί περισσότερο χώρο και ακριβά εργαλεία χειρισμού των προϊόντων που αυξάνουν με τη σειρά τους το κεφάλαιο που χρειάζεται να επενδυθεί.
- 3) Η ποιότητα των αποθεμάτων μειώνεται, καθώς τα ημιτελή προϊόντα που παραμένουν στους χώρους του εργοστασίου ενδέχεται να υποστούν καταστροφές [1].

1.2 Περιγραφή του προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, προτείνονται τρεις μεθοδολογίες ευφυούς ελέγχου για δίκτυα παραγωγής ενός τύπου προϊόντων. Ο έλεγχος που προτείνεται στοχεύει:

- 1) στην ικανοποίηση της ζήτησης η οποία αφίκνεται τυχαία υπό τη μορφή παραγγελιών στο σύστημα. Συνεπώς, η ικανοποίηση της ζήτησης ανάγεται στην ικανοποίηση των προθεσμιών παράδοσης (Due Dates) των εισερχόμενων παραγγελιών.
- 2) στην ελαχιστοποίηση του κόστους που συνδέεται με την παραγωγική διαδικασία, δηλαδή είναι άμεσα εξαρτημένο από τις παραμέτρους (ρυθμοί παραγωγής μηχανών, στάθμες αποθηκών κ.α.) του δικτύου παραγωγής. Το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας αποτελεί το κύριο κριτήριο, με βάση το οποίο γίνεται η σύγκριση της απόδοσης των μεθοδολογιών που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Παράλληλα, οι κατανεμημένοι ελεγκτές [1] των μηχανών του κατώτερου επιπέδου του συστήματος παραγωγής, έχουν ως στόχο:

- 1) τον περιορισμό σε χαμηλά επίπεδα, του χρόνου παραμονής των ημιτελών προϊόντων (WIP) και του συνολικού αποθέματος του συστήματος και παράλληλα
- 2) τη διατήρηση σε υψηλά επίπεδα, της χρησιμοποίησης (utilization) των μηχανών και της παραγωγικότητας του συστήματος.

Σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψιν στη συγκεκριμένη μελέτη, είναι ο στοχαστικός χαρακτήρας της ζήτησης (χρόνος άφιξης, προθεσμία παράδοσης και ποσότητα της παραγγελίας), γεγονός που έχει ως συνέπεια αυξημένη τυχειότητα στο σύστημα παραγωγής. Εξάλλου οι συνεχείς αφίξεις και αναχωρήσεις παραγγελιών, καθιστούν αναγκαία τη δημιουργία ενός υποσυστήματος αποθήκευσης αυτών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους από το σύστημα. Το προαναφερθέν υποσύστημα έχει ως ρόλο την αποθήκευση των εισερχόμενων παραγγελιών, την επεξεργασία αυτών και εν συνεχεία την τροφοδότηση των μηχανών του συστήματος.

Η διερεύνηση του προβλήματος έγινε σχεδιάζοντας και προσομοιώνοντας το σύστημα παραγωγής στο περιβάλλον Simulink της Matlab.

Απώτερος στόχος της εργασίας, είναι η σύγκριση των μεθοδολογιών τόσο μεταξύ τους, όσο και με άλλες κλασσικές μεθοδολογίες (π.χ. produce-at-capacity) και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τον βέλτιστο τρόπο ελέγχου ενός συστήματος παραγωγής.

1.3 Στοιχεία βιβλιογραφίας συστημάτων παραγωγής

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία [2], διαπιστώνεται ότι όλοι στη διοίκηση παραγωγής επιθυμείται παράδοση παραγγελίας στον προβλεπόμενο χρόνο, ελάχιστο χρόνο παραμονής των ημιτελών προϊόντων στο σύστημα, μικρούς χρόνους παράδοσης και μέγιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Δυστυχώς, οι στόχοι αυτοί αλληλοσυγκρούονται. Για παράδειγμα, είναι εφικτή η μείωση των χρόνων παράδοσης της παραγγελίας στον πελάτη αν διατηρείται μεγάλο απόθεμα κ.ο.κ. Στόχος του προγραμματισμού της παραγωγής, είναι η επίτευξη της καλύτερης δυνατής ισορροπίας όλων αυτών των αντικρουόμενων παραγόντων.

Βασικός περιορισμός όλων των μοντέλων προγραμματισμού παραγωγής είναι η επίτευξη των προθεσμιών παράδοσης. Στα προσανατολισμένα στη ζήτηση συστήματα (make-to-order systems), οι προθεσμίες παράδοσης που αφορούν στον πελάτη είναι αυτές που πιέζουν και καθορίζουν τις υπόλοιπες (π.χ προθεσμίες ενδιάμεσων διαδικασιών κατά την παραγωγή του προϊόντος). Στα συστήματα που προσανατολίζονται στη δημιουργία αποθέματος (make-to-stock systems), δεν υπάρχουν προθεσμίες παράδοσης προς τους πελάτες, αλλά η ενδεχόμενη μείωση του αποθέματος κάτω από ένα επίπεδο ασφαλείας, ενδέχεται μακροπρόθεσμα να οδηγήσει σε φαινόμενα ανικανοποίητης ζήτησης.

Εξάλλου στην βιομηχανία, οι οικονομικοί αναλυτές ενθαρρύνουν την υψηλή χρήση των διαθέσιμων πόρων. Η υψηλή χρήση του εξοπλισμού συνεπάγεται υψηλή επιστροφή του επενδυμένου κεφαλαίου, εφόσον βέβαια η παραγωγή υποστηρίζεται και από την ανάλογη ζήτηση. Η απόφαση για το ποιος στόχος πρέπει να τεθεί όσον αφορά στη χρήση των διαθέσιμων πόρων, θεωρείται στις περισσότερες βιομηχανίες ως στρατηγικής σημασίας για την επιχείρηση και συνεπώς βαραίνει τα ανώτερα διοικητικά επίπεδα της.

Τέλος, στη βιβλιογραφία [2] παρουσιάζονται αρκετά κίνητρα για τη μείωση, τόσο του χρόνου παραμονής των ημιτελών προϊόντων στο σύστημα (WIP), όσο και του χρονικού κύκλου για την παραγωγή ενός προϊόντος (cycle time). Ορισμένα από αυτά είναι τα κάτωθι:

1. *Καλύτερη ανταπόκριση προς τον πελάτη*: Εάν απαιτείται λιγότερος χρόνος για την παραγωγή του προϊόντος, ο χρόνος που απαιτείται για να καταλήξει αυτό στον πελάτη μειώνεται.
2. *Διατήρηση ευελιξίας*: Η αλλαγή στην λίστα των προγραμματισμένων για παραγωγή προϊόντων είναι ευκολότερη από την αλλαγή εργασιών που βρίσκονται ήδη εν εξελίξει. Συντομότεροι χρόνοι παραγωγής εμπεριέχουν αυτήν την ευελιξία.
3. *Βελτίωση της ποιότητας*: Μεγάλοι χρόνοι παραγωγής συνεπάγονται μεγάλες ουρές αναμονής στο σύστημα που με τη σειρά τους οδηγούν σε μεγάλη χρονική διαφορά ανάμεσα στην υποδοχή και την κάλυψη της ζήτησης.
4. *Μικρότερη εξάρτηση από τις προβλέψεις*: Εάν οι χρόνοι παραγωγής είναι μεγαλύτεροι από το πόσο μπορεί να περιμένει ο πελάτης, τότε η παραγωγή πρέπει να προβλέπει τη ζήτηση και όχι να προσπαθεί να την καλύψει όταν αυτή εμφανισθεί. Εάν λάβει κανείς υπόψιν του και την έλλειψη ακρίβειας των περισσότερων μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης, αντιλαμβάνεται τη σπουδαιότητα της διατήρησης των χρόνων παραγωγής σε χαμηλά επίπεδα.
5. *Δυνατότητα για καλύτερες προβλέψεις*: Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος παραγωγής του προϊόντος από το χρόνο παράδοσης του στον πελάτη, τόσο μεγαλύτερη θα πρέπει να είναι και η περίοδος πρόβλεψης. Επομένως, μικροί χρόνοι παραγωγής δίνουν τη δυνατότητα βραχυπρόθεσμων προβλέψεων, όπου τα πιθανά λάθη περιορίζονται [2].

1.4 Συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική, είναι συνέχεια της έρευνας που έχει ήδη δημοσιευθεί [1], [3] και συνεισφέρει κυρίως στο ότι οι μεθοδολογίες που αναπτύσσονται επιχειρούν να καλύπτουν τη ζήτηση και παράλληλα να ελαχιστοποιούν το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας. Οι μεθοδολογίες που προτείνονται είναι ευρετικές και κατά συνέπεια είναι λιγότερο χρονοβόρες από τις αναλυτικές μεθόδους.

Ο στοχαστικός χαρακτήρας της ζήτησης, προσεγγίζει ασφαλώς σε μεγαλύτερο βαθμό την πραγματικότητα που ισχύει στα συστήματα παραγωγής. Εξάλλου το γεγονός

ότι οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν, προσανατολίζουν το σύστημα ανάλογα με τη ζήτηση (make-to-order system), έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ανικανοποίητης ζήτησης και κατά συνέπεια του κόστους που αυτή συνεπάγεται

1.5 Συνοπτική περιγραφή των μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος.

Οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για την επίλυση του προβλήματος που περιγράφηκε συνοπτικά παραπάνω, στηρίχθηκαν εν μέρη σε ήδη ανεπτυγμένες μεθοδολογίες [1], [3]. Η ανάγκη επίτευξης των νέων στόχων του ελέγχου της παραγωγής που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.2, κατέστησε αναγκαία την επέκταση αυτών των μεθοδολογιών.

Το σύστημα παραγωγής στο οποίο εφαρμόστηκε ο ευφυής έλεγχος αποτελείται από δύο επίπεδα. Το κατώτερο επίπεδο περιλαμβάνει πέντε (5) μηχανές σε σειρά, ενώ ανάμεσα τους βρίσκονται αποθηκευτικοί χώροι πεπερασμένης χωρητικότητας. Στο κατώτερο επίπεδο, εφαρμόζεται ασαφής έλεγχος από καταναεμημένους ασαφείς ελεγκτές [1], οι οποίοι ρυθμίζουν τους ρυθμούς παραγωγής των μηχανών, ανάλογα με τις στάθμες των γειτονικών αποθηκών.

Το ανώτερο επίπεδο περιλαμβάνει το μηχανισμό υποδοχής και αποθήκευσης των εισερχόμενων παραγγελιών. Ο χώρος αποθήκευσης των παραγγελιών, λόγω της μορφής του, θα αναφέρεται στο εξής ως *λίστα παραγγελιών*. Οι παραγγελίες αποθηκεύονται με βάση το πρωτόκολλο EDD (Earliest Due Date), δηλαδή η παραγγελία με τη μικρότερη προθεσμία παράδοσης τοποθετείται στην πρώτη θέση της λίστας παραγγελιών κ.ο.κ. Στο ανώτερο επίπεδο καθορίζεται, μετά από κατάλληλη επεξεργασία των εισερχόμενων παραγγελιών, το μέγεθος της φόρτισης του συστήματος που τροφοδοτείται στις μηχανές του κατώτερου επιπέδου.

Στη πρώτη μεθοδολογία (ΜΕΘ.1), υπολογίζεται η φόρτιση του συστήματος για κάθε, κατειλημμένη από παραγγελία, θέση της λίστας παραγγελιών και στις μηχανές τροφοδοτείται υπό τη μορφή ζήτησης η μέγιστη εξ αυτών των φορτίσεων. Ο ρυθμός

παραγωγής που αντιστοιχεί στην μέγιστη φόρτιση, αν επιτευχθεί, μας διασφαλίζει την μακροπρόθεσμη ικανοποίηση της ζήτησης.

Στην δεύτερη μεθοδολογία (ΜΕΘ.2), λαμβάνεται υπόψιν και η παραγωγικότητα του συστήματος, η οποία συγκρίνεται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης με τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος. Αν η παραγωγικότητα είναι μεγαλύτερη της μέγιστης φόρτισης, το σύστημα παράγει με τον ρυθμό που απαιτείται για να ικανοποιήσει την παραγγελία που βρίσκεται στην πρώτη θέση της λίστας παραγγελιών, δηλαδή την πιο πιεστική παραγγελία. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα παράγει στα επίπεδα της δυναμικότητας του, για να καλύψει τη ζήτηση.

Στην τρίτη μεθοδολογία (ΜΕΘ.3), εφαρμόζεται, πέρα από τον ήδη υπάρχων ασαφή έλεγχο στο κατώτερο επίπεδο, νεύρο-ασαφής έλεγχος στο σύστημα παραγωγής, με στόχο την εξαγωγή του βέλτιστου ρυθμού παραγωγής. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται από τον νεύρο-ασαφή ελεγκτή NEFCON [4], ο οποίος δέχεται ως εισόδους παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του συστήματος και δίνει ως έξοδο τον ρυθμό με τον οποίο θα πρέπει να παράγουν οι μηχανές.

Για την προσομοίωση και τον σχεδιασμό του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το Fuzzy Logic Toolbox και η Simulink της Matlab, ενώ για το νεύρο-ασαφή έλεγχο που εφαρμόζεται στην τρίτη μεθοδολογία, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον και το λογισμικό του NEFCON

1.6 Περιγραφή της δομής της διπλωματικής

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα ενός συστήματος παραγωγής, περιγράφεται συνοπτικά το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η παρούσα διπλωματική και καταγράφεται η συνεισφορά της εργασίας. Επίσης, περιγράφεται συνοπτικά το σύστημα παραγωγής που προσομοιώνεται, καθώς και οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για την επίλυση του προβλήματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση όλων των εμπλεκόμενων στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρητικών εννοιών (νευρωνικά δίκτυα, ασαφής λογική, νεύρο-ασαφή συστήματα) καθώς και του λογισμικού που χρησιμοποιείται σε μία από τις

ανεπτυγμένες μεθοδολογίες για τον έλεγχο του συστήματος (νεύρο-ασαφές σύστημα NEFCON [4]).

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η έρευνα [1], [3] που αποτέλεσε τη βάση, στην οποία στηρίχθηκαν οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν και παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση και περιγραφή των μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος, με την παρουσίαση όλων των παραμέτρων του συστήματος .

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και γίνεται η απαραίτητη ανάλυση, σύγκριση και ερμηνεία αυτών.

Τέλος, στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας, απεικονίζονται τα συστήματα που σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον της Simulink, και πραγματοποιείται μία συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του προσομοιωτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Τα ασαφή συστήματα χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ πεδίο βιομηχανικών και επιστημονικών εφαρμογών. Μία ιδιαίτερα δημοφιλής πρακτική για την αντιμετώπιση της έλλειψης ικανότητας μάθησης των ασαφών συστημάτων, είναι ο συνδυασμός με τεχνικές μάθησης που προέρχονται από τα νευρωνικά δίκτυα. Αυτές τους τις προσεγγίσεις τις ονομάζουμε συνήθως νεύρο-ασαφή συστήματα.

Ο όρος *νεύρο-ασαφή συστήματα* [7] αναφέρεται στο συνδυασμό νευρωνικών δικτύων και ασαφών συστημάτων. Παρόλα αυτά, δεν είναι απολύτως ξεκάθαρο τι είδους συστήματα εμπεριέχονται στον όρο αυτό. Στη σχετική βιβλιογραφία [4], [6], [7] αναφέρονται όροι όπως: *νεύρο-ασαφή*, *νευρωνικά ασαφή*, ή *ασαφή-νεύρο συστήματα*. Στην συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιούμε τον όρο *νεύρο-ασαφή συστήματα* που είναι ευρύτερης αποδοχής.

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση του μοντέλου που σχεδιάσαμε και προσομοιώσαμε, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε σε κάποιες έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία της εργασίας.

2.2 Νευρωνικά Δίκτυα

2.2.1 Εισαγωγή

Η καταγωγή και προέλευση των *Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων* (Artificial Neural Networks) πηγάζει από τη φυσιολογία του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος, το οποίο αποτελείται από τον εγκέφαλο, τον νωτιαίο μυελό και το περιφερειακό νευρικό σύστημα με τις απολήξεις του (αισθητήριο νευρικό σύστημα). Η δομή και η λειτουργία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων πηγάζει από τις αντίστοιχες στοιχειώδεις λειτουργίες και δομές των βιολογικών νευρώνων. Αυτά τα στοιχεία, κυρίως οι *νευρώνες* (neurons)

και οι συναπτικές συνδέσεις, οργανώνονται με τέτοιο τρόπο που μπορεί (ή όχι) να σχετίζεται με την ανατομία του εγκεφάλου. Παρά την υπεραπλουστευμένη ομοιότητα, τα τεχνητά νευρώνα δίκτυα διαθέτουν έναν μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών του εγκεφάλου. Για παράδειγμα, μπορούν να μάθουν από την εμπειρία, να γενικεύσουν από προηγούμενα παραδείγματα και να αποσπάσουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά από εισόδους που περιέχουν πολλά και ετερογενή δεδομένα.

2.2.2 Μάθηση

Η μάθηση έχει την έννοια της εύρεσης αποδεκτών τιμών για τις παραμέτρους (βάρη), με τη χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας που εμπεριέχει κάποιο δείγμα πληροφορίας. Η διαδικασία καθοδηγείται από ένα μέτρο του σφάλματος το οποίο και αξιολογεί τον τρέχοντα βαθμό απόδοσης .

Η μάθηση ελάχιστα συνδέεται με την διαδικασία μάθησης όπως αυτή συμβαίνει στα ανθρώπινα όντα. Για μεγαλύτερη ακρίβεια θα πρέπει κανείς να μιλάει για *στατιστική μάθηση* (statistical learning) ή *μάθηση μέσω πληροφορίας* (learn from data) [4]. Είναι επίσης αρκετά διαδεδομένος ο όρος *επιβλέπουσα μάθηση* (supervised learning) [4], διότι υπάρχει ένας εικονικός επιβλέπων ή εκπαιδευτής ο οποίος και καθορίζει το σφάλμα στην έξοδο του συστήματος.

Υπάρχουν και άλλοι όροι που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τρόπο υπολογισμού παραμέτρων. Είναι, ίσως, πιο κατάλληλο να λέγεται ότι το νευρωνικό δίκτυο *εκπαιδεύεται* (trained) και κατά συνέπεια ένας αλγόριθμος νευρωνικού δικτύου ονομάζεται *εκπαιδευτικός αλγόριθμος* (training algorithm) [4].

Από εδώ και στο εξής με τον όρο *μάθηση*, θα εννοούμε τον επαναληπτικό εκπαιδευτικό αλγόριθμο που προσαρμόζει τις παραμέτρους ενός μοντέλου, μέσω της επεξεργασίας κάποιας πληροφορίας (πρόβλημα μάθησης). Θα πρέπει να διαχωριστούν δύο τρόποι επιβλέπουσας μάθησης :

Η *απλή επιβλέπουσα μάθηση* (plain supervised learning) έχει ως στόχο τη μείωση της διαφοράς ανάμεσα στην πραγματική και την επιθυμητή έξοδο και χρειάζεται ένα

πρότυπο πρόβλημα μάθησης, δηλαδή ένα σύνολο στοιχείων, όπου για κάθε είσοδο δίδεται και μία έξοδος [4].

Η *εξαναγκαστική μάθηση* (reinforcement learning) έχει ως στόχο την παραγωγή εξόδου που θα έχει συγκεκριμένη, ορατή επιρροή σε ένα περιβάλλον και χρειάζεται ένα ελεύθερο πρόβλημα μάθησης, όπου δεν είναι γνωστή η έξοδος για κάποια δεδομένη είσοδο. Ένα εξωτερικό, εξαναγκαστικό σήμα υποδηλώνει εάν η επιθυμητή επιρροή συνέβη ή όχι [4].

2.2.3 Γενίκευση

Όταν ένα δίκτυο έχει εκπαιδευτεί, η απόκριση του μπορεί να είναι ανεπηρέαστη από μεταβολές των εισόδων του. Αυτή η ικανότητα, να είναι ανεπηρέαστο στο θόρυβο και στην παραμόρφωση, είναι σημαντική στην αναγνώριση μοντέλων σε πραγματικό περιβάλλον. Εφόσον ένα δίκτυο έχει εκπαιδευτεί, η γενίκευση είναι αυτόματη και όχι ως αποτέλεσμα ανθρώπινης γνώσης που εμπεριέχεται στη δομή ενός προγράμματος υπολογιστή.

2.2.4 Αφαιρετική Ικανότητα

Μερικά νευρωνικά δίκτυα έχουν αφαιρετική ικανότητα για ορισμένα χαρακτηριστικά του συνόλου εισόδου, ως άμεση συνέπεια της ικανότητας τους για γενίκευση. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο μπορεί να εκπαιδευτεί σε μία ακολουθία παραμορφωμένων εκδοχών του γράμματος Α. Μετά από ικανή εκπαίδευση, η εφαρμογή στην είσοδο μιας έκδοσης τέτοιου είδους Α, θα αναγκάσει το δίκτυο να δώσει ένα Α τέλειας μορφής.

2.2.4 Δομή

Τα νευρωνικά δίκτυα αντλούν την υπολογιστική τους ισχύ, πρώτον από τη δομή της παράλληλης κατανομής και επεξεργασίας της πληροφορίας και δεύτερον από την ικανότητα που έχουν να μαθαίνουν και να γενικεύουν. Αυτές οι ικανότητες επεξεργασίας της πληροφορίας παρέχουν στα νευρωνικά δίκτυα τη δυνατότητα να επιλύουν πολύπλοκα προβλήματα που συνήθως είναι δύσκολο να λυθούν. Όλα τα νευρωνικά δίκτυα, είτε υλοποιούνται σε παράλληλο υλικό (hardware) είτε σε προσομοιώσεις μέσω

ηλεκτρονικού υπολογιστή, αποτελούνται από ένα σύνολο απλών στοιχείων τα οποία εργάζονται μαζί στη λύση προβλημάτων.

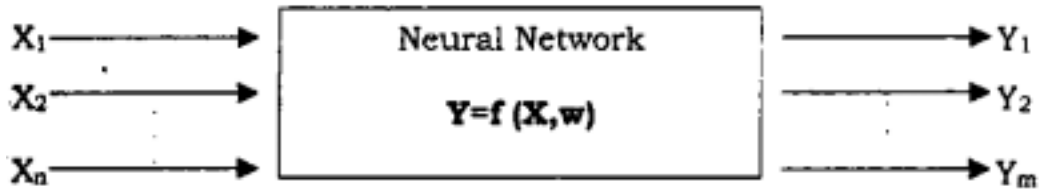
Οι νευρώνες, αποτελούν το μέρος του νευρωνικού δικτύου όπου πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί. Ένας νευρώνας μπορεί να έχει μία σύνδεση εισόδου, όπως στην περίπτωση που ο νευρώνας είναι στο επίπεδο εισόδου και λαμβάνει μόνο μία τιμή από την αντίστοιχη συνιστώσα του μοντέλου εισόδου, ή μπορεί να έχει ένα σύνολο σταθμισμένων συνδέσεων, όπως στην περίπτωση που ο νευρώνας είναι μέρος ενός επιπέδου νευρώνων στο οποίο ο κάθε νευρώνας δέχεται ως είσοδο τις εξόδους όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου. Κάθε νευρώνας συλλέγει την πληροφορία που του έχει σταλεί στις συνδέσεις και παράγει ένα σήμα εξόδου.

Υπάρχουν δύο ιδιότητες που θα πρέπει να έχουν οι νευρώνες. Πρώτον, οι νευρώνες χρειάζονται μόνο τοπική πληροφορία. Όλη η αναγκαία πληροφορία για έναν νευρώνα ώστε να παράγει το σήμα εξόδου βρίσκεται στις εισόδους του νευρώνα. Καμιά άλλη πληροφορία σχετικά με άλλες τιμές του δικτύου δεν απαιτείται.

Δεύτερον, οι νευρώνες παράγουν μία μόνο έξοδο. Αυτή η μοναδική έξοδος διαβιβάζεται από τις συνδέσεις του νευρώνα που την εκπέμπει στους άλλους νευρώνες δέκτες, ή μπορεί να αποτελεί την έξοδο του δικτύου.

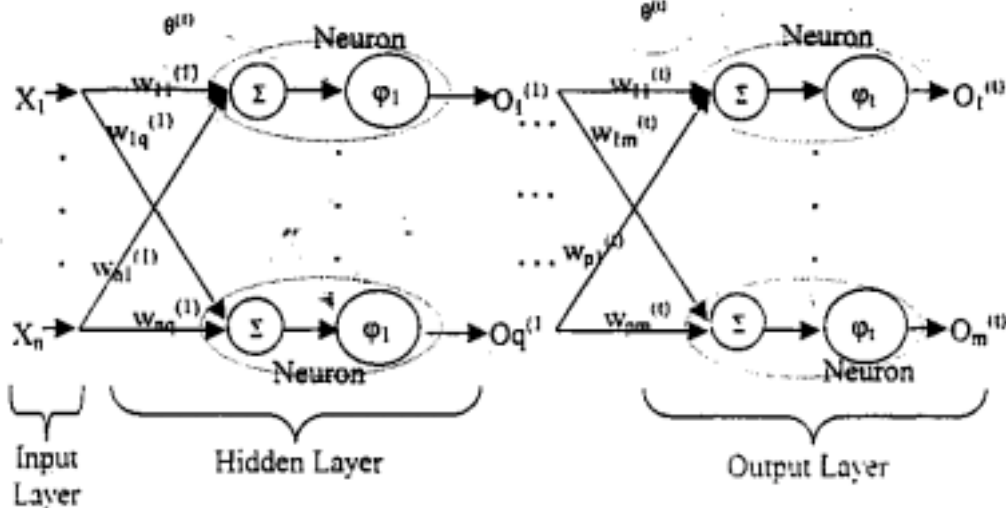
Αυτές οι δύο ιδιότητες επιτρέπουν στα νευρωνικά δίκτυα να λειτουργούν παράλληλα. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί που επιτρέπουν τον υπολογισμό της εξόδου ενός νευρώνα. Η έξοδος του νευρώνα (Σχήμα 2.1), y_j , είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης, των εξόδων του προηγούμενου επιπέδου ($F_x = X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$) και των βαρών (weights) από το επίπεδο F_x στο νευρώνα y_j ($W_j = (w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj})$) δηλαδή:

$$y_j = F(X, W_j)$$



Σχήμα 2.1 : Μοντέλο Νευρωνικών Δικτύων [5]

Ένα νευρωνικό δίκτυο (Σχήμα 2.2) αποτελείται από ένα σύνολο νευρώνων δομημένων σε διαφορετικά επίπεδα (layers). Το πρώτο επίπεδο ονομάζεται επίπεδο εισόδου (input layer) και το τελευταίο επίπεδο εξόδου (output layer). Όλα τα υπόλοιπα επίπεδα ονομάζονται ενδιάμεσα επίπεδα (hidden layers). Κάθε επίπεδο αποτελείται από νευρώνες, όπου ο κάθε νευρώνας συνδέεται με νευρώνες του επόμενου επιπέδου με διαφορετικά όμως βάρη.



Σχήμα 2.2: Νευρωνικό Δίκτυο Πρόσθιας Τροφοδότησης [5]

2.2.5 Τρόπος Λειτουργίας

Αναφορικά με τον τρόπο επίτευξης της βέλτιστης απόδοσης ενός νευρωνικού δικτύου, αυτός σχετίζεται άμεσα με την έννοια των βαρών που συνδέουν τους νευρώνες μεταξύ των διαφόρων επιπέδων. Ουσιαστικά, οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν, για να λειτουργεί το νευρωνικό δίκτυο με τον επιθυμητό τρόπο, είναι οι τιμές όλων των βαρών του δικτύου. Η επιθυμητή λειτουργία του νευρωνικού δικτύου, που θα οδηγήσει και στον κατάλληλο προσδιορισμό των βαρών, εκφράζεται με χαρακτηριστικά ζεύγη εισόδων-εξόδων, τα οποία ονομάζονται *παραδείγματα* (examples). Πράγματι, το νευρωνικό δίκτυο που δημιουργείται κάθε φορά, επιδιώκεται να δίνει κάποιες επιθυμητές εξόδους όταν εφαρμόζονται κάποιες συγκεκριμένες εισοδοί. Η διαδικασία μέσω της οποίας προσεγγίζεται η βέλτιστη λειτουργία ονομάζεται *εκπαίδευση* (training) του νευρωνικού δικτύου και η οποία στην ουσία μεταβάλλει τις τιμές των βαρών του δικτύου κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, «περνούν» ένα-ένα ή και όλα μαζί ανάλογα με τη διαδικασία που ακολουθείται, τα παραδείγματα και για κάθε ένα υπολογίζεται το σφάλμα εκτίμησης του μοντέλου. Αφού υπολογιστεί το σφάλμα, εφαρμόζεται κάποιος αλγόριθμος ελαχιστοποίησης μέσω του οποίου καθορίζεται ποιες μεταβολές πρέπει να γίνουν στις τιμές των βαρών του νευρωνικού δικτύου ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα. Πρέπει να επισημανθεί ότι συνήθως το σύνολο των ζευγαριών εισόδων-εξόδων του δείγματος «περνάει» περισσότερες από μία φορές από το νευρωνικό δίκτυο. Το πλήθος των επαναλήψεων που θα εφαρμοστεί το δείγμα με τα παραδείγματα στο δίκτυο φέρει την ονομασία *epochs*. Η διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου που περιγράφηκε παραπάνω, φέρει την ονομασία *Όπισθεν-Ανάδραση* (Back-Propagation) [6]. Η ονομασία αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι σε κάθε εφαρμογή ενός από τα χαρακτηριστικά ζεύγη εισόδων-εξόδων, υπολογίζεται στο τέλος του νευρωνικού δικτύου το σφάλμα της εκτίμησης των εξόδων και στη συνέχεια υπάρχει μία ανάδραση του σφάλματος προς την αρχή του δικτύου για την προσαρμογή των βαρών του.

2.3 Ασαφής Λογική

2.3.1 Εισαγωγή

Η *Ασαφής Λογική* (Fuzzy Logic) [8] αποτελεί σήμερα πλέον μία αναγνωρισμένη επιστημονική θεωρία, κυρίως πρακτικού χαρακτήρα, με προσανατολισμό στην επίλυση ή τουλάχιστον στην επίτευξη καλύτερων λύσεων από αυτές των υπόλοιπων επιστημών, ικανή για την αντιμετώπιση προβλημάτων με υψηλό βαθμό αβεβαιότητας και ύπαρξη ενός μη πιθανολογικών πλαισίου εφαρμογής. Η θεωρία, η τεχνολογία και οι εφαρμογές της ασαφούς λογικής έχουν σημειώσει τα τελευταία χρόνια ταχύτατη, τόσο οριζόντια όσο και κάθετη ανάπτυξη και έχουν καταστεί αξιόπιστο όσο και εύχρηστο εργαλείο σε διάφορους χώρους έρευνας και εφαρμογής.

Η ασαφής λογική μπορεί να ιδωθεί υπό δύο διαφορετικές οπτικές. Στην τυπική λογική, είναι ένα λογικό σύστημα που αποτελεί ειδική προέκταση της πολύ-τιμής λογικής (multi-valued). Με την διευρυμένη οπτική, που κυριαρχεί στις περισσότερες εφαρμογές σήμερα, η ασαφής λογική είναι συνώνυμη με τη θεωρία των ασαφών συνόλων, θεωρία η οποία σχετίζεται με ομάδες αντικειμένων όχι επακριβώς καθορισμένων, στα οποία η συμμετοχή σε σύνολα είναι ζήτημα βαθμού. Αυτό που είναι σημαντικό να αναγνωρίσει κανείς είναι ότι, έστω και με τη στενή της έννοια, η ασαφής λογική είναι πολύ διαφορετική τόσο σε νόημα όσο και σε δομική μορφή από τα παραδοσιακά πολυμεταβλητά λογικά συστήματα.

Στην πραγματικότητα η ασαφής λογική μπορεί να θεωρηθεί ως μία μεθοδολογία διαχείρισης και υπολογισμού δεδομένων ποιοτικής και ποσοτικής φύσης με γλωσσικές έννοιες-λέξεις. Παρόλο που οι λέξεις είναι περισσότερο ασαφείς από τους αριθμούς, η χρήση τους είναι πιο κοντά στην ανθρώπινη λογική και αποτελούν μοναδική δυνατότητα αναπαράστασης και επεξεργασίας σε πάρα πολλά προβλήματα. Επιπλέον η χρήση λέξεων σε υπολογιστικά συστήματα, επιτρέπει την ύπαρξη κάποιας ανακρίβειας, ενώ μειώνεται το υπολογιστικό κόστος της επίλυσης του προβλήματος.

2.3.2 Ασαφή σύνολα και γλωσσικές μεταβλητές

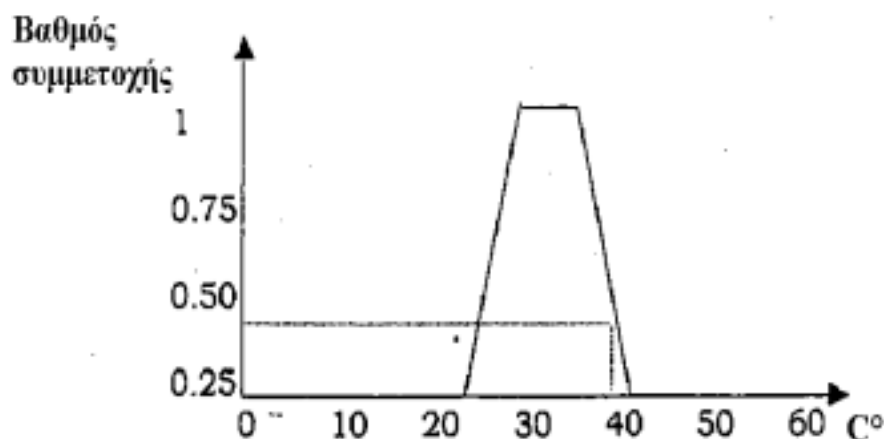
Η θεωρία της ασαφούς λογικής στηρίζεται στη θεωρία των *ασαφών συνόλων* [8], η οποία αποτελεί μία μαθηματική θεωρία μοντελοποίησης της αβεβαιότητας. Η ασάφεια εκφράζει μία μορφή αβεβαιότητας που σχετίζεται με την έλλειψη αυστηρού, καθολικά και απόλυτα αποδεκτού ορισμού μιας έννοιας ή με την αμφιβολία σχετικά με το περιεχόμενο της. Αβεβαιότητα μπορεί επίσης να προέλθει και από την ποιότητα της πληροφορίας που εξαρτάται από την ικανότητα λήψης ή ανάκτησης και αξιολόγησης της. Η αβεβαιότητα εκδηλώνεται ως *ασάφεια* η οποία διαφοροποιείται από την *τυχειότητα*. Ασάφεια και τυχειότητα αποτελούν διαφορετικές μορφές της αβεβαιότητας. Η ασάφεια εκδηλώνεται κυρίως με τον τρόπο εξήγησης των φαινομένων ή γεγονότων μέσω της φυσικής γλώσσας, ενώ η τυχειότητα βασίζεται στην ενδεχόμενη εμφάνιση ενός φαινομένου κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

Στην Αριστοτέλεια λογική ένα σύνολο έχει αυστηρώς καθορισμένα όρια. Λόγω της εμφάνισης των ασαφών συνόλων ένα τέτοιο σύνολο αποκαλείται *συμβατικό* (crisp). Μία μεταβλητή που αποτελεί δεδομένο έχει μία τιμή συμμετοχής είτε αποτελεί, είτε δεν αποτελεί μέλος του συνόλου. Η ασαφής λογική αποτελεί έναν αρκετά δυναμικό τρόπο διαχείρισης των δεδομένων. Η τιμή ενός δεδομένου μπορεί να έχει βαθμό συγγένειας με ένα ασαφές σύνολο που είναι συνεχής και κυμαίνεται από το μηδέν (0) (δεν αποτελεί μέρος του συνόλου) έως το ένα (1) (αποτελεί πλήρως μέρος του συνόλου). Εκεί που η Αριστοτέλεια λογική απαιτεί για τον ορισμό ενός συνόλου τα άκρα εύρους του πεδίου τιμών, η ασαφής λογική χρειάζεται μία περιγραφική συνάρτηση που αποκαλείται *συνάρτηση συγγένειας ή συμμετοχής* (membership function) [8] ώστε να καθορίσει τα όρια του ασαφούς συνόλου. Το ασαφές σύνολο καθίσταται με αυτόν τον τρόπο το μέσο ανάθεσης ακριβούς μαθηματικού νοήματος σε ένα οποιοδήποτε γλωσσικό όρο.

Το σχήμα 2.3 απεικονίζει μία συνάρτηση συμμετοχής για το ασαφές σύνολο «ζεστός». Ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει όλες τις δυνατές τιμές της μεταβλητής που χρησιμοποιείται ως δεδομένο (σε αυτήν την περίπτωση τη θερμοκρασία). Ο άξονας των τεταγμένων αντιπροσωπεύει το βαθμό συμμετοχής (το βαθμό δηλαδή για τον οποίο θα ισχυρίζονταν κάποιος ότι η δήλωση «κάνει ζέστη» είναι

αληθής). Στον κατακόρυφο άξονα, το μηδέν (0) αντιπροσωπεύει το (απόλυτο) ψεύδος και το ένα (1) αντιπροσωπεύει την (απόλυτη) αλήθεια.

Καθώς η θερμοκρασία στον οριζόντιο άξονα μεταβάλλεται από τους 35 στους 42 βαθμούς Κελσίου, ο γλωσσικός όρος «ζεστός» μεταπίπτει από το να είναι αληθής (βαθμός συμμετοχής 1) στο να είναι ψευδής (βαθμός συμμετοχής 0). Στους 40 βαθμούς η δήλωση «κάνει ζέστη» είναι αληθής κατά ένα ποσοστό της τάξης του 25% που είναι πλησιέστερα στο ψεύδος παρά την αλήθεια.



Σχήμα 2.3 : Συνάρτηση Συμμετοχής [5]

Μία *ασαφής μεταβλητή* (fuzzy variable) [8], όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία, είναι μία μεταβλητή η οποία μπορεί να πάρει πολλές τιμές όπως μικρή, μέτρια, μεγάλη. Οι τιμές αυτές περιγράφονται με τη βοήθεια ασαφών συνόλων. Γενικότερα, οι τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής μπορεί να είναι προτάσεις σε κάποια προδιαγεγραμμένη γλώσσα (π.χ. με συνδυασμό ασαφών μεταβλητών και γλωσσικών προθεμάτων). Σε αυτήν την περίπτωση η μεταβλητή καλείται *γλωσσική μεταβλητή* (linguistic variable). Στο παράδειγμα με τη θερμοκρασία άλλες τιμές που μπορεί να πάρει είναι πολύ μεγάλη, αρκετά μεγάλη, σχετικά μικρή κλπ.

Συνήθως τα ασαφή σύνολα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μιας ασαφούς μεταβλητής επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλες τις δυνατές

τιμές δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων. Τα όρια αυτών των συνόλων είναι δυνατόν να επικαλύπτονται.

2.3.3 Ασαφείς Κανόνες

Εφόσον υπάρχει η δυνατότητα να ανατεθούν αριθμητικές τιμές σε γλωσσικές εκφράσεις, προκύπτει κατ' επέκταση ότι τέτοιου είδους εκφράσεις μπορούν να συνδυαστούν σε προτάσεις και να αξιολογηθούν μαθηματικά. Το σημαντικότερο στοιχείο ασαφούς λογικής είναι ότι μπορεί με αυτόν τον τρόπο να συνδέει το σύνολο των δεδομένων εισόδου με το σύνολο εξαγομένων αποτελεσμάτων. Ο βασικός μηχανισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται κάτι τέτοιο είναι μία λίστα από προτάσεις που αποκαλούνται κανόνες. Όλοι οι κανόνες αξιολογούνται, ενώ η σειρά αξιολόγησης τους δεν έχει σημασία στην όλη διαδικασία. Οι κανόνες από μόνοι τους είναι χρήσιμοι διότι αναφέρονται σε γλωσσικές μεταβλητές και στις γλωσσικές τιμές που τις συνοδεύουν. Είναι φανερό ότι πριν τη δημιουργία ενός συστήματος που ερμηνεύει κανόνες, πρέπει να καθοριστούν όλοι οι όροι που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως γλωσσικές μεταβλητές ή γλωσσικές τιμές.

Η εξάρτηση μιας γλωσσικής μεταβλητής από μία άλλη (ανεξάρτητη) γλωσσική μεταβλητή περιγράφεται από μία σχέση που ονομάζεται *ασαφής εξαρτημένη σχέση* (fuzzy conditional statement) [8]. Η σχέση αυτή έχει τη μορφή:

Εάν Α τότε Β, όπου Α και Β είναι εκφράσεις με ασαφές περιεχόμενο.

Για παράδειγμα:

Εάν «x είναι μικρό» τότε «ψ είναι πολύ μεγάλο»

Εάν «η θερμοκρασία είναι χαμηλή» και «η πίεση είναι χαμηλή»

τότε «άνοιξε πολύ τον λέβητα»

Ο τελευταίος κανόνας περιέχει δύο δηλώσεις που προηγούνται (antecedent) και μία δήλωση που έπεται (consequent). Κάθε μία από τις δηλώσεις που προηγούνται, μπορεί να αντικατασταθεί από μία αριθμητική τιμή, αντιπαραβάλλοντας τις τρέχουσες

τιμές των εισαγόμενων δεδομένων με τις συναρτήσεις συμμετοχής «υψηλή» και «χαμηλή» αντίστοιχα.

Η βασική ιδέα είναι ότι ένας κανόνας γραμμένος σε απλή, συνηθισμένη γλώσσα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μία ισοδύναμη μαθηματική έκφραση. Όλα τα ασαφή συστήματα βασίζονται τη λειτουργία τους σε μία σειρά τέτοιου είδους λογικών κανόνων. Οι κανόνες καθορίζονται έτσι, ώστε το σύστημα να μπορεί να μετατρέπει οποιαδήποτε εισερχόμενη τιμή σε κάποιο αποτέλεσμα, καλύπτοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς δεδομένων αποτελεσμάτων.

Μία ή περισσότερες ασαφείς εξαρτημένες σχέσεις μπορούν να συνδυασθούν (η μία μέσα στην άλλη) ώστε να σχηματισθούν μία σύνθετη εξαρτημένη σχέση της μορφής:

Εάν A τότε (εάν B τότε Γ)

Δύο ή παραπάνω ασαφείς εξαρτημένες σχέσεις μπορούν να συνδεθούν με το συνδετικό «είτε» ώστε να σχηματίσουν έναν ασαφή αλγόριθμο (fuzzy algorithm) της μορφής:

Εάν A τότε B εάν Γ τότε Δ είτε...

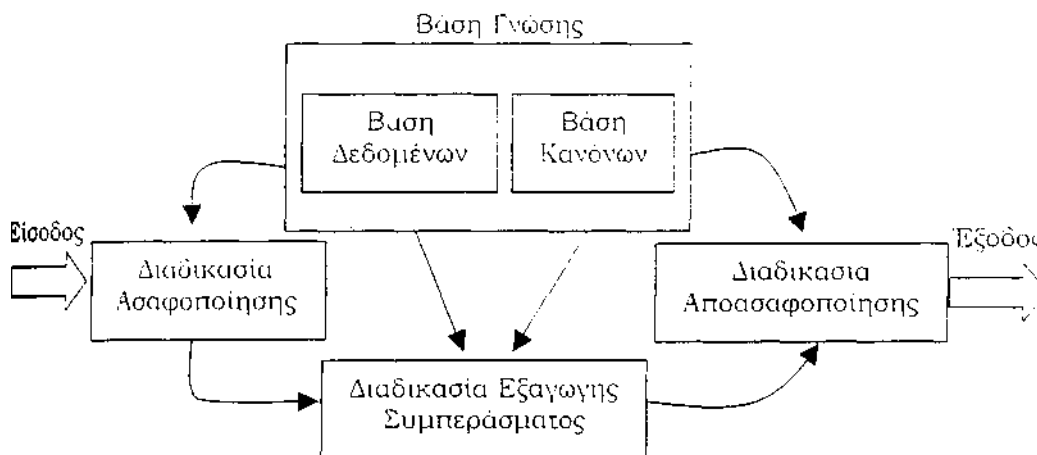
Από πρακτική άποψη η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και γενικότερα η αξιοπιστία των ασαφών συστημάτων είναι συνάρτηση των ίδιων των κανόνων τους. Σχεδόν όλα τα συστήματα που λειτουργούν με ασαφή λογική και κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά, βασίζονται τη λειτουργία τους σε κανόνες που καθορίζουν εμπειρογνώμονες που γνωρίζουν τις επιθυμητές αποκρίσεις του κάθε συστήματος.

2.3.4 Σύστημα Εξαγωγής Συμπεράσματος (Inference Mechanism)

Όλες οι έννοιες οι οποίες αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες (ασαφή σύνολα, γλωσσικές μεταβλητές, ασαφείς κανόνες) μπορούν να συγκερασθούν για τη δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων υπολογισμού [10]. Τα συστήματα αυτά ουσιαστικά αποτελούν συστήματα εξαγωγής συμπεράσματος. Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος βασιζόμενο στις αρχές της ασαφούς λογικής (σχήμα 2.4) είναι:

- Η Βάση Γνώσης
- Η Διαδικασία Ασαφοποίησης (fuzzification)
- Η Διαδικασία Εξαγωγής Συμπεράσματος (ή Μηχανισμός Απόφασης)
- Η Διαδικασία Απο-ασαφοποίησης (defuzzification)

Η βάση γνώσης περιλαμβάνει τη βάση δεδομένων, δηλαδή ένα δείγμα τιμών για τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στο υπό εξέταση πρόβλημα και τη βάση κανόνων, η οποία αποτελείται από προκαθορισμένους από εμπειρογνώμονες ασαφείς κανόνες.



Σχήμα 2.4: Σύστημα Εξαγωγής Συμπεράσματος

Η διαδικασία της ασαφοποίησης αφορά τις μεταβλητές εισόδου του συστήματος. Κατά τη διαδικασία αυτή, κλασσικά (crisp) σύνολα μετατρέπονται σε ασαφή ή αυξάνεται ο βαθμός ασάφειας ασαφών συνόλων. Η ασαφοποίηση μεμονωμένων στοιχείων χρησιμεύει στη δημιουργία ασαφών συνόλων από απλά στοιχεία και η ασαφοποίηση κλασσικών συνόλων βοηθά στον ορισμό γλωσσικών προθεμάτων. Η αναπαράσταση των γλωσσικών μεταβλητών και των τιμών που αυτές παίρνουν, ανάγεται στο πρόβλημα της

διαμέρισης του πεδίου ορισμού της αντίστοιχης ασαφούς μεταβλητής. Η διαμέριση πρέπει να καλύπτει ολόκληρο το σύνολο τιμών της μεταβλητής και να μην είναι τυχαία, αλλά να ανταποκρίνεται στην πραγματική συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε μετάβαση της μεταβλητής από μία γλωσσική τιμή σε μία άλλη πρέπει να αντικατοπτρίζει μία πραγματική αλλαγή στη συμπεριφορά του συστήματος. Ανάλογα με το πόσο ευαίσθητο πρέπει να είναι το ασαφές σύστημα στις οιοσδήποτε μεταπτώσεις του μεγέθους που έχει μοντελοποιηθεί με ασαφή λογική, καθορίζονται και τα επίπεδα διαμέρισης της αντίστοιχης μεταβλητής. Εκεί που ενδιαφέρει η ακρίβεια να είναι μεγάλη, λαμβάνονται περισσότερα επίπεδα διαμέρισης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για περιοχές όπου δεν ενδιαφέρει η ακρίβεια των τιμών. Επιπλέον κατά τη διαμέριση του πεδίου ορισμού πρέπει να υπάρχει μία αλληλοεπικάλυψη των γλωσσικών τιμών της μεταβλητής, τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη.

Η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος σχετίζεται άμεσα με την έννοια των *ασαφών σχέσεων συνεπαγωγής* (fuzzy implication statements) [10]. Μία τέτοια σχέση περιγράφει τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες γλωσσικές μεταβλητές. Οι σχέσεις ανάμεσα στις γλωσσικές μεταβλητές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε οποιοδήποτε σύστημα ασαφούς λογικής. Ορισμένες σχέσεις αφορούν στοιχεία που ανήκουν στο ίδιο σύνολο: ένα στοιχείο είναι μεγαλύτερο από κάποιο άλλο, ένα γεγονός πραγματοποιήθηκε νωρίτερα από κάποιο άλλο, ένα στοιχείο μοιάζει με κάποιο άλλο κλπ. Άλλες σχέσεις αφορούν διαφορετικά σύνολα: το μέγεθος ενός αντικειμένου είναι μεγάλο και ο ρυθμός μεταβολής του είναι θετικός, η τετμημένη x ενός μεγέθους είναι μεγάλη και η τεταγμένη του y είναι μικρή κλπ.

Υποθέτοντας δύο ασαφή σύνολα A και B υποσύνολα των συνόλων X και Y αντίστοιχα, μία ασαφής εξαρτημένη σχέση της μορφής «Εάν A τότε B » ορίζεται [10] ως εξής:

$$(Εάν A τότε B) \text{ ισοδυναμεί με } A \rightarrow B = A * B$$

Όπου $A * B$ δηλώνει τη σχέση $A \rightarrow B$ στο καρτεσιανό γινόμενο των δύο συνόλων X και Y , δηλαδή $X * Y = \{(x,y)\}$.

Η συνάρτηση συμμετοχής $\mu_R(x, y)$ που ορίζει τη σχέση συνεπαγωγής μπορεί να οριστεί από τις επιμέρους συναρτήσεις $\mu_A(x)$ και $\mu_B(y)$ με διάφορους τρόπους. Οι τρόποι αυτοί είναι:

- 1) Η συνεπαγωγή Max-Min

$$\mu_R(x, y) = (\mu_A(x) \cap \mu_B(y)) \cup (1 - \mu_A(x)) \quad \text{ή} \quad \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cap \mu_B(y)$$

- 2) Η συνεπαγωγή του VSS

$$\mu_R(x, y) = (1 - \mu_A(x)) \cup \mu_B(y)$$

- 3) Η συνεπαγωγή βασισμένη στη λογική των πολλαπλών τιμών

$$\mu_R(x, y) = 1 \cap (1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$$

- 4) Η συνεπαγωγή Max Product

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \bullet \mu_B(y)$$

Η διαδικασία αποασαφοποίησης αφορά τις μεταβλητές εξόδου. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τα δεδομένα για ένα ασαφές σύνολο σε μία συγκεκριμένη αριθμητική τιμή. Για τη διαδικασία αυτή έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, οι σπουδαιότερες από τις οποίες είναι:

- 1) Η Μέθοδος του Μεγίστου (Max) Επιλέγεται η τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο του συνόλου εξόδου με τη μεγαλύτερη τιμή.

- 2) Η Μέθοδος του Μέσου Όρου των Μεγίστων (Mean of Maximum-MOM) Επιλέγεται ως τελική τιμή εξόδου ο μέσος όρος των τιμών των σημείων που παρουσιάζουν μέγιστο στο σύνολο εξόδου. Ορίζεται ως εξής; $z = \sum_{i=1}^L \frac{W_i}{L}$

όπου W_i η τιμή στην οποία η συνάρτηση συμμετοχής έχει τη μέγιστη τιμή και L το πλήθος τιμών της γλωσσικής μεταβλητής.

- 3) Η Μέθοδος του Κέντρου Βάρους Πρόκειται για μία ακριβή υπολογιστικά μέθοδο που επιλέγει ως τιμή την τιμή του σημείου που χωρίζει το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη σε δύο ίσα μέρη. Ορίζεται ως εξής:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_z(W_i) * W_i}{\sum_{i=1}^N \mu_z(W_i)}$$

Η μέθοδος αυτή δίνει θεωρητικά καλύτερα αποτελέσματα από τις δύο άλλες. Η MOM θεωρείται πιο αποτελεσματική σε μεταβατικές καταστάσεις ενώ η μέθοδος του Κέντρου Βάρους θεωρείται καλύτερη σε σταθερές καταστάσεις [10].

2.4 Νεύρο-Ασαφή συστήματα

2.4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, η βασική ιδέα σε ένα νεύρο-ασαφές σύστημα είναι να υπολογιστούν οι παράμετροι ενός ασαφούς συστήματος χρησιμοποιώντας τεχνικές μάθησης, οι οποίες εφαρμόζονται στα νευρωνικά δίκτυα.

Ένας σύνηθες τρόπος να εφαρμόσουμε έναν αλγόριθμο μάθησης σε ένα ασαφές σύστημα, είναι να το αναπαραστήσουμε με τη βοήθεια της αρχιτεκτονικής των νευρωνικών δικτύων, κάτι που δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολο. Σε αυτή την περίπτωση, ο αλγόριθμος μάθησης - όπως η μέθοδος Backpropagation [6] - χρησιμοποιείται για να εκπαιδεύσει το σύστημα. Παρόλα αυτά απαντώνται και ορισμένα προβλήματα. Συνήθως οι αλγόριθμοι μάθησης των νευρωνικών δικτύων είναι μέθοδοι μεγίστης καθόδου. Δεν μπορούν κατά συνέπεια να εφαρμοστούν απευθείας σε ένα ασαφές σύστημα γιατί οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την κατανόηση της διαδικασίας εξαγωγής συμπεράσματος συνήθως δεν είναι διαφορίσιμες. Υπάρχουν δύο λύσεις σε αυτό το πρόβλημα:

- A) αντικατάσταση των συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται στα ασαφή συστήματα (όπως οι min και max) με διαφορίσιμες συναρτήσεις ή
- B) μη χρησιμοποίηση νευρωνικών αλγόριθμων μάθησης μεγίστης καθόδου, αλλά κάποιας διαδικασίας που να ταιριάζει περισσότερο.

Τα μοντέρνα νεύρο-ασαφή συστήματα αναπαριστώνται ως *πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης* (multilayer feedforward neural networks) [6] (Σχήμα 2.2). Για παράδειγμα το νεύρο-ασαφές μοντέλο ANFIS [7] του Jang αναπτύσσει ένα ασαφές σύστημα τύπου Sugeno [9] με δομή δικτύου και εφαρμόζει μία μίξη της μεθόδου Backpropagation και της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων για να εκπαιδεύσει το σύστημα. Το ασαφές σύστημα τύπου Sugeno χρησιμοποιεί μόνο διαφορίσιμες συναρτήσεις οπότε στο ANFIS εφαρμόζουμε την λύση (A). Άλλα μοντέλα όπως τα NEFCON [4] (θα γίνει εκτενής αναφορά σε αυτό στη συνέχεια), NEFCLASS [6] και NEFPROX [6] χρησιμοποιούν την λύση (B) καθώς είναι ασαφή συστήματα τύπου Mamdani [10] και χρησιμοποιούν ειδικούς αλγόριθμους μάθησης.

2.4.2 Χαρακτηριστικά νεύρο-ασαφών συστημάτων

Για να τονιστούν τα κοινά χαρακτηριστικά των νεύρο-ασαφών συστημάτων και να δοθεί στον όρο νεύρο-ασαφές μία επαρκής ερμηνεία, περιορίζουμε τον όρο αυτό στα συστήματα που διαθέτουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 1) Ένα νεύρο-ασαφές σύστημα είναι ένα ασαφές σύστημα το οποίο εκπαιδεύεται από έναν αλγόριθμο μάθησης, ο οποίος συνήθως προέρχεται από τη θεωρία νευρωνικών δικτύων. Η (ευρετική) διαδικασία μάθησης λειτουργεί σε επίπεδο τοπικής πληροφορίας και προκαλεί μόνο τοπικές αλλαγές στο ασαφές σύστημα. Η διαδικασία μάθησης δεν είναι βασισμένη στη γνώση αλλά σε δεδομένα.
- 2) Ένα νεύρο-ασαφές σύστημα μπορεί πάντα (δηλαδή πριν, κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την εκπαίδευση) να ερμηνευτεί ως ένα σύστημα ασαφών κανόνων. Είναι δυνατόν να κατασκευασθεί τόσο με τη χρήση στοιχείων εκπαίδευσης από την αρχή, όσο και με βάση την ήδη υπάρχουσα γνώση σε μορφή ασαφών κανόνων.
- 3) Η διαδικασία μάθησης ενός νεύρο-ασαφούς συστήματος λαμβάνει υπόψιν της όλες τις εννοιολογικές παραμέτρους του ασαφούς συστήματος που περιέχει. Αυτό έχει σαν συνέπεια περιορισμούς στις δυνατές αλλαγές των παραμέτρων του συστήματος.

- 4) Ένα νεύρο-ασαφές σύστημα προσεγγίζει μία (άγνωστη) ν-διάστατη συνάρτηση που δίνεται μερικώς από τις πληροφορίες της εκπαίδευσης. Οι ασαφείς κανόνες που περιέχονται στο σύστημα, αντιπροσωπεύουν αμυδρά δείγματα και μπορούν να θεωρηθούν ως αμυδρά πρωτότυπα των στοιχείων εκπαίδευσης. Ένα νεύρο-ασαφές σύστημα δεν θα πρέπει να θεωρηθεί σαν ένα είδος (ασαφούς) έμπειρου συστήματος και δεν συνδέεται σε τίποτα με την στενή έννοια της ασαφούς λογικής .
- 5) Ένα νεύρο-ασαφές σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ειδικό, τριών επιπέδων, νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης. Οι μονάδες ενός τέτοιου δικτύου χρησιμοποιούν t-norms ή t-conorms αντί για συναρτήσεις ενεργοποίησης, που συνήθως χρησιμοποιούν τα νευρωνικά δίκτυα. Το πρώτο επίπεδο απεικονίζει τις μεταβλητές εισόδου, το μεσαίο (κρυμμένο) επίπεδο αντιπροσωπεύει τους ασαφείς κανόνες και το τρίτο επίπεδο τις μεταβλητές εξόδου. Τα ασαφή σύνολα συμπεριλαμβάνονται με τη μορφή των (ασαφών) συνδετικών βαρών.

Κάποια νεύρο-ασαφή συστήματα είναι δομημένα με περισσότερα των τριών επιπέδων και χρησιμοποιούν ασαφή σύνολα ως συναρτήσεις ενεργοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, είναι δυνατή η μετατροπή τους σε δίκτυα με αρχιτεκτονική τριών επιπέδων. Αυτή η μορφή ασαφούς συστήματος παρουσιάζει την ροή της πληροφορίας μέσα στο σύστημα καθώς και την παράλληλη επεξεργασία αυτής.

Η νεύρο-ασαφής τεχνική, χρησιμοποιείται για να προέλθει το ασαφές σύστημα από στοιχεία της εκπαίδευσης ή να το προσεγγίσουμε μέσω μάθησης από παραδείγματα. Η ακριβής ανάπτυξη ενός νεύρο-ασαφούς συστήματος δεν έχει και τόσο μεγάλη σημασία. Είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί ένα νευρωνικό δίκτυο για να μάθει κάποια από τα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος, ή να θεωρηθεί το ασαφές σύστημα σαν ένα ειδικό νευρωνικό δίκτυο και να εφαρμοστεί απευθείας σε αυτό ο αλγόριθμος μάθησης.

2.4.3 Το νεύρο-ασαφές σύστημα NEFCON

2.4.3.1 Γενικά

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται μία περιγραφή του υβριδικού νεύρο-ασαφούς συστήματος NEFCON [4], το οποίο έχει αναπτυχθεί για εφαρμογές ελέγχου και χρησιμοποιείται παρακάτω για το νεύρο-ασαφή έλεγχο συστημάτων παραγωγής.

Ένα πρόβλημα ελέγχου δεν μπορεί, συνήθως, να επιλυθεί με επιβλέπουσα μάθηση, διότι δεν υπάρχουν παραδείγματα στοιχείων εισόδου/εξόδου. Για να χρησιμοποιήσει επιβλέπουσα μάθηση ένας ελεγκτής (ή ένας ανθρώπινος χειριστής) πρέπει ήδη να υπάρχει και να μπορεί να ελέγξει το φυσικό σύστημα που μας ενδιαφέρει, οπότε και σε αυτήν την περίπτωση δεν θα υπήρχε η ανάγκη εύρεσης νέου ελεγκτή με τη διαδικασία μάθησης. Η πιο συνήθης κατάσταση, είναι ένα πρόβλημα ελέγχου το οποίο αναζητά λύση, οπότε και θα πρέπει να βρεθεί κάποιος ελεγκτής. Σε αυτήν τη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της εξαναγκαστικής μάθησης.

Μία συνήθης προσέγγιση στην εξαναγκαστική μάθηση, είναι η χρήση ενός προσαρμόσιμου κριτικού, ο οποίος μαθαίνει να προβλέπει το εξωτερικό εξαναγκαστικό σήμα (σήμα σφάλματος). Το σήμα αυτό συνήθως δεν παρέχει αρκετή πληροφορία, γιατί λόγω έλλειψης γνώσης για την σωστή τιμή εξόδου, δεν μπορεί να υπολογιστεί το συνεχές σφάλμα. Η ιδέα της συγκεκριμένης προσέγγισης, είναι η μη χρησιμοποίηση του προσαρμοστικού κριτικού αλλά η παροχή ενός σήματος σφάλματος το οποίο θα αποδίδει και περισσότερη πληροφορία.

Ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής χρησιμοποιεί μία ασαφή συνάρτηση σφάλματος για τη διαδικασία μάθησης. Το ασαφές σφάλμα συλλέγεται με λεκτική περιγραφή των επιθυμητών και μη καταστάσεων του συστήματος. Η ιδέα βασίζεται στο ότι υπάρχει συνήθως η αίσθηση της «καλής» ή της «κακής» κατάστασης του συστήματος, εφόσον ο χρήστης έχει στο μυαλό του κάποια κατάσταση-στόχο και με βάση αυτή μπορεί να κρίνει.

Το σύστημα που παρουσιάζεται εδώ ονομάζεται NEFCON, από τα αρχικά των λέξεων NEuro-Fuzzy CONtroller. Ο αλγόριθμος μάθησης που χρησιμοποιεί το NEFCON είναι σε θέση να μάθει τόσο ασαφή σύνολα όσο και ασαφείς κανόνες [4]. Πρόκειται για μία προέκταση νεύρο-ασαφών προσεγγίσεων όπως είναι το GARIC [6] το οποίο επίσης χρησιμοποιεί εξαναγκαστική μάθηση αλλά χρειάζεται μία εκ των προτέρων ορισμένη βάση κανόνων. Ένας άλλος τρόπος για να μάθει ένα νεύρο-ασαφές σύστημα κανόνες, είναι η χρήση επιβλέπουσας μάθησης βασισμένη σε δείγματα στοιχείων εισόδου / εξόδου (π.χ FuNe, Fuzzy RuleNet, NEFCLASS ή NEFPROX [6]).

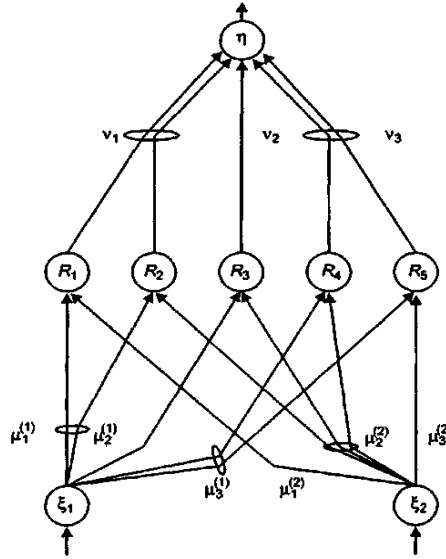
Η βασική ιδέα στο NEFCON, είναι η χρήση όσο το δυνατόν περισσότερης προγενέστερης γνώσης με τη χρησιμοποίηση κανόνων που είναι εκ των προτέρων γνωστοί, καθώς και με την εισαγωγή ενός μέτρου σφάλματος, το οποίο και θα βασίζεται στη γνώση. Εξάλλου, το σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να μάθει από την αρχή, εφόσον δεν υφίσταται προγενέστερη γνώση. Ο αλγόριθμος μάθησης θα πρέπει να είναι απλός και γρήγορος έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να μάθει εντός γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, να μπορεί διαρκώς το σύστημα NEFCON, να ερμηνευτεί ως ένα ασαφές σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι στον αλγόριθμο μάθησης, δεν πρέπει να επιτρέπεται να επιφέρει ορισμένες αλλαγές που θα αλλοιώσουν το χαρακτήρα του συστήματος.

2.4.3.2 Αρχιτεκτονική

Το Σχήμα 2.5 απεικονίζει ένα σύστημα NEFCON με δύο (2) μεταβλητές εισόδου, μία (1) μεταβλητή εξόδου και πέντε (5) κανόνες. Οι μεταβλητές εισόδου ξ_1 και ξ_2 , είναι οι μεταβλητές κατάστασης ενός τεχνικού συστήματος S, το οποίο πρέπει να ελεγχθεί. Η έξοδος η του NEFCON, είναι η ενέργεια ελέγχου που εφαρμόζεται στο σύστημα S. Οι μονάδες του κρυμμένου επιπέδου αντιπροσωπεύουν τους ασαφείς κανόνες. Για παράδειγμα, η μονάδα του κανόνα R_3 συμβολίζει τον κανόνα

$$R_3 : \text{If } \xi_1 \text{ is } A_2^{(1)} \text{ and } \xi_2 \text{ is } A_2^{(2)} \text{ then } \eta \text{ is } B_2,$$

όπου οι $A_2^{(1)}, A_2^{(2)}$ και B_2 είναι λεκτικοί όροι που αντιπροσωπεύονται από τα ασαφή σύνολα $\mu_2^{(1)}, \mu_2^{(2)}$ και ν_2 .



Σχήμα 2.5: Αρχιτεκτονική Νεύρο-Ασαφούς Μοντέλου NEFCON

Σε αντίθεση με τα νευρωνικά δίκτυα, οι συνδέσεις στο NEFCON έχουν για βάρη ασαφή σύνολα αντί για πραγματικούς αριθμούς, ενώ κάποιες συνδέσεις έχουν τα ίδια βάρη (ενιαίες συνδέσεις, μοιρασμένα βάρη). Στο Σχήμα 2.5 οι συνδέσεις από τη μονάδα εισόδου ξ_1 προς τις μονάδες των κανόνων R_1 και R_2 μοιράζονται το βάρος $\mu_1^{(1)}$ και οι συνδέσεις από τις R_4 και R_5 προς την έξοδο η έχουν κοινό βάρος v_3 . Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο σχήμα με τις σχεδιασμένες ελλείψεις γύρω από τις συνδέσεις. Ο αλγόριθμος μάθησης οφείλει να λάβει υπόψιν του αυτά τα μοιρασμένα βάρη και να πραγματοποιήσει ανάλογες ρυθμίσεις στις ενιαίες συνδέσεις.

Ορισμός [4]: Έστω μία διαδικασία S με n μεταβλητές κατάστασης ξ_1, \dots, ξ_n και μία μεταβλητή ελέγχου η . Σε κάθε ξ_i αντιστοιχούν p_i λεκτικοί όροι ενώ για την μεταβλητή η αντιστοιχούν q λεκτικοί όροι. Έστω k λεκτικοί κανόνες οι οποίοι περιγράφουν μερικώς τη συνάρτηση ελέγχου για το σύστημα S . Ένα σύστημα NEFCON είναι ένας ειδικός ασαφής αισθητήρας τριών επιπέδων με τις ακόλουθες προδιαγραφές :

- i. $U_1 = \{\xi_1, \dots, \xi_n\}, U_2 = \{R_1, \dots, R_k\}, U_3 = \{\eta\}.$

- ii. Κάθε σύνδεση ανάμεσα στις μονάδες $\xi_i \in U_1$ και $R_r \in U_2$ χαρακτηρίζεται από έναν λεκτικό όρο $A_{j_r}^{(i)}$ ($j_r \in \{1, \dots, p_i\}$).
- iii. Κάθε σύνδεση ανάμεσα στις μονάδες $R_r \in U_2$ και την μονάδα εξόδου η , χαρακτηρίζεται από έναν λεκτικό όρο B_{j_r} ($j_r \in \{1, \dots, q\}$).
- iv. Οι συνδέσεις που προέρχονται από τις ίδιες μονάδες εισόδου $\xi_i (i \in 1, \dots, n)$ και χαρακτηρίζονται από πανομοιότυπους λεκτικούς όρους, έχουν πάντα το ίδιο ασαφές βάρος. Αυτές οι συνδέσεις ονομάζονται ενιαίες και τα βάρη τους μοιρασμένα. Το ίδιο ισχύει και για τις συνδέσεις που καταλήγουν στη μονάδα εξόδου η .
- v. Έστω ότι ο όρος $L_{u,v}$ συμβολίζει τον χαρακτηρισμό της σύνδεσης μεταξύ μιας μονάδας u και μιας μονάδας v . Για όλες τις μονάδες $v, v' \in U_2$ ισχύει :

$$(\forall u \in U_1)(L_{u,v} = L_{u,v'}) \Rightarrow v = v'$$

Ο παραπάνω ορισμός, κάνει δυνατή την ερμηνεία του συστήματος NEFCON με όρους ασαφούς ελεγκτή. Η συνθήκη (iv) καθορίζει ότι θα πρέπει να υπάρχουν μοιρασμένα βάρη. Εάν δεν υπήρχε η συγκεκριμένη συνθήκη, θα ήταν δυνατή η διαφορετική εξέλιξη ασαφών βαρών, τα οποία περιγράφονται με πανομοιότυπους λεκτικούς όρους. Το γεγονός αυτό θα είχε σαν συνέπεια, την αδυναμία ερμηνείας της αρχιτεκτονικής του NEFCON ως μία ασαφή βάση κανόνων. Η συνθήκη (v) καθορίζει ότι δεν είναι δυνατή η ύπαρξη κανόνων με πανομοιότυπες προηγούμενες δηλώσεις (antecedents). Ένα δίκτυο το οποίο δεν ενστερνίζεται την συνθήκη (v) είναι ανυπόστατο.

Έστω ότι είναι γνωστοί k ασαφείς κανόνες για τον έλεγχο της διαδικασίας S , τότε το σύστημα NEFCON μπορεί να κατασκευαστεί ως εξής [4] :

- Για κάθε μεταβλητή εισόδου ξ_i εισάγεται μία μονάδα εισόδου με το ίδιο όνομα στο επίπεδο εισόδου.
- Η μεταβλητή ελέγχου απεικονίζεται με μία μονάδα εξόδου, την η .

- Για κάθε ασαφή κανόνα R_r , υπάρχει μία κρυμμένη μονάδα κανόνα με το ίδιο όνομα.
- Κάθε μονάδα κανόνα R_r συνδέεται με τις μονάδες εισόδου και τις μονάδες εξόδου ανάλογα με τον ασαφή κανόνα που εκπροσωπεί. Τα ασαφή σύνολα $\mu_{j_r}^{(i)} (v_{j_r})$, που περιγράφουν τους λεκτικούς όρους $A_{j_r}^{(i)} (B_{j_r})$ στις δηλώσεις που προηγούνται (έπονται), στον κανόνα R_r , είναι τα βάρη των συνδέσεων. Ο λεκτικός όρος χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τη σύνδεση.
- Οι t-norm και t-conorm που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εισόδων του δικτύου αλλά και για τη διαδικασία αποασαφοποίησης, πρέπει να επιλεγούν ανάλογα με το ασαφές σύστημα που θα αντιπροσωπεύεται από το NEFCON.

Η βάση γνώσης του ασαφούς συστήματος μεταδίδεται απόλυτα μέσα από τη δομή του δικτύου. Οι μονάδες εισόδου, αναλαμβάνουν την διαδικασία της ασαφοποίησης, η λογική εξαγωγής συμπεράσματος εκτελείται από τις propagation συναρτήσεις και η μονάδα εξόδου αποασαφοποιεί το αποτέλεσμα.

2.4.3.3. Αλγόριθμοι μάθησης

Η διαδικασία μάθησης του μοντέλου NEFCON, μπορεί να διαχωριστεί σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση είναι σχεδιασμένη για την μάθηση της αρχικής βάσης κανόνων, εφόσον δεν υπάρχει προγενέστερη γνώση για το σύστημα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί, για την ολοκλήρωση μιας «δια χειρός» ορισμένης βάσης κανόνων. Η δεύτερη φάση, βελτιστοποιεί τους κανόνες με την αλλαγή ή ρύθμιση των ασαφών συνόλων των κανόνων. Αμφότερες οι δύο φάσεις, χρησιμοποιούν ένα ασαφές σφάλμα e , το οποίο περιγράφει την ποιότητα της εκάστοτε κατάστασης του συστήματος, τόσο για τη μάθηση, όσο και για την βελτιστοποίηση της βάσης κανόνων. Το σφάλμα ασαφούς μορφής, παίζει το ρόλο του παράγοντα κρίσης στα μοντέλα εξαναγκαστικής μάθησης. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι γνωστή και μία βέλτιστη τιμή για την τιμή εξόδου, η_{opt} . Το ασαφές σφάλμα ορίζεται ως εξής:

$$E(x_1, \dots, x_n) = \text{sgn}(\eta_{opt})e(x_1, \dots, x_n) \text{ με τη συμβατική είσοδο } (x_1, \dots, x_n).$$

A) Φάση 1η : Μάθηση της βάσης κανόνων

Η μέθοδος μάθησης μιας αρχικής βάσης κανόνων διαχωρίζεται σε τρεις περιπτώσεις. Η περίπτωση εκκίνησης από μία κενή βάση κανόνων, η περίπτωση εκκίνησης από μία πλήρη βάση κανόνων, και η περίπτωση εκκίνησης από μία τυχαία βάση κανόνων. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι για τα δύο πρώτα σενάρια [4]. Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη αναφορά στους αλγόριθμους αυτούς, με στόχο να παρουσιαστεί η φιλοσοφία υπό την οποία λειτουργούν.

1) Αλγόριθμος μάθησης πλήρους βάσης (NEFCON I)

Ο αλγόριθμος NEFCON I [4], ξεκινάει με μία πλήρη βάση. Μπορεί να διαχωριστεί σε δύο φάσεις, που εκτελούνται είτε μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, είτε μέσα σε συγκεκριμένο αριθμό βημάτων. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, οι κανόνες που δίνουν σήμα εξόδου διαφορετικό από τη βέλτιστη τιμή εξόδου η_{opt} , απομακρύνονται. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης, κατασκευάζεται η βάση κανόνων για κάθε ενέργεια ελέγχου, με την τυχαία επιλογή ενός κανόνα από την ομάδα κανόνων που έχουν πανομοιότυπες προηγηθήσες δηλώσεις (antecedents). Το σφάλμα κάθε κανόνα (το σφάλμα του σήματος εξόδου, σταθμισμένο με την επιρροή του κάθε κανόνα) αθροίζεται. Στο τέλος της δεύτερης φάσης, στη βάση κανόνων παραμένει, από την ομάδα με τις ίδιες προηγηθήσες δηλώσεις, εκείνος ο κανόνας που έχει ως έξοδο το μικρότερο σφάλμα. Όλοι οι υπόλοιποι κανόνες διαγράφονται από τη βάση. Οι συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι τριγωνικές, τραπεζοειδής, ή και Gauss.

2) Αλγόριθμος μάθησης κενής βάσης (Bottom-up algorithm)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ξεκινάει τη μάθηση θεωρώντας μία κενή βάση κανόνων [4]. Αρχικά, πρέπει να δοθεί στο σύστημα ένας διαχωρισμός των ασαφών συνόλων τόσο για τις εισόδους όσο και για την έξοδο του. Ο αλγόριθμος χωρίζεται σε δύο φάσεις. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, οι προηγηθήσες δηλώσεις των κανόνων καθορίζονται από την κατάταξη των τιμών εισόδου, δηλαδή εντοπίζεται η συνάρτηση συμμετοχής κάθε μεταβλητής, η οποία έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής για κάθε διαδοχική τιμή εισόδου. Κατόπιν, ο αλγόριθμος προσπαθεί να «μαντέψει» την

κατάλληλη τιμή εξόδου, λαμβάνοντας κατά βάση υπόψιν του το τρέχον, ασαφούς μορφής σφάλμα. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης, η βάση κανόνων βελτιστοποιείται με την ρύθμιση των δηλώσεων που έπονται (consequents), σε κάποια γειτονική συνάρτηση συμμετοχής, αν αυτό είναι απαραίτητο. Σε γενικές γραμμές, ο αλγόριθμος μάθησης κενής βάσης, είναι οικονομικότερος σε χρόνο από τον πρώτο, αφού το σύστημα δεν έχει να διαχειριστεί όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των συναρτήσεων συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Παρόλα αυτά, μπορεί να συναντήσει προβλήματα όταν εφαρμόζεται σε πολύπλοκα δυναμικά συστήματα, λόγω της ευρετικής προσέγγισης των συναρτήσεων συμμετοχής που χαρακτηρίζουν τις δηλώσεις που έπονται.

Παρατηρήσεις : Ο αλγόριθμος μάθησης πλήρους βάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περίπτωση λίγων μεταβλητών και λίγων ασαφών συνόλων που τις περιγράφουν. Ο χρόνος και η μνήμη που απαιτείται από τον αλγόριθμο, αυξάνουν εκθετικά με τον αριθμό των μεταβλητών. Για παράδειγμα, ένα σύστημα NEFCON με τέσσερις (4) μεταβλητές εισόδου, μία (1) μεταβλητή εξόδου και επτά (7) ασαφή σύνολα να τις διαχωρίζουν, έχουμε $7^5 = 16807$ δυνατούς συνδυασμούς κανόνων. Με τόσο μεγάλο νούμερο κανόνων προς επεξεργασία, το σύστημα πιθανότατα να μην μπορεί να «τρέξει» σε πραγματικό χρόνο.

Φυσικά, δεν μπορεί να περιμένει κανείς ότι η βάση κανόνων που θα εξαχθεί με τη βοήθεια του ενός ή του άλλου αλγορίθμου, θα μπορεί να συγκριθεί με τη βάση που μπορεί να διαμορφώσει ο ανθρώπινος παράγοντας (κάποιος γνώστης της διαδικασίας ελέγχου). Εξάλλου, είναι αναμενόμενο να υπάρχουν περισσότερες από μία βάσεις κανόνων που να μπορούν να ελέγξουν επιτυχώς μία διαδικασία. Επίσης, όπως σε όλα τα νευρωνικά δίκτυα έτσι και εδώ, το αποτέλεσμα της μάθησης εξαρτάται από ευρετικούς παράγοντες όπως ο ρυθμός μάθησης, η διάρκεια της διαδικασίας μάθησης και το μέτρο του σφάλματος. Η βάση που παράγει το σύστημα NEFCON δεν πρέπει να ιδωθεί ως τελική λύση, αλλά ως συμπληρωματική πληροφορία προς την λύση. Είναι προφανές, ότι κανόνες που έρχονται σε σύγκρουση διαγράφονται ή αντικαθίστανται και μετά τη διαδικασία μάθησης (χειρωνακτικά) ενώ και η διαδικασία υιοθέτησης των ασαφών συνόλων συνεχίζεται. Υπάρχουν δύο κανόνες, οι οποίοι διασφαλίζουν την εκμετάλλευση

της προγενέστερης γνώσης και μειώνουν το κόστος της διαδικασίας μάθησης, ιδιαίτερα στη μάθηση από πλήρη βάση:

- Εάν για μία δοθείσα δήλωση που προηγείται, είναι γνωστή η δήλωση που έπεται, τότε ο κανόνας αυτός εισάγεται στο σύστημα NEFCON και ο αλγόριθμος μάθησης δεν επιτρέπεται να τον μετακινήσει. Άλλοι κανόνες με πανομοιότυπη προηγούμενη δήλωση δεν δημιουργείται.
- Εάν για κάποιες καταστάσεις του συστήματος είναι αναγκαία η χρήση μόνο ενός υποσυνόλου όλων των πιθανών κανόνων, τότε στο δίκτυο τοποθετείται μόνο αυτό το υποσύνολο κανόνων.

Αλλά και η μάθηση που ξεκινά από κενή βάση, επωφελείται από την ύπαρξη προγενέστερης γνώσης, αφού οι κανόνες που είναι εκ των προτέρων γνωστοί εισάγονται στο σύστημα και η διαδικασία μάθησης των κανόνων δεν χρειάζεται να ξεκινήσει από το μηδέν.

Β) Φάση 2^η : Βελτιστοποίηση της βάσης κανόνων

Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα, είναι σχεδιασμένοι για να βελτιστοποιούν τη βάση κανόνων ενός ασαφούς ελεγκτή, με το να αλλάζουν /ρυθμίζουν το βαθμό υποστήριξης των ασαφών συνόλων. Δεν μεταβάλλουν ούτε τους κανόνες αλλά ούτε και τη δομή του δικτύου.

Στη συνέχεια, θεωρούμε τα ασαφή σύνολα $\mu_j^{(i)}$ ή ν_j , τα οποία αναπαριστούν τους λεκτικούς όρους των μεταβλητών κατάστασης $\xi_i \in X_i \subseteq \mathfrak{R}$, ή της μεταβλητής ελέγχου $\eta \in Y \subseteq \mathfrak{R}$ αντίστοιχα, και ορίζονται ως εξής [4]:

$$v_j(y) = \mu_j^{(i)}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_j^{(i)}}{b_j^{(i)} - a_j^{(i)}}, x \in [a_j^{(i)}, b_j^{(i)}] \\ \frac{c_j^{(i)} - x}{c_j^{(i)} - b_j^{(i)}}, x \in [b_j^{(i)}, c_j^{(i)}] \\ 0, \text{αλλού} \end{cases}$$

όπου $a_j^{(i)}, b_j^{(i)}, c_j^{(i)} \in \mathfrak{R}$, $a_j^{(i)} \leq b_j^{(i)} \leq c_j^{(i)}$.

Αυτό σημαίνει ότι $v_j(a_j) = \mu_j^{(i)}(a_j^{(i)}) = 0$, $v_j(b_j) = \mu_j^{(i)}(b_j^{(i)}) = 0$ και $v_j(c_j) = \mu_j^{(i)}(c_j^{(i)}) = 0$.

Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια μπορούν να λειτουργήσουν με τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής και είναι εύκολη η χρήση συμμετρικών ασαφών συνόλων στις δηλώσεις που προηγούνται και έπονται.

1) Ο αλγόριθμος NEFCON I

Ο αλγόριθμος NEFCON I [4], ενεργοποιείται από τον αλγόριθμο Backpropagation για πολυεπίπεδο αισθητήρα (multilayer perceptron) [6]. Το σφάλμα ασαφούς μορφής E, χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της βάσης κανόνων με χρήση «επιβράβευσης και τιμωρίας». Ένας κανόνας «επιβραβεύεται», με την αύξηση της επιρροής των δηλώσεων του που προηγούνται και έπονται, εάν η τρέχουσα τιμή εξόδου του είναι ίδια με την βέλτιστη τιμή η_{opt} . Σε αντίθετη περίπτωση, ένας κανόνας «τιμωρείται» με την μείωση της επιρροής των δηλώσεων του που προηγούνται και έπονται.

2) Ο αλγόριθμος NEFCON II

Σε αντίθεση με τον NEFCON I, ο οποίος χρησιμοποιεί μόνο το τρέχον σφάλμα E, ο αλγόριθμος NEFCON II [4] κάνει χρήση και της μεταβολής του σφάλματος για τη βελτιστοποίηση της βάσης κανόνων. Πρόκειται για μία ευρετική προσέγγιση, στην

προσπάθεια να συμπεριληφθεί και η δυναμική του συστήματος στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Έστω E το ασαφές σφάλμα τη χρονική στιγμή t και E' η τιμή του σφάλματος τη στιγμή $t+1$, τότε η τάση του σφάλματος τ ορίζεται ως εξής [4] :

$$\tau = \begin{cases} 1, \text{όταν } (|E'| \geq |E|) \wedge (E'E \geq 0), \\ 0, \text{όταν } (|E'| < |E|) \wedge (E'E \geq 0), \\ -1, \text{όταν } (E'E < 0). \end{cases}$$

Εάν $\tau=0$, το δυναμικό σύστημα κινείται προς μία βέλτιστη (ή απλώς σταθερή) κατάσταση. Σε αυτήν την περίπτωση δεν πραγματοποιούνται αλλαγές στη βάση κανόνων. Εάν $\tau=1$, το σφάλμα αυξάνει χωρίς να αλλάζει πρόσημο. Σε αυτήν την περίπτωση, η έξοδος κάθε κανόνα αυξάνεται με ρύθμιση των δηλώσεων που έπονται. Οι δηλώσεις που προηγούνται (antecedents), εκείνων των κανόνων που οι δηλώσεις τους που έπονται (consequents) αυξάνουν το σήμα εξόδου, «επιβραβεύονται» ενώ οι αντίστοιχες δηλώσεις των κανόνων, των οποίων οι δηλώσεις που έπονται μειώνουν το σήμα εξόδου, «τιμωρούνται». Εάν $\tau=-1$, το σύστημα έχει αστοχήσει και σε αυτή την περίπτωση το σήμα εξόδου μειώνεται και οι δηλώσεις που προηγούνται «τιμωρούνται» ή «επιβραβεύονται» αντίστοιχα.

Παρατηρήσεις: Οι ιδέες των αλγορίθμων μάθησης που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι πάντα οι ίδιες: αύξηση της επιρροής ενός κανόνα εφόσον δρα προς την σωστή κατεύθυνση (επιβράβευση) για το σύστημα και αντίστοιχα μείωση της επιρροής ενός κανόνα εφόσον δρα αντιπαραγωγικά (τιμωρία) για το σύστημα. Εάν η βάση κανόνων είναι η ιδανική, τότε κατάσταση «τιμωρίας» θα προκύψει μόνο εφόσον το σύστημα αστοχήσει. Αμφότεροι οι αλγόριθμοι μάθησης που παρουσιάστηκαν, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την προσαρμογή των συναρτήσεων συμμετοχής και μπορούν να εφαρμοστούν μόνο στην περίπτωση που υπάρχει μία βάση ασαφών κανόνων. Οι κανόνες αυτοί μπορούν να μετατραπούν απευθείας σε ένα σύστημα

NEFCON ή να προκύψουν από την μάθηση των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Ο αλγόριθμος NEFCON II, βελτιστοποιεί με πιο σαφή τρόπο την βάση κανόνων από ότι ο NEFCON I, είναι όμως πιο ευαίσθητος όταν υπάρχει χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στην ενέργεια ελέγχου και την απόκριση του συστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει να προτιμάται ο αλγόριθμος NEFCON I.

Όλοι οι αλγόριθμοι που περιγράφονται παραπάνω δεν είναι σχεδιασμένοι για να καταλήγουν σε μία βέλτιστη λύση για ένα δεδομένο πρόβλημα ελέγχου, αφού ο κύριος σκοπός ανάπτυξης τους, είναι ο εντός γραμμής καθορισμός μιας κατάλληλης βάσης κανόνων μετά από ένα μικρό αριθμό προσομοιώσεων. Εξάλλου, θα πρέπει να είναι δυνατή η χρήση προγενέστερης γνώσης για την αρχικοποίηση της διαδικασίας μάθησης. Αυτή είναι και η βασική διαφορά με τις αυστηρώς εξαναγκαστικές στρατηγικές ή τον δυναμικό προγραμματισμό, που προσπαθούν να βρουν βέλτιστες λύσεις χρησιμοποιώντας δομές νευρωνικών δικτύων. Τέτοιες μέθοδοι ενδέχεται να απαιτήσουν πολλά περισσότερα «τρεξίματα» για να δώσουν μία προσεγγιστική λύση σε ένα πρόβλημα ελέγχου. Αντιθέτως, απαιτούν ελάχιστη πληροφορία για το τρέχον σφάλμα του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει το πρόβλημα της διαχείρισης των αποθεμάτων σε ένα δίκτυο παραγωγής. Προβλήματα προγραμματισμού σύνθετων συστημάτων, που αφορούν στην ελαχιστοποίηση του κόστους αποθήκευσης, είναι δύσκολο να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Επίσης, είναι δύσκολο να επιλυθούν με υπολογιστικές τεχνικές και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως ευρετικές μέθοδοι για να ελέγξουν τη ροή των εργασιών σε ένα σύστημα παραγωγής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η έρευνα [1], [3], που αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των νέων μεθοδολογιών που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

3.2 Ασαφής Κατανεμημένος Έλεγχος (Fuzzy Distributed Control)

α) Γενικά: Στην εργασία [1] προτείνεται η μεθοδολογία ενός κατανεμημένου ασαφούς ελέγχου για δίκτυα παραγωγής ενός τύπου προϊόντος. Ο σκοπός του ελέγχου, είναι να κρατήσει σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα το χρόνο παραμονής των ημιτελών προϊόντων (Work-In-Progress) και το απόθεμα στο σύστημα, ενώ παράλληλα να διατηρηθούν σε υψηλό επίπεδο η χρησιμοποίηση των μηχανών και η παραγωγικότητα του συστήματος. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου παραγωγής, όπου όλες οι μηχανές λειτουργούν στο μέγιστο δυνατό ρυθμό τους, ελέγχουμε το ρυθμό παραγωγής των μηχανών σε κάθε παραγωγικό στάδιο, έτσι ώστε να περιορίζονται οι περίοδοι που οι μηχανές είναι αποστερημένες ή μπλοκαρισμένες.

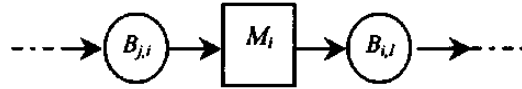
β) Μονάδες ελέγχου παραγωγής: Ένα σύστημα παραγωγής περιγράφεται συχνά σαν ένα δίκτυο μηχανών ή σταθμών εργασίας και ενδιάμεσων αποθηκών. Οι μηχανές κατεργάζονται προϊόντα που περιμένουν για επόμενη κατεργασία τους σε ενδιάμεσες, περιορισμένης χωρητικότητας, αποθήκες. Η παραγωγική διαδικασία παρεμποδίζεται από τυχαίες βλάβες που συμβαίνουν στις μηχανές, με αποτέλεσμα να είναι άλλοτε αποστερημένες και άλλοτε αποκλεισμένες. Όταν μια μηχανή πάθει βλάβη, ενώ οι διπλανές της συνεχίζουν να λειτουργούν, το επίπεδο των επόμενων της αποθηκών

μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα το επίπεδο των προηγούμενων της αποθηκών αυξάνει. Εάν ο χρόνος επιδιόρθωσης είναι αρκετά μεγάλος, η χαλασμένη μηχανή είτε θα αποκλείσει τους προηγούμενους σταθμούς εργασίας, είτε θα κάνει τους επόμενους αποστερημένους. Η επίδραση ενός τέτοιου συμβάντος είναι δυνατόν να αναπαραχθεί σε όλο το σύστημα παραγωγής.

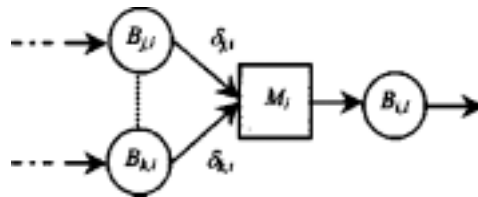
Τα γεγονότα που είναι δυνατόν να συμβούν σε ένα δίκτυο παραγωγής είναι: αλλαγές στις καταστάσεις των αποθηκών και αλλαγές στις καταστάσεις των μηχανών. Οι αποθήκες μπορεί να είναι γεμάτες, άδειες ή να βρίσκονται σε μια ενδιάμεση κατάσταση και οι μηχανές είναι δυνατόν να είναι χαλασμένες (υπό επιδιόρθωση) ή λειτουργικές. Όταν μία μηχανή είναι λειτουργική μπορεί να αποστερηθεί εάν μια από τις προηγούμενες αποθήκες της είναι άδεια. Σε αυτήν την περίπτωση η μηχανή αναγκάζεται να παράγει με το ρυθμό της προηγούμενης. Κατά δυαδικό τρόπο, εάν μια μηχανή λειτουργεί, είναι δυνατό να αποκλειστεί εφόσον μία από τις επόμενες αποθήκες είναι γεμάτη, οπότε και ο ρυθμός της γίνεται ίσος με αυτόν της επόμενης μηχανής. Όταν μία μηχανή χαλάσει, η προηγούμενη της συνεχίζει να παράγει μέχρι να αποκλειστεί. Παρόμοια, οι επόμενες, από την χαλασμένη, μηχανές συνεχίζουν να παράγουν μέχρι να αποστερηθούν.

Στην εργασία [1], παρουσιάζονται τρεις διαφορετικοί σχηματισμοί: ένας για γραμμές παραγωγής (Σχήμα 3.1α), ένας για δίκτυα συναρμολόγησης (Σχήμα 3.1β) και ένας για δίκτυα αποσυναρμολόγησης (Σχήμα 3.1γ). Η γραμμή παραγωγής περιλαμβάνει μία μηχανή M_i , η οποία λαμβάνει ημιτελή προϊόντα από την προηγούμενη αποθήκη $B_{j,i}$ και αφού τα κατεργαστεί, τα προωθεί στην επόμενη αποθήκη $B_{i,l}$. Κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης, μία μηχανή M_i λαμβάνει δύο ή περισσότερα κομμάτια προς συναρμολόγηση, ακολουθώντας ένα διάνυμα συναρμολόγησης $\delta_{j,i}$, από μερικές προηγούμενες αποθήκες $B_{j,i}$ και αφού τα συναρμολογήσει τα προωθεί σε μία επόμενη αποθήκη $B_{i,l}$ όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1β. Κατά τη διαδικασία της αποσυναρμολόγησης, μία μηχανή M_i λαμβάνει ημιτελή μοναδιαία κομμάτια από μία προηγούμενη αποθήκη $B_{j,i}$, όπου αφού τα χωρίσει σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, σύμφωνα με ένα διάνυμα $d_{i,j}$, τα προωθεί σε επόμενες αποθήκες $B_{i,k}$ όπως φαίνεται

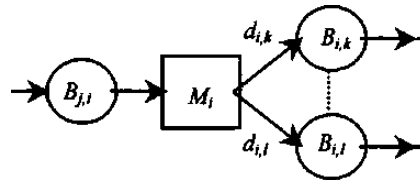
στο σχήμα 3.1γ. Οι παραπάνω συνδυασμοί εάν συνδεθούν μεταξύ τους μπορούν να περιγράψουν βιομηχανικά δίκτυα διαφόρων διατάξεων.



Σχήμα 3.1α : Σχηματισμός Γραμμής



Σχήμα 3.1β : Σχηματισμός συναρμολόγησης

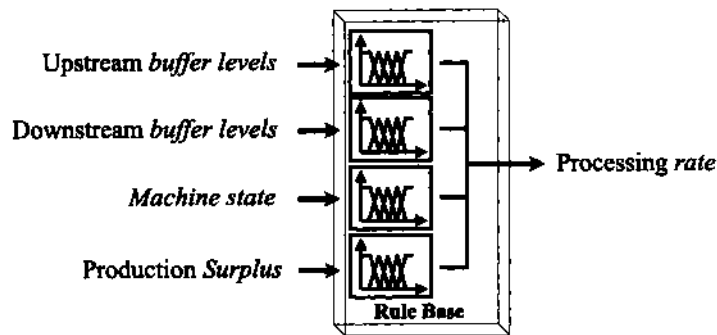


Σχήμα 3.1γ : Σχηματισμός αποσυναρμολόγησης

Κάθε ένας από τους τρεις παραπάνω σχηματισμούς μπορούν να παρουσιαστούν σαν ένας ασαφής ελεγκτής (Σχήμα 3.2). Τα δεδομένα εισόδου σε κάθε ελεγκτή είναι:

- Τα επίπεδα των αποθηκών $b_{i,j}$ και $b_{i,k}$ των προηγούμενων και των επόμενων αποθηκών.
- Οι καταστάσεις ms_i των μηχανών M_i .
- Το πλεόνασμα της παραγωγής x_i (surplus) των μηχανών M_i .

Η έξοδος κάθε ελεγκτή είναι ο ρυθμός r_i της μηχανής M_i . Οι στάθμες των αποθηκών και οι ρυθμοί των μηχανών λαμβάνουν λεκτικές μεταβλητές με καθορισμένες συναρτήσεις συμμετοχής. Οι καταστάσεις των μηχανών ms_i είναι αριθμητικές μεταβλητές και μπορούν να πάρουν τιμές μηδέν (0) (χαλασμένη) και ένα (1) (λειτουργική).



Σχήμα 3.2 : Ασαφής Ελεγκτής [1]

Ο στόχος του ελέγχου σε κάθε περίπτωση, είναι η ικανοποίηση της ζήτησης και η ταυτόχρονη συγκράτηση του χρόνου παραμονής των ημιτελών προϊόντων σε χαμηλό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με την ρύθμιση του ρυθμού παραγωγής των μηχανών σε κάθε χρονική στιγμή με γνώμονα δύο γενικούς κανόνες:

1. Εάν δεν υπάρχει κάποια ένδειξη αποστερημένης ή αποκλεισμένης μηχανής, τότε διατηρείται το πλεόνασμα της παραγωγής κοντά στο μηδέν (0). Με άλλα λόγια, το σύστημα παράγει πάνω-κάτω κοντά στα επίπεδα της ζήτησης.
2. Εάν μία μη επιθυμητή ένδειξη (άδεια ή γεμάτη αποθήκη) τείνει να εμφανιστεί, τότε αγνοείται το πλεόνασμα της παραγωγής και γίνεται προσπάθεια να αποφευχθεί η αποστέρηση ή ο αποκλεισμός της μηχανής, με την αύξηση ή μείωση του ρυθμού παραγωγής αντίστοιχα.

Η πολιτική ελέγχου που χρησιμοποιείται, παρακολουθεί τα επίπεδα των αποθηκών και εμποδίζει τις μηχανές να αποστερηθούν ή να αποκλειστούν. Οι ελεγκτές

συγκρατούν τις αποθήκες, έτσι ώστε να μην γεμίζουν, αλλά ούτε και να αδειάζουν, ρυθμίζοντας τους ρυθμούς των μηχανών. Όταν μια αποθήκη τείνει να γεμίσει, ο ελεγκτής αυξάνει το ρυθμό της επόμενης μηχανής και μειώνει το ρυθμό της προηγούμενης. Κατά τον ίδιο τρόπο, όταν μία αποθήκη τείνει να αδειάσει, ο ελεγκτής αυξάνει το ρυθμό της προηγούμενης μηχανής και μειώνει αυτόν της επόμενης. Η πληροφορία που χρειάζεται, για να συγχρονισθούν οι λειτουργίες του δικτύου παραγωγής, μεταφέρεται σε κάθε σχηματισμό ελέγχου μέσω της αλλαγής του επιπέδου κάθε αποθήκης. Κάθε γεγονός που συμβαίνει στο δίκτυο παραγωγής, επηρεάζει το επίπεδο των αποθηκών που βρίσκονται κοντά στην περιοχή που συμβαίνει το γεγονός. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα παραγωγής λειτουργεί με ικανοποιητικούς ρυθμούς, ενώ ταυτόχρονα το απόθεμα που παραμένει στο σύστημα διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

Η βάση κανόνων της μονάδας ελέγχου γραμμής περιλαμβάνει δεκαοκτώ (18) κανόνες της ακόλουθης μορφής:

$$\text{ΕΑΝ } b_{j,i} \text{ είναι } LB^{(k)} \text{ ΚΑΙ } b_{i,j} \text{ είναι } LB^{(k)} \text{ ΚΑΙ } ms_i \text{ είναι } LMS_i^{(k)} \text{ ΚΑΙ } x_i \text{ είναι } LX^{(k)} \text{ ΤΟΤΕ } r_i \text{ είναι } LR_i^{(k)}$$

όπου, ο αριθμός k χαρακτηρίζει τον κανόνα ($k = (1,...,18)$), ο αριθμός i χαρακτηρίζει τη μηχανή ή τον σταθμό εργασιών, το LB είναι μία λεκτική τιμή της μεταβλητής *επίπεδο αποθηκών* b που παίρνει τιμές από το σύνολο $B = \{\text{Άδεια, Σχεδόν Άδεια, OK, Σχεδόν Γεμάτη, Γεμάτη}\}$, το ms_i καθορίζει την κατάσταση της μηχανής i , που μπορεί να είναι είτε λειτουργική (1) είτε σταματημένη (0) και αντίστοιχα το $MS = \{\text{Μηδέν, Ένα}\}$, ενώ το LX είναι μία λεκτική τιμή της μεταβλητής *πλέονασμα παραγωγής* x που παίρνει τιμές από το σύνολο $X = \{\text{Αρνητικό, OK, Θετικό}\}$. Ο ρυθμός παραγωγής r_i αντιπροσωπεύεται από τη λεκτική μεταβλητή LR που παίρνει τιμές από το σύνολο $R = \{\text{Μηδέν, Χαμηλός, Κανονικός, Υψηλός}\}$.

Η μαθηματική ερμηνεία του k κανόνα, για $LMS_i^{(k)} = 1$ μπορεί να δοθεί σαν μια ασαφής σχέση $FR^{(k)}$ στο $B \times X \times R$ όπου στην περιοχή των συναρτήσεων συμμετοχής είναι:

$$\mu_{FR^{(k)}}(b_{j,i}, b_{i,l}, x_i, r_i) = f_{\rightarrow}[(\mu_{LB^{(k)}}(b_{j,i}), \mu_{LB^{(k)}}(b_{i,l}), \mu_{LX^{(k)}}(x_i), \mu_{LR^{(k)}}(r_i))] \quad (1)$$

όπου $f_{\rightarrow} = \min$ για κανόνες τύπου Mamdani [10]. Προφανώς όταν $LMS_i^{(k)} = 0$, ο ρυθμός παραγωγής r παίρνει την τιμή Μηδέν από το σύνολο των όρων R.

Ας υποθεθεί τώρα ότι η μηχανή δεν είναι σταματημένη και το επίπεδο των προηγούμενων και των επόμενων αποθηκών μπορεί να παρουσιαστεί ως $b_{j,i}^*$ και $b_{i,l}^*$ με συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_B^*(b_{j,i})$ και $\mu_B^*(b_{i,l})$ αντίστοιχα. Το πλεόνασμα της παραγωγής για κάποια δεδομένη στιγμή συμβολίζεται ως x_i^* με συνάρτηση συμμετοχής $\mu_X^*(x_i)$. Η συνάρτηση συμμετοχής για την συνένωση των δύο δεδομένων και για $KAI=\min$ είναι:

$$\mu_{AND}^*(b_{j,i}, b_{i,l}, x_i) = \mu_B^*(b_{j,i}) \wedge \mu_B^*(b_{i,l}) \wedge \mu_X^*(x_i) \quad (2)$$

Ο ρυθμός παραγωγής r_i^* , δηλαδή η δράση ελέγχου κάθε χρονική στιγμή δίνεται από τον τύπο $r_i^* = \frac{\sum r_i \mu_R^*(r_i)}{\sum \mu_R^*(r_i)}$ όπου $\mu_R^*(r_i)$ είναι η συνάρτηση συμμετοχής του αθροιστικού ρυθμού παραγωγής, που υπολογίζεται εφαρμόζοντας τη σύνθεση max-min στα εξαγόμενα των (1) και (2). Έτσι έχουμε :

$$\mu_R^*(r_i) = \max_{b_{j,i}, b_{i,l}, x_i} \min[\mu_{AND}^*(b_{j,i}, b_{i,l}, x_i), \mu_{FR^{(k)}}(b_{j,i}, b_{i,l}, x_i, r_i)].$$

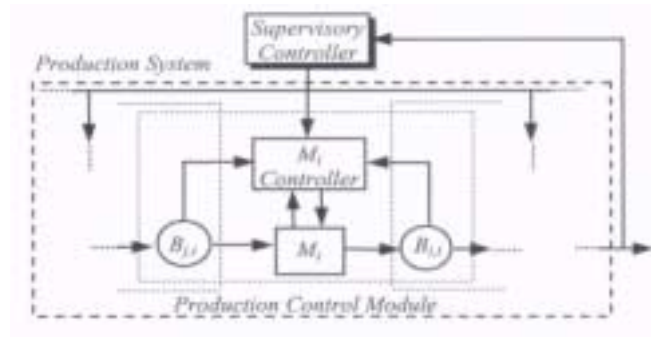
γ) Συμπεράσματα: Στην συγκεκριμένη εργασία, παρουσιάστηκε ένας νέος καταναεμημένος ελεγκτής, ο οποίος εξισορροπεί τα επίπεδα των αποθηκών, ρυθμίζοντας την παραγωγή κάθε μηχανής. Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου αποτελείται από τρεις (3) ανεξάρτητες μονάδες ελέγχου, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε δίκτυα παραγωγής γενικής τοπολογίας. Για τη σύγκριση των πολιτικών ελέγχου ασαφούς λογικής και παραγωγής στο μέγιστο ρυθμό, χρησιμοποιείται ένας προσομοιωτής συνεχούς ροής. Τελικά αποδεικνύεται ότι, αν και η παραγωγικότητα είναι 10% μικρότερη, η ασαφής πολιτική εξασφαλίζει χαμηλότερο απόθεμα, μεγαλύτερη

χρησιμοποίηση του συστήματος και μικρότερο χρόνο παραμονής των ημιτελών προϊόντων στο σύστημα [1].

3.3 Ασαφής Επιβλέπων Έλεγχος (Fuzzy Supervisory Control)

α) Γενικά: Συνέχεια της εργασίας [1] υπήρξε η εργασία [3], στην οποία εξετάζονται παραγωγικά δίκτυα που παράγουν περισσότερα του ενός προϊόντα. Σε αυτήν την περίπτωση, το συνολικό σύστημα ελέγχου της παραγωγής αντιμετωπίζεται ως σύστημα βασισμένο στο πλεόνασμα της παραγωγής (surplus-based system). Παρόλα αυτά, το νέο σύστημα διαφέρει από το προηγούμενο, στο γεγονός ότι η αρχιτεκτονική του είναι βασισμένη σε δύο επίπεδα ελέγχου, καθώς χρησιμοποιείται ένας επιβλέπων ελεγκτής σε ανώτερο επίπεδο για τη ρύθμιση των καταναμεμένων ελεγκτών που βρίσκονται στο χαμηλότερο επίπεδο. Ο συνολικός στόχος είναι η διατήρηση του χρόνου παραμονής των ημιτελών προϊόντων στο σύστημα σε χαμηλό επίπεδο, καθώς και η διατήρηση υψηλής ποιότητας υπηρεσιών με την διατήρηση της ανικανοποίητης ζήτησης σε εξίσου χαμηλά επίπεδα.

β)Επιβλέπων Ελεγκτής: Στην βιβλιογραφία των συστημάτων ελέγχου, ένας επιβλέπων ελεγκτής είναι ένας ελεγκτής, ο οποίος χρησιμοποιεί κάθε διαθέσιμη πληροφορία που χαρακτηρίζει την κατάσταση του συστήματος, για να καθορίσει ποιες αλλαγές πρέπει να γίνουν στο χαμηλότερο επίπεδο ελέγχου ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές επιδόσεις. Στην παρούσα εργασία, ο επιβλέπων ελεγκτής ρυθμίζει τους καταναμεμένους ασαφείς ελεγκτές με τέτοιο τρόπο, ώστε να βελτιώνονται τα μέτρα απόδοσης του συστήματος, χωρίς δραματική αλλαγή στην δομή της αρχιτεκτονικής ελέγχου που εφαρμόζεται σε αυτό. Η προτεινόμενη προσέγγιση ελέγχου παραμένει διαμορφώσιμη, αφού οι καταναμεμένοι ελεγκτές δεν αλλάζουν δομή αλλά απλώς ρυθμίζονται από τον επιπρόσθετο, επιβλέπων ελεγκτή. (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 : Επιβλέπων Ελεγκτής [3]

Οι μεταβλητές εισόδου του επιβλέπων ελεγκτή είναι οι ακόλουθες:

- 1) το μέσο παραγωγικό πλεόνασμα του τελικού προϊόντος mx_e (mean surplus of the end product)
- 2) το σφάλμα του παραγωγικού πλεονάσματος του τελικού προϊόντος ex_e , που είναι η διαφορά ανάμεσα στο παραγωγικό πλεόνασμα του τελικού προϊόντος x_e και του αρχικού κατώτερου ορίου του παραγωγικού πλεονάσματος I_l (initial lower bound of surplus) και
- 3) το σχετικό σφάλμα των ημιτελών προϊόντων ew (relative WIP error) που ισούται με

$$ew = \frac{WIP(t) - \overline{WIP}(t)}{\overline{WIP}(t)} \text{ όπου το } \overline{WIP}(t) \text{ είναι το μέσο WIP (συμπεριλαμβανομένου και}$$

του τελικού προϊόντος) του συστήματος παραγωγής, έως τη χρονική στιγμή t . Το σχετικό σφάλμα των ημιτελών προϊόντων ew χρησιμοποιείται ως μέτρο απόδοσης του WIP. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι εφικτή η αναλυτική μέτρηση του βέλτιστου μέσου WIP, οπότε και χρησιμοποιείται η μέση τιμή του $\overline{WIP}(t)$.

Οι μεταβλητές εξόδου του επιβλέποντος ελεγκτή είναι ο το άνω όριο του διορθωτικού συντελεστή u_c του παραγωγικού πλεονάσματος, και το κάτω όριο του διορθωτικού συντελεστή l_c του παραγωγικού πλεονάσματος και ισχύει $-1 \leq l_c, u_c \leq 1$. Οι

τιμές του παραγωγικού πλεονάσματος μπορούν να βρίσκονται σε τρεις περιοχές. Εάν το πλεόνασμα είναι χαμηλότερο από το κατώτερο όριο πλεονάσματος l_b , τότε η μηχανή παράγει στο μέγιστο ρυθμό. Εάν το πλεόνασμα είναι υψηλότερο από το ανώτερο όριο πλεονάσματος u_b , τότε η παραγωγή σταματάει, ενώ εάν το πλεόνασμα βρίσκεται ανάμεσα στα δύο παραπάνω όρια, ο ρυθμός παραγωγής καθορίζεται σε σχέση με τα γειτονικά επίπεδα αποθηκών και την κατάσταση της μηχανής. Ιδιαίτερα για συστήματα όπου οι παράμετροι του μεταβάλλονται δυναμικά, όπως για παράδειγμα η εξαρτημένη από το χρόνο ζήτηση, η υιοθέτηση αυτών των ορίων για το παραγωγικό πλεόνασμα, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της απόδοσης τους. Τα όρια του παραγωγικού πλεονάσματος μεταβάλλονται με βάση τον ακόλουθο μηχανισμό:

$$u_b = I_u + u_c n_u + \min(x_e, 0),$$

$$l_b = \min[(I_l + l_c n_l), u_b]$$

όπου τα I_u και I_l είναι τα αρχικά, άνω και κάτω, όρια του πλεονάσματος αντίστοιχα, τα n_u και n_l είναι σταθερές επιλεγμένες με τέτοιο τρόπο ώστε το l_b να μην υπερβαίνει ποτέ το u_b , όταν το x_e είναι θετικό.

Η βάση κανόνων του επιβλέποντος ελεγκτή περιέχει κανόνες της μορφής:

EAN mx_i είναι $LMX^{(k)}$ ΚΑΙ ex είναι $LEX^{(k)}$ ΚΑΙ ew είναι $LEW^{(k)}$ ΤΟΤΕ

$$u_c \text{ είναι } LU_c^{(k)} \text{ ΚΑΙ } l_c \text{ είναι } LL_c^{(k)}, (3)$$

όπου, k είναι ο αριθμός των κανόνων ($k=1, \dots, 29$), i είναι ο αριθμός των μηχανών ή των σταθμών εργασίας, LMX είναι η λεκτική μεταβλητή που αντιπροσωπεύει το μέσο παραγωγικό πλεόνασμα του τελικού προϊόντος και παίρνει τιμές από το σύνολο $MX=\{\text{Πολύ Αρνητικό, Λίγο Αρνητικό, Μηδέν, Λίγο Θετικό, Πολύ Θετικό}\}$, ex το σφάλμα του πλεονάσματος του τελικού προϊόντος και παίρνει τιμές από το σύνολο $EX=\{\text{Αρνητικό, Μηδέν, Θετικό}\}$. Το LEW αντιπροσωπεύει τη σχετική απόκλιση του WIP από τη μέση τιμή του και επιλέγεται από το σύνολο $EW=\{\text{Αρνητικό, Μηδέν, Θετικό}\}$. Το

u_c παίρνει λεκτικές τιμές LU_c από το σύνολο $U_c = \{\text{Αρνητικό}, \text{Αρνητικό Μηδέν}, \text{Μηδέν}, \text{Θετικό Μηδέν}, \text{Θετικό}\}$ και το l_c παίρνει λεκτικές τιμές LL_c από το σύνολο $L_c = \{\text{Αρνητικό}, \text{Αρνητικό Μηδέν}, \text{Μηδέν}, \text{Θετικό Μηδέν}, \text{Θετικό}\}$. Ο κανόνας (3) μπορεί να γραφτεί με τη μορφή των δύο κανόνων που ακολουθούν:

$$\text{ΕΑΝ } mx_i \text{ είναι } LMx^{(k)} \text{ ΚΑΙ } ex \text{ είναι } LEX^{(k)} \text{ ΚΑΙ } ew \text{ είναι } LEW^{(k)}$$

$$\text{TΟΤΕ } u_c \text{ είναι } LU_c^{(k)} \quad (4)$$

$$\text{ΕΑΝ } mx_i \text{ είναι } LMx^{(k)} \text{ ΚΑΙ } ex \text{ είναι } LEX^{(k)} \text{ ΚΑΙ } ew \text{ είναι } LEW^{(k)}$$

$$\text{TΟΤΕ } l_c \text{ είναι } LL_c^{(k)} \quad (5)$$

Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατή η χρήση δύο ασαφών ελεγκτών με μία έξοδο ο καθένας, οι οποίοι και μιμούνται τη συμπεριφορά ενός ελεγκτή με δύο εξόδους. Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση όπου εξόδος του ελεγκτή είναι το *άνω όριο του διορθωτικού συντελεστή* u_c . Η μαθηματική ερμηνεία του κ-οστού κανόνα μπορεί να εκφραστεί ως μία ασαφής σχέση $FR^{(k)}$ στο $MX \times EX \times EW \times U_c$ όπου στην περιοχή των συναρτήσεων συμμετοχής είναι:

$$\mu_{FR^{(k)}}(mx, ex, ew, u_c) = f_{\rightarrow}[\mu_{LMx^{(k)}}(mx), \mu_{LEX^{(k)}}(ex), \mu_{LEW^{(k)}}(ew), \mu_{LU_c}(u_c)] \quad (6)$$

όπου $f_{\rightarrow} = \min$ για κανόνες τύπου Mamdani [10].

Έστω ότι το πραγματικό μέσο πλεόνασμα του τελικού προϊόντος είναι mx^* , το σφάλμα του πλεονάσματος ex^* και το σχετικό σφάλμα του WIP, ew^* . Οι αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής είναι $\mu_{MX}^*(mx)$, $\mu_{EX}^*(ex)$ και $\mu_{EW}^*(ew)$. Η συνάρτηση συμμετοχής για τη συνένωση των τριών εισόδων, όπου ΚΑΙ=min είναι:

$$\mu_{AND}^*(mx, ex, ew) = \mu_{MEX}^*(mx) \wedge \mu_{EX}^*(ex) \wedge \mu_{EW}^*(ew) \quad (7)$$

Το *άνω όριο του διορθωτικού συντελεστή* u_c^* , δηλαδή η πράξη ελέγχου που διενεργείται κάθε χρονική στιγμή δίδεται από τον τύπο:

$$u_c^* = \frac{\sum u_c \cdot \mu_{U_c}^*(u_c)}{\sum \mu_{U_c}^*(u_c)}$$

όπου $\mu_{U_c}^*(u_c)$, είναι η συνάρτηση συμμετοχής του αθροιστικού άνω ορίου του διορθωτικού συντελεστή, και υπολογίζεται εφαρμόζοντας τη σύνθεση max-min στα αποτελέσματα των σχέσεων (6) και (7). Έτσι είναι:

$$\mu_{U_c}^*(u_c) = \max_{mx, ex, ew} \min[\mu_{AND}^*(mx, ex, ew), \mu_{FR^{(k)}}(mx, ex, ew, u_c)]$$

Το ασαφές σύστημα που αναπαριστά την δεύτερη έξοδο του ασαφούς ελεγκτή έχει την ίδια μορφή.

Εφόσον, ένα σύστημα παραγωγής που παράγει περισσότερα του ενός προϊόντα μπορεί να αποσυναρμολογηθεί σε συστήματα που παράγουν ένα προϊόν, αυτό σημαίνει ο αριθμός των επιβλεπόντων ελεγκτών θα είναι ίσος με τον αριθμό των προϊόντων που παράγονται από το σύστημα.

γ) Συμπεράσματα: Στην εργασία [3], παρουσιάζεται ένας επιβλέπων ασαφής ελεγκτής, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ρύθμιση των κατανεμημένων ελεγκτών που παρουσιάστηκαν στην εργασία [1]. Η ρύθμιση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται σε χαμηλό επίπεδο τόσο το σύνολο των ημιτελών προϊόντων που βρίσκονται στο σύστημα, όσο και η ανικανοποίητη ζήτηση που συνδέεται άμεσα με την ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εφαρμόστηκε σε συστήματα παραγωγής που παρήγαγε τρία (3) διαφορετικά προϊόντα, ενώ ήταν επιτρεπτή η διέλευση των κομματιών από τις μηχανές περισσότερες της μίας φορές. Η προσομοίωση, έδωσε αποτελέσματα που φανερώνουν σαφή βελτίωση της απόδοσης του συστήματος καθώς και μείωση των κοστών που συνδέονται με την παραγωγή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, στόχος των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν είναι η ικανοποίηση των προθεσμιών παράδοσης (Due Dates) των εισερχόμενων παραγγελιών και παράλληλα η ελαχιστοποίηση του κόστους της παραγωγικής διαδικασίας. Η δυσκολία στην ελαχιστοποίηση του κόστους έγγειται κυρίως στους αντικρουόμενους παράγοντες που το συνθέτουν. Στην παρούσα εργασία οι συνιστώσες του κόστους που έχουν ληφθεί υπόψιν είναι οι εξής:

1) Το μέσο κόστος ανικανοποίητης ζήτησης (Backlog Cost): είναι το κόστος που επιβαρύνει το σύστημα παραγωγής, όταν αυτό δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις εισερχόμενες παραγγελίες μέσα στις καθορισμένες προθεσμίες παράδοσης τους. Εξαρτάται από την ποσότητα της παραγγελίας της οποίας η παράδοση καθυστερεί και από τη χρονική διάρκεια της καθυστέρησης. Επιπλέον, στον υπολογισμό του υπεισέρχεται και το μοναδιαίο κόστος ανικανοποίητης ζήτησης.

$$MBC = \frac{\sum_0^i \max[(t_i - t_{DD}) \cdot V_i \cdot C_B], 0]}{T_{SIM}} \quad (1)$$

όπου :

MBC (MeanBacklogCost): μέσο κόστος ανικανοποίητης ζήτησης

t_i : ο χρόνος ολοκλήρωσης της παραγγελίας i

t_{DD} : ο χρόνος παράδοσης της παραγγελίας i

V_i : ο όγκος της παραγγελίας i

C_B : το μοναδιαίο κόστος ανικανοποίητης ζήτησης

T_{SIM} : ο χρόνος προσομοίωσης

2) Το μέσο κόστος αποθέματος (Work-In-Proccess Cost) : είναι το κόστος που σχετίζεται με την ποσότητα των ημιτελών προϊόντων που διατηρούνται μέσα στο σύστημα παραγωγής. Υπολογίζεται αθροίζοντας τις ποσότητες ημιτελών προϊόντων που βρίσκονται στις ενδιάμεσες αποθήκες του συστήματος. Η ποσότητα αυτή πολλαπλασιάζεται με το μοναδιαίο κόστος αποθέματος:

$$\overline{WIPCost} = \frac{\int_0^t WIP(t) \cdot C_W}{T_{SIM}} \quad (2)$$

$\overline{WIPCost}$: μέσο κόστος αποθέματος (ή μέσο κόστος ημιτελών προϊόντων)

$WIP(t)$: τα ημιτελή προϊόντα στο σύστημα τη χρονική στιγμή t

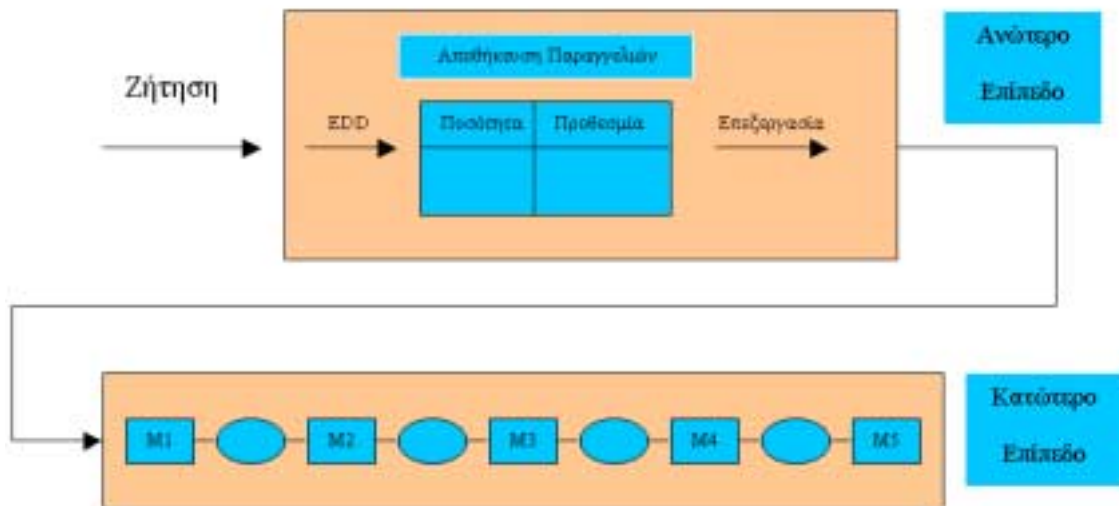
C_W : μοναδιαίο κόστος αποθέματος

T_{SIM} : ο χρόνος προσομοίωσης

Η σύγκρουση ανάμεσα στα δύο κόστη έγγειται, στο ότι προσπαθώντας το σύστημα να ελαχιστοποιήσει την ανικανοποίητη ζήτηση, παράγει με μεγαλύτερους ρυθμούς και κατά συνέπεια ανεβαίνει η στάθμη των ενδιάμεσων αποθηκών. Έτσι, ναι μεν μειώνεται το κόστος της ανικανοποίητης ζήτησης, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει το κόστος αποθέματος. Αντίστοιχα, το σύστημα παράγει με χαμηλότερους ρυθμούς, με στόχο τη μείωση του αποθέματος, όταν αυτό συσσωρεύεται στις αποθήκες, γεγονός που έχει ως συνέπεια την εμφάνιση ανικανοποίητης ζήτησης. Το άθροισμα αυτών των δύο ανταγωνιστικών παραγόντων συνιστά το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας, το οποίο είναι άμεσα εξαρτημένο από τις παραμέτρους του συστήματος όπως οι ρυθμοί των μηχανών, οι χωρητικότητες των αποθηκών κ.τ.λ.

Οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία, επιδιώκουν με ευρετικούς τρόπους να προτείνουν έναν τρόπο λειτουργίας του συστήματος που τείνει να ελαχιστοποιήσει το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας.

Το δομικό διάγραμμα των μεθοδολογιών ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Το κατώτερο επίπεδο περιλαμβάνει πέντε (5) μηχανές σε σειρά (□) με ενδιάμεσους αποθηκευτικούς χώρους (○) περιορισμένης χωρητικότητας. Ένα ημιτελές προϊόν, αφού ολοκληρωθεί η κατεργασία του από κάποια μηχανή του συστήματος, αναμένει στην αποθήκη που έπεται έως ότου ξεκινήσει η κατεργασία του από την επόμενη μηχανή. Η παραγωγική διαδικασία παρεμποδίζεται από τυχαίες βλάβες που συμβαίνουν στις μηχανές με αποτέλεσμα να είναι άλλοτε αποκλεισμένες και άλλοτε αποστερημένες. Στο επίπεδο των μηχανών εφαρμόζεται κατανεμημένος ασαφής έλεγχος,



Σχήμα 4.1: Δομή συστήματος παραγωγής για ΜΕΘ.1 & ΜΕΘ.2

ο οποίος έχει ως στόχο να αποτρέψει τους αποκλεισμούς και τις αποστερήσεις των μηχανών, με απώτερη επιδίωξη τη διατήρηση του παραγωγικού πλεονάσματος και του χρόνου παραμονής των ημιτελών προϊόντων στο σύστημα σε χαμηλά επίπεδα. Το κατώτερο επίπεδο του συστήματος είναι πανομοιότυπο με αυτό που αναπτύχθηκε στην

εργασία [1] και η λειτουργία του περιγράφεται αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο (παράγραφος 3.2).

Το ανώτερο επίπεδο περιλαμβάνει το μηχανισμό υποδοχής και αποθήκευσης των εισερχόμενων παραγγελιών. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία, διαφορετική σε κάθε μεθοδολογία, – περιγράφεται αναλυτικά στις παραγράφους 4.2, 4.3, 4.4 – η ζήτηση τροφοδοτείται με τη μορφή ρυθμού παραγωγής στις μηχανές του κατώτερου επιπέδου.

Οι παραγγελίες εισέρχονται στο σύστημα και κατατάσσονται με βάση το πρωτόκολλο EDD (Earliest Due Date). Αυτό σημαίνει ότι την πρώτη θέση της λίστας παραγγελιών, καταλαμβάνει η παραγγελία με τη μικρότερη προθεσμία παράδοσης ή αλλιώς η πλέον επείγουσα παραγγελία. Η συγκεκριμένη παραγγελία θα φύγει από την πρώτη θέση της λίστας παραγγελιών, όταν ικανοποιηθεί από το σύστημα ή σε περίπτωση άφιξης πιο επείγουσας παραγγελίας.

Για κάθε θέση i της λίστας παραγγελιών, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του *φόρτου* (Load) του συστήματος. Η φόρτιση προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$Load_{(i)} = \frac{\sum_0^i Vol_{(i)}(t) - \sum ProdVol(t)}{DD_{(i)} - t} \quad (3)$$

όπου :

$\sum_0^i Vol_{(i)}(t)$: η αθροιστική ζήτηση του συστήματος έως τη θέση i της λίστας παραγγελιών

τη χρονική στιγμή t

$\sum ProdVol(t)$: η αθροιστική παραγωγή του συστήματος τη χρονική στιγμή t

$DD_{(i)} - t$: το χρονικό περιθώριο (slack) για την έγκαιρη ικανοποίηση της παραγγελίας i , όπου ο όρος $DD_{(i)}$ συμβολίζει την *προθεσμία παράδοσης* (Due Date) της παραγγελίας (i) και t ο χρόνος προσομοίωσης.

Ο αριθμητής του κλάσματος της εξίσωσης (3) είναι η μαθηματική έκφραση του όγκου των παραγγελιών, έως τη θέση i της λίστας παραγγελιών, που απομένει να ικανοποιηθεί από το σύστημα παραγωγής. Διαιρώντας τον αριθμητή με το χρονικό περιθώριο (slack) $DD_{(i)} - t$, προκύπτει ο ρυθμός με τον οποίο πρέπει να παράγει το σύστημα παραγωγής για να ικανοποιήσει όλες τις προθεσμίες παράδοσης των παραγγελιών, που έχουν καταταχτεί έως τη θέση i της λίστας παραγγελιών. Συνεπώς το φορτίο ή φόρτιση του συστήματος (3) είναι το μέγεθος που εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο πρέπει να παράγει το σύστημα παραγωγής ώστε να μην επιτραπεί ανικανοποίητη ζήτηση.

Η φόρτιση του συστήματος υπολογίζεται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης και παίζει καθοριστικό ρόλο όσον αφορά στις ΜΕΘ.1 και ΜΕΘ.2.

Για την προσομοίωση της τυχαίας ζήτησης, χρησιμοποιήθηκαν γεννήτριες τυχαίων αριθμών, οι οποίες παράγουν αριθμούς που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται :

- 1) η στιγμή της άφιξης ή μη άφιξης της παραγγελίας
- 2) η ποσότητα της παραγγελίας και
- 3) η προθεσμία παράδοσης της παραγγελίας.

Οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν, συγκρίνονται μεταξύ τους και με τη μεθοδολογία της παραγωγής στο μέγιστο δυνατό (produce-at-capacity), δηλαδή με ένα σύστημα το οποίο παράγει είτε στο μέγιστο (όταν υπάρχει παραγγελία που δεν έχει ικανοποιηθεί), είτε καθόλου (όταν έχουν ικανοποιηθεί όλες οι παραγγελίες).

Οι υποθέσεις που γίνονται κατά την προσομοίωση των δικτύων παραγωγής που μελετούμε είναι οι παρακάτω:

1. Οι μηχανές χαλάνε με ρυθμό p_i για τον οποίο ισχύει η σχέση $\frac{1}{p_i} = \frac{1-a}{a} \times \frac{1}{k}$, όπου k : ο αριθμός των βημάτων της προσομοίωσης σε κάθε χρονική μονάδα και a : η πιθανότητα βλάβης για κάθε βήμα προσομοίωσης.

2. Οι μηχανές επισκευάζονται με ρυθμό pr_i .
3. Ο χρόνος μέχρι να χαλάσει μία μηχανή και ο χρόνος μέχρι να επιδιορθωθεί είναι γεωμετρικά κατανεμημένοι.
4. Όλες οι μηχανές παράγουν σε γνωστούς, αλλά όχι αναγκαστικά ίσους ρυθμούς. Κάθε μηχανή παράγει σε ένα ρυθμό $r_i \leq \mu_i$, όπου μ_i είναι ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής της μηχανής M_i .
5. Οι αρχικές αποθήκες είναι ανεξάντλητες πηγές ακατέργαστων προϊόντων και συνεπώς οι αρχικές μηχανές δεν μένουν ποτέ αποστερημένες.
6. Η τελευταία αποθήκη έχει άπειρη δυνατότητα αποθήκευσης και έτσι η τελευταία μηχανή δεν είναι ποτέ αποκλεισμένη.
7. Οι αποθήκες μεταξύ διπλανών μηχανών M_i, M_j έχουν πεπερασμένες χωρητικότητες $BC_{ij} \quad i,j=1,\dots,N$
8. Οι χρόνοι φόρτωσης και μεταφοράς θεωρούνται αμελητέοι ή συμπεριλαμβάνονται στους χρόνους κατεργασίας.

4.2 ΜΕΘ.1 : Υπολογισμός Μέγιστης Φόρτισης

Στην προηγούμενη παράγραφο, έγινε αναφορά στη φόρτιση του συστήματος και παρουσιάστηκε ο τρόπος που υπολογίζεται για κάθε θέση της λίστας παραγγελιών. Με τη ΜΕΘ.1, αφού γίνουν οι υπολογισμοί της φόρτισης σε κάθε θέση i της λίστας, επιλέγεται η μέγιστη φόρτιση, όπως προέκυψε από την εξίσωση (3) και αυτή τροφοδοτείται στο κατώτερο επίπεδο, δηλαδή:

$$\text{Ζήτηση} = \max \Phi \text{όρτος}(i) , \forall i=0,1,\dots,n$$

Οι μηχανές του κατώτερου επιπέδου θεωρούν τη μέγιστη φόρτιση ως το ρυθμό με τον οποίο πρέπει να παράγουν για να καλύψουν τη ζήτηση. Πράγματι, αν οι μηχανές παράγουν με ρυθμό ίσο με τη μέγιστη φόρτιση, είναι βέβαιο ότι η ζήτηση θα καλυφθεί μακροπρόθεσμα και δεν θα εμφανισθούν φαινόμενα ανικανοποίητης ζήτησης. Κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να επιτευχθεί μακροπρόθεσμα, γιατί την παραγωγική διαδικασία

την παρεμποδίζουν οι τυχαίες βλάβες των μηχανών και επομένως ο συνολικός ρυθμός του συστήματος δεν μπορεί να προσεγγίσει το μέγιστο φόρτο.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου, είναι ότι εξασφαλίζεται η ικανοποίηση της ζήτησης, σε περίπτωση επίτευξης του ρυθμού παραγωγής που αντιστοιχεί στη μέγιστη φόρτιση. Αντίθετα, επειδή το σύστημα παραγωγής ικανοποιεί τη ζήτηση μακροπρόθεσμα, η μέθοδος αυτή έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μεγάλου αποθέματος κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Κατά συνέπεια, το μέσο κόστος αποθέματος (2) είναι ιδιαίτερα αυξημένο όταν το σύστημα λειτουργεί με αυτή τη λογική.

4.3 ΜΕΘ.2 : Σύγκριση Μέγιστης Φόρτισης & Δυναμικότητας

Η ΜΕΘ.2 συγκρίνει το μέγιστο φόρτο, που υπολογίζεται όπως στην ΜΕΘ.1, με την δυναμικότητα του συστήματος. Η σύγκριση είναι της μορφής:

$$AN \max \Phi \text{όρτος}(i) > \Delta \text{υναμικότητα } TOTE \text{ Ζήτηση} = \Delta \text{υναμικότητα} \\ AΛΛΙΩΣ \text{ Ζήτηση} = \Phi \text{όρτος}(1)$$

όπου:

Φόρτος (1) : το φορτίο της παραγγελίας που βρίσκεται στην πρώτη θέση της λίστας παραγγελιών, δηλαδή της πιο επείγουσας παραγγελίας

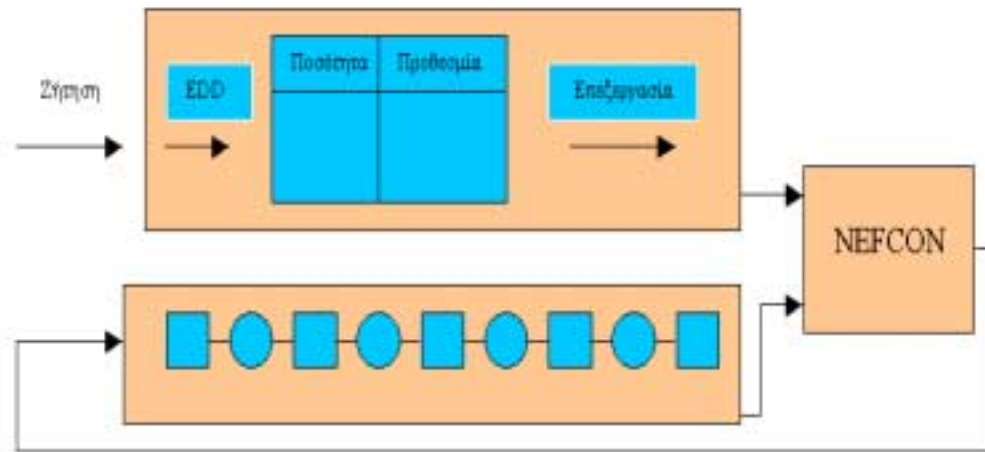
Με άλλα λόγια, εάν ο μέγιστος φόρτος υπερβαίνει τη δυναμικότητα του συστήματος, τότε δίδεται η εντολή στις μηχανές να παράγουν στο μέγιστο δυνατό. Σε αντίθετη περίπτωση, οι μηχανές θα παράγουν με το ρυθμό που απαιτείται για να ικανοποιηθεί η παραγγελία που βρίσκεται στην πρώτη θέση της λίστας παραγγελιών, δηλαδή η πιο επείγουσα παραγγελία.

Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η αλόγιστη παραγωγή σε χρονικά σημεία όπου η ζήτηση δεν το απαιτεί. Το σύστημα παράγει με σκοπό να ικανοποιήσει την παραγγελία που καταλαμβάνει την πρώτη θέση στη λίστα παραγγελιών και όταν ανιχνεύσει ότι για να καλυφθεί μακροπρόθεσμα η ζήτηση απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός, παράγει στα επίπεδα της δυναμικότητας του.

4.4 ΜΕΘ.3 : Νεύρο-Ασαφής Έλεγχος (NEFCON)

Στόχος της τρίτης μεθοδολογίας, είναι να διαπιστώσει εάν ένας νεύρο-ασαφής ελεγκτής, ο οποίος δέχεται ως εισόδους παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του συστήματος, μπορεί να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία του συστήματος σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι συμβαίνει με τις ΜΕΘ.1 και ΜΕΘ.2.

Η δομή του συστήματος, με την είσοδο του νεύρο-ασαφούς ελεγκτή (Σχήμα 4.2), είναι ελαφρώς διαφοροποιημένη, σε σχέση με αυτήν των δύο προαναφερθέντων μεθοδολογιών (Σχήμα 4.1).

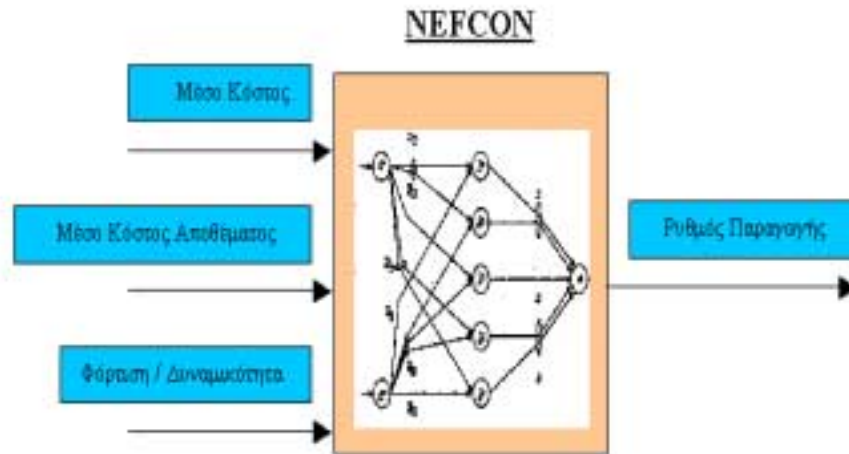


Σχήμα 4.2: Δομή συστήματος παραγωγής με νεύρο-ασαφή ελεγκτή

Ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε, ονομάζεται NEFCON [4] (Σχήμα 4.3) και η λειτουργία του περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.4.3. Οι εισοδοί του ελεγκτή είναι

- Το μέσο κόστος της παραγωγικής διαδικασίας (MeanCost)
- Το μέσο κόστος αποθέματος (MeanWipCost)
- Ο λόγος της φόρτισης προς τη δυναμικότητα του συστήματος (Load/Capacity)

Η έξοδος του ελεγκτή τροφοδοτεί απευθείας τις μηχανές του κατώτερου επιπέδου, αφού είναι ο ρυθμός με τον οποίο πρέπει να παράγουν για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση.



Σχήμα 4.3: Νεύρο-ασαφής ελεγκτής NEFCON

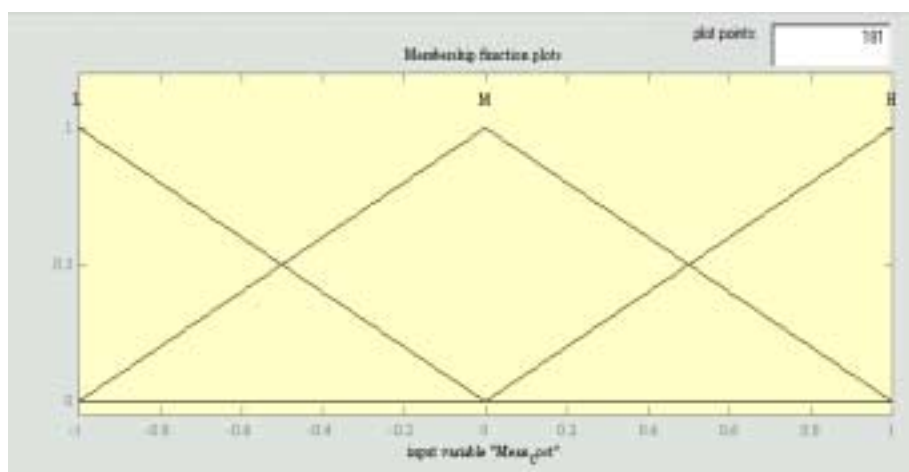
Στα νεύρο-ασαφή συστήματα η διαδικασία μάθησης καθοδηγείται από μία συνάρτηση σφάλματος. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία, ως συνάρτηση σφάλματος επιλέχθηκε το μέσο κόστος. Η επιλογή αυτή αιτιολογείται από το ότι το βασικό κριτήριο αξιολόγησης των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν, είναι το μέσο κόστος της παραγωγικής διαδικασίας και επομένως αυτό καθοδηγεί τη διαδικασία μάθησης

Ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής NEFCON, απαιτεί την ρύθμιση των παραμέτρων, που καθοδηγούν τη διαδικασία μάθησης και βελτιστοποίησης των κανόνων. Στη συνέχεια παρατίθενται οι ρυθμίσεις των παραμέτρων που πραγματοποιήθηκαν πριν αρχίσει η διαδικασία μάθησης και βελτιστοποίησης της βάσης κανόνων του νέου ελεγκτή :

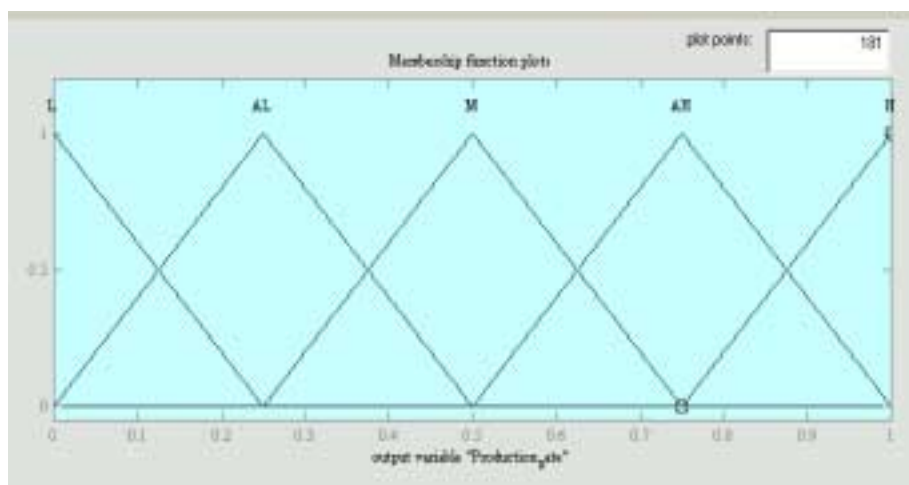
A) Φάση μάθησης της βάσης κανόνων

Το σύστημα ξεκινά να μαθαίνει τους κανόνες από το μηδέν, δηλαδή αρχικά η βάση είναι εντελώς κενή, αφού έχει γίνει επιλογή του αλγόριθμου μάθησης κενής βάσης (Bottom-Up Algorithm). Επίσης, σε αυτή τη φάση καθορίζεται ο αριθμός καθώς και η

μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής, για τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου. Έτσι, ορίζονται τρεις (3) συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές εισόδου και πέντε (5) για την μεταβλητή εξόδου, όλες τριγωνικής μορφής. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου *Μέσο Κόστος*, ενώ στο Σχήμα 4.5 απεικονίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής για την έξοδο *Ρυθμός Παραγωγής*.



Σχήμα 4.4 : Συναρτήσεις συμμετοχής για τη μεταβλητή «Μέσο Κόστος»
(L:Low, M:Medium, H:High)



Σχήμα 4.5 : Συναρτήσεις συμμετοχής για τη μεταβλητή εξόδου
«Ρυθμός Παραγωγής»
(L:Low, AL: Almost Low, M:Medium, AH:Almost High, H:High)

Επιπλέον, απαιτείται ο ορισμός του ρυθμού της μάθησης, ο οποίος κυμαίνεται – σύμφωνα με τους κατασκευαστές του ελεγκτή – από 0,5 έως 2. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή καθορίστηκε στο 0,5. Όσο πιο μικρός είναι ο ρυθμός μάθησης, τόσο πιο αργά συγκλίνει ο αλγόριθμος μάθησης του NEFCON στη βέλτιστη βάση κανόνων, αλλά και τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα η βάση αυτή να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντίθετα, μεγάλος ρυθμός μάθησης, συνεπάγεται αυξημένη ταχύτητα μάθησης και βελτιστοποίησης της βάσης κανόνων, αλλά και μεγαλύτερη αβεβαιότητα για την αποτελεσματικότητα αυτής της βάσης.

Σημαντικό ρόλο παίζει και το γεγονός ότι αφήνεται το περιθώριο στον ελεγκτή, να «απομακρύνει» από τη βάση εκείνους τους κανόνες, που χρησιμοποιούνται λιγότερο από 1% της διάρκειας της μάθησης. Τέλος, ο χρήστης καθορίζει το χρόνο που διαρκεί η μάθηση, η οποία χωρίζεται σε δύο φάσεις, είτε σε χρονικές μονάδες, είτε σε χρονικούς κύκλους.

Β) Φάση βελτιστοποίησης της βάσης κανόνων

Για τη φάση της βελτιστοποίησης της βάσης κανόνων, επιλέχθηκε ο αλγόριθμος NEFCON II, ο οποίος, εκτός της συνάρτησης σφάλματος, λαμβάνει υπόψιν του και τη μεταβολή αυτής της συνάρτησης. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα έχει μία εικόνα της τάσης που παρουσιάζει το βασικό κριτήριο που καθοδηγεί τη μάθηση. Επίσης, καθορίζεται εκ νέου, ο ρυθμός με τον οποίο βελτιστοποιείται η βάση των κανόνων (0,01 στη συγκεκριμένη εφαρμογή). Σημαντική παράμετρος στη διαδικασία βελτιστοποίησης, είναι η δυνατότητα του ελεγκτή να προσθέτει κανόνες στην βάση, όταν διαπιστώνει κενά στις ενέργειες ελέγχου που πραγματοποιεί. Τέλος, η διάρκεια της βελτιστοποίησης καθορίζεται σε τέσσερις (4) χρονικούς κύκλους.

Το σύστημα NEFCON, αφού ολοκληρώσει την παραπάνω διαδικασία, καταλήγει σε μία βάση κανόνων, δηλαδή σε έναν ελεγκτή ο οποίος καθοδηγεί το σύστημα προς την κατεύθυνση ελαχιστοποίησης του κόστους. Ο νέος ελεγκτής που προκύπτει, μετά από τη διαδικασία μάθησης και βελτιστοποίησης, δοκιμάζεται και εκτός γραμμής (offline), για να διαπιστωθεί εάν όντως οδηγεί το σύστημα προς την κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης του κόστους ή όχι.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, είναι ότι ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής λειτουργεί ως μαύρο κουτί, δηλαδή δεν μπορεί να ελεγχθεί η ορθότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης που ακολουθεί. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο σύστημα με τον νεύρο-ασαφή ελεγκτή, είναι πολύ πιο χρονοβόρα σε σχέση με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις δύο πρώτες μεθοδολογίες. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει την περαιτέρω διερεύνηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον Simulink της Matlab. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του δικτύου παραγωγής, όταν αυτό λειτουργεί με βάση τις ανεπτυγμένες μεθοδολογίες.

Οι μεθοδολογίες των οποίων η λογική αναλύθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, συγκρίνονται μεταξύ τους και με την μεθοδολογία της παραγωγής στο μέγιστο δυνατό (produce-at-capacity). Σύμφωνα με αυτήν τη μεθοδολογία, το σύστημα παράγει στο μέγιστο δυνατό όταν υπάρχει παραγγελία προς ικανοποίηση, ενώ δεν παράγει καθόλου όταν δεν υπάρχει κάποια παραγγελία στο σύστημα.

Για την πληρέστερη διερεύνηση του προβλήματος, αναπτύχθηκαν δύο σενάρια :

Σενάριο 1^ο : Κάθε παραγγελία που βρίσκεται στο σύστημα (είτε υπό εκτέλεση είτε εν αναμονή εκτέλεσης), αναχωρεί από αυτό μόνο εάν, έχει ικανοποιηθεί αλλά και έχει εκπνεύσει η προθεσμία παράδοσης της. Αυτό συνεπάγεται ότι ακόμη και αν το σύστημα ικανοποιήσει νωρίτερα από το προβλεπόμενο κάποια από τις παραγγελίες, αυτή θα αναχωρήσει μόνο εάν έχει εκπνεύσει η προθεσμία παράδοσης της.

Σενάριο 2^ο : Κάθε παραγγελία που ικανοποιείται από το σύστημα, αναχωρεί απευθείας από αυτό, ανεξάρτητα από την προθεσμία παράδοσης της.

Η αιτία για αυτήν τη διερεύνηση είναι ότι πολλές φορές δεν είναι επιθυμητή η ικανοποίηση μίας παραγγελίας νωρίτερα από την προβλεπόμενη χρονική στιγμή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το σύστημα τιμωρείται με επιπλέον κόστος αποθέματος που είναι αποτέλεσμα συσσωρευόμενων παραγγελιών σε αυτό.

Και για τα δύο σενάρια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με διαφορετικές μέσες τιμές ενδοαφιζιακών χρόνων των παραγγελιών. Με τις αλλαγές που

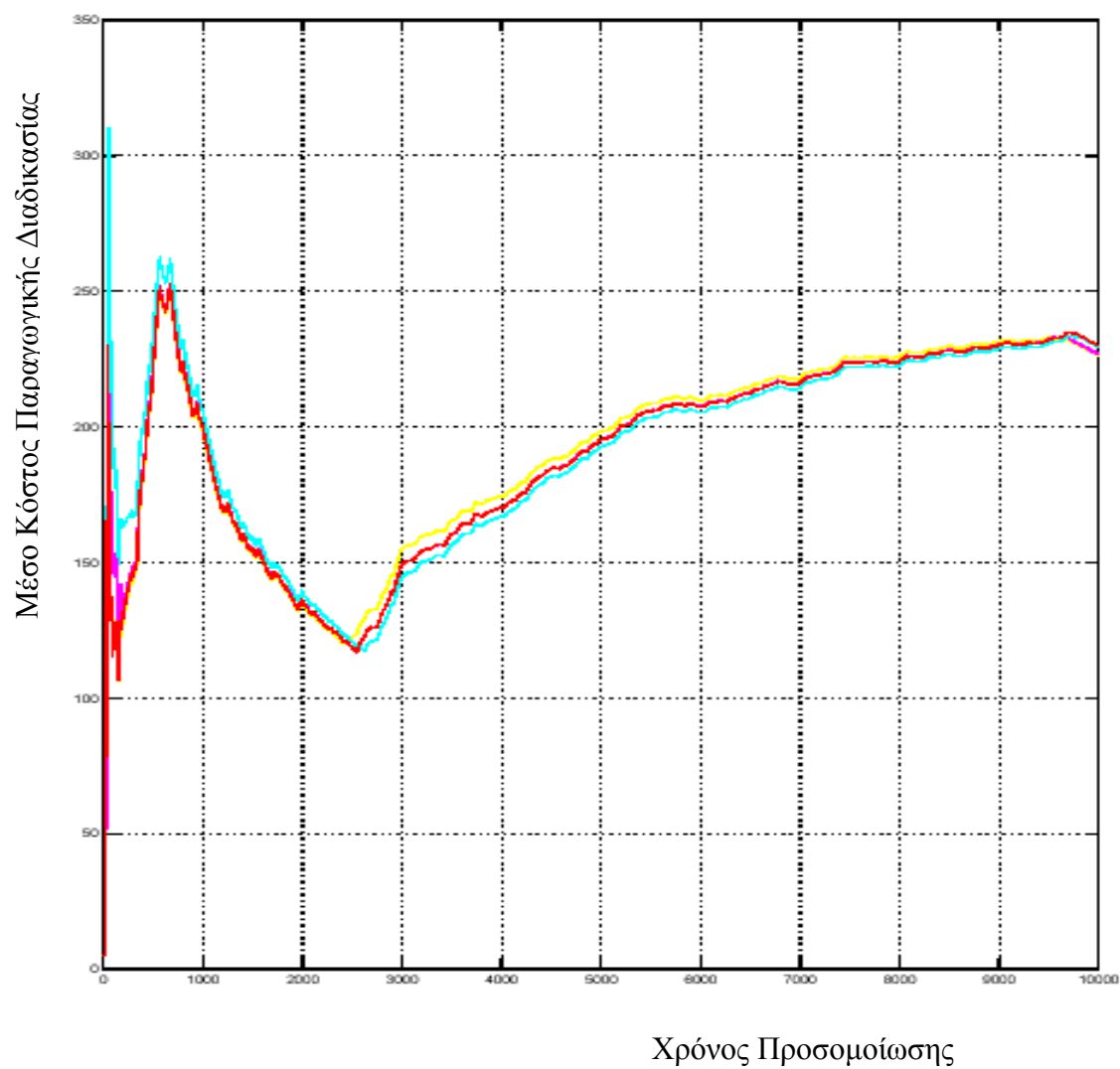
πραγματοποιήθηκαν στις παραμέτρους της γεννήτριας αφίξεων των παραγγελιών, επιδιώχθηκε η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά του συστήματος παραγωγής ανάλογα με την πυκνότητα των αφίξεων των παραγγελιών.

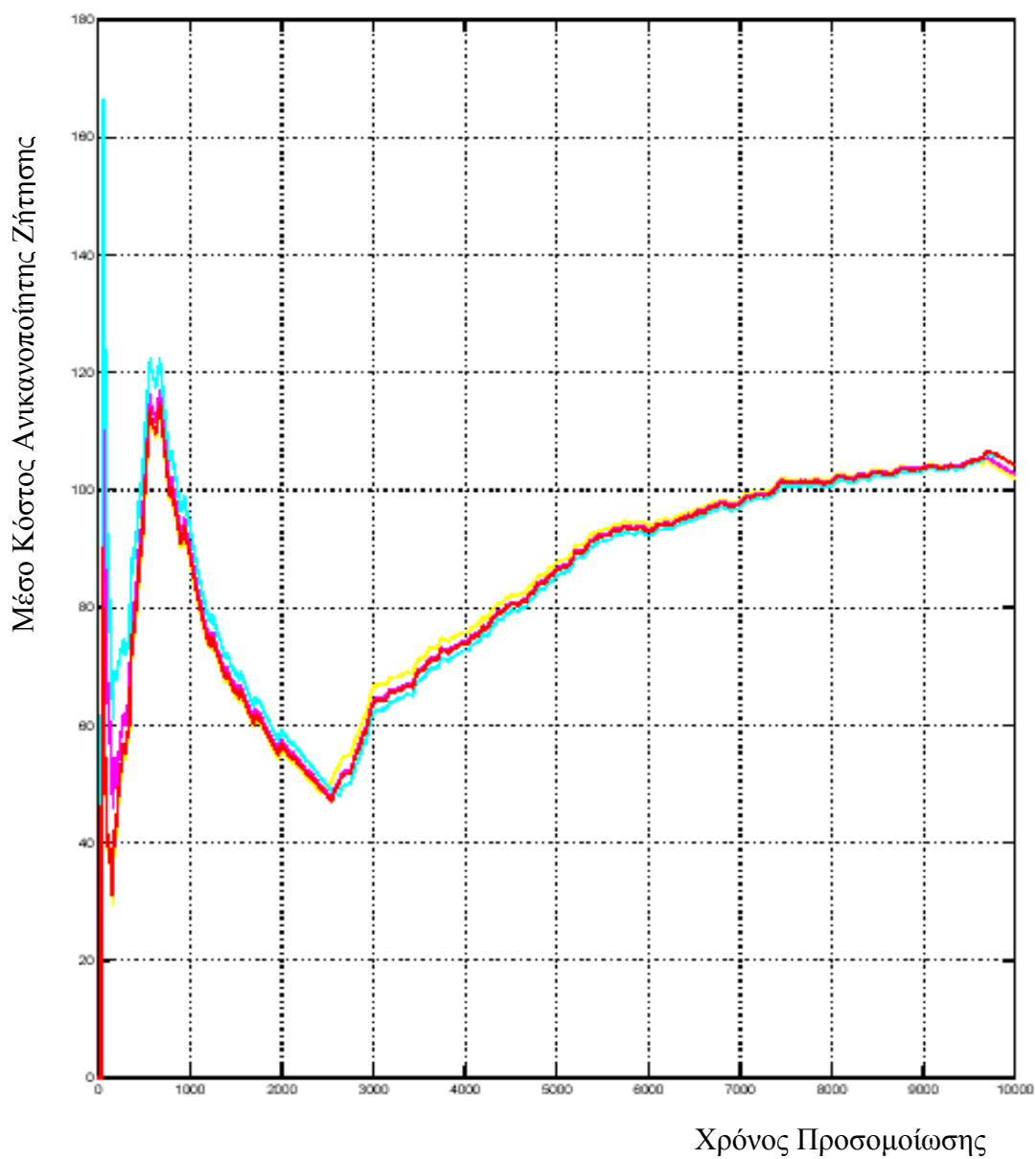
Πρέπει να σημειωθεί, ότι όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για το ίδιο χρονικό διάστημα (10.000 χρονικές μονάδες), ενώ η δυναμικότητα του συστήματος παρέμεινε σταθερή για όλες τις συγκρινόμενες μεθοδολογίες. Επίσης, διατηρήθηκαν σταθερές σε όλες τις επαναλήψεις, οι παράμετροι των γεννητριών τυχαίων αριθμών που αντιστοιχούν στις προθεσμίες παράδοσης και στις ποσότητες των παραγγελιών.

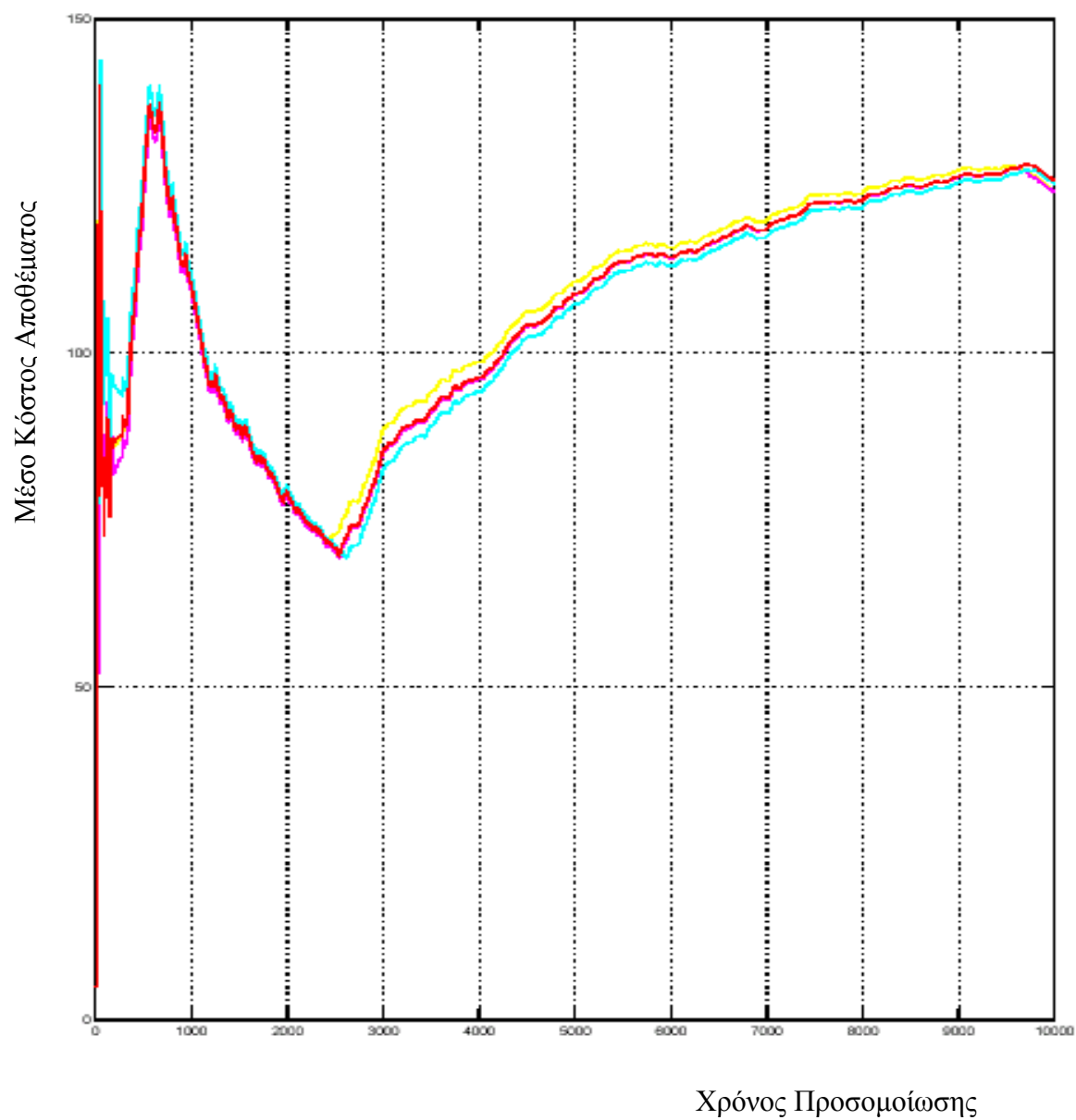
5.2 Σενάριο 1^ο

5.2.1 Αποτελέσματα

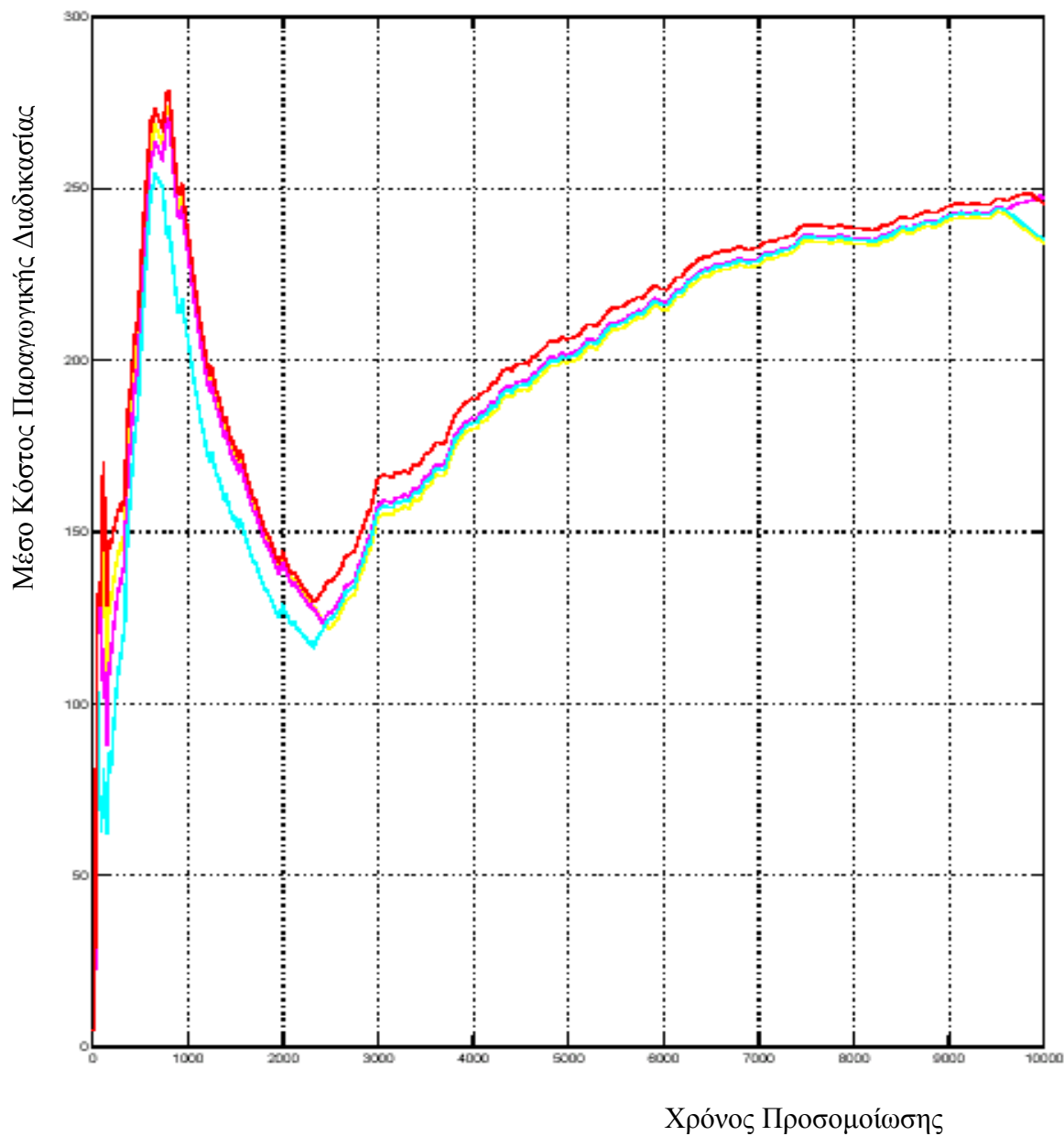
Α) Μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου = 20

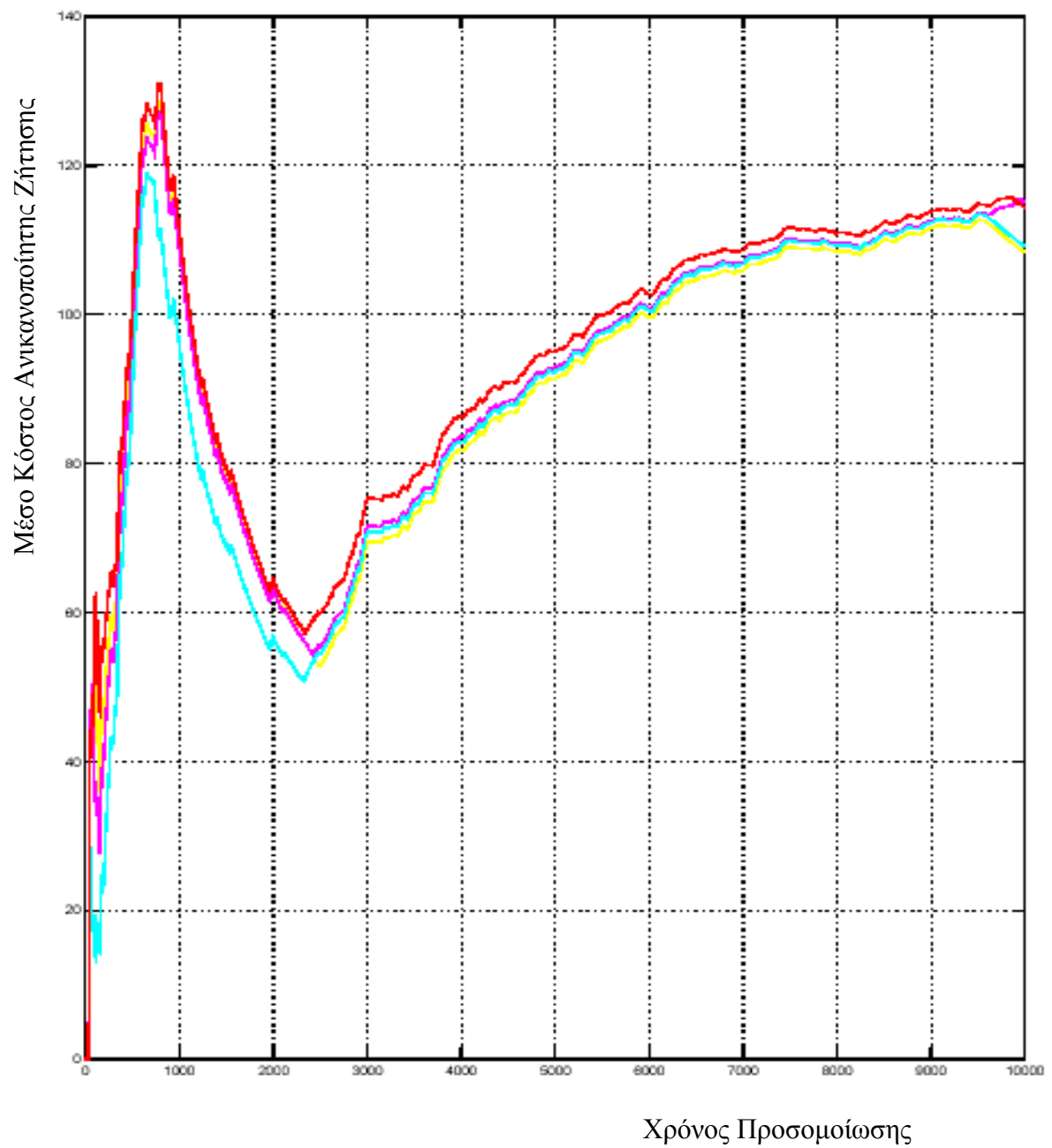


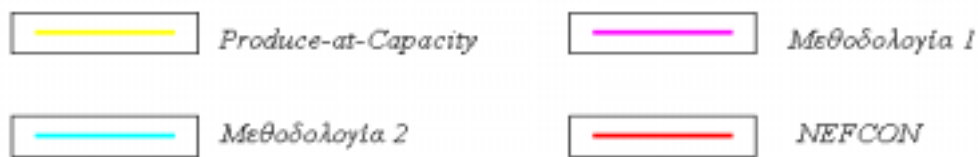
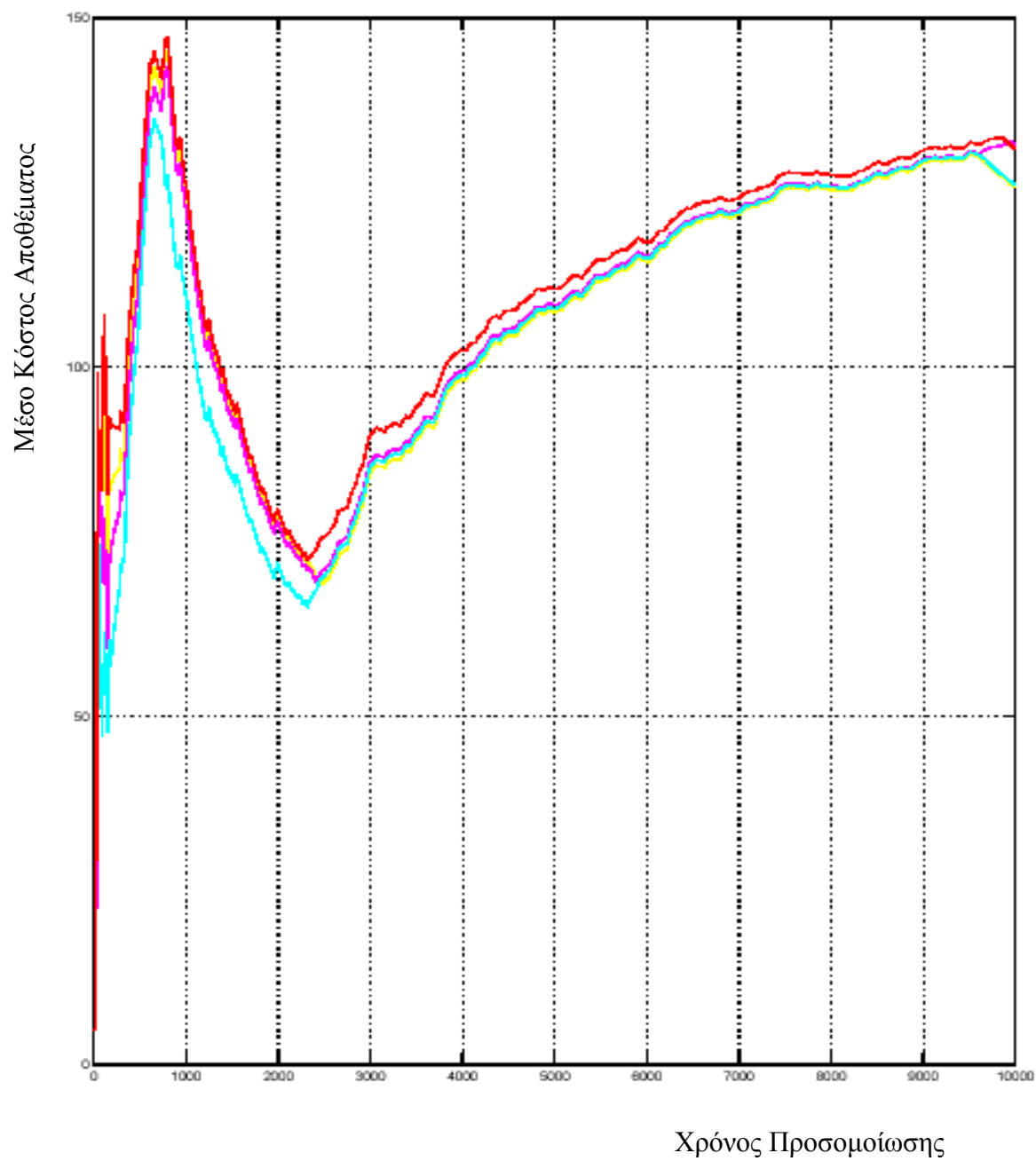




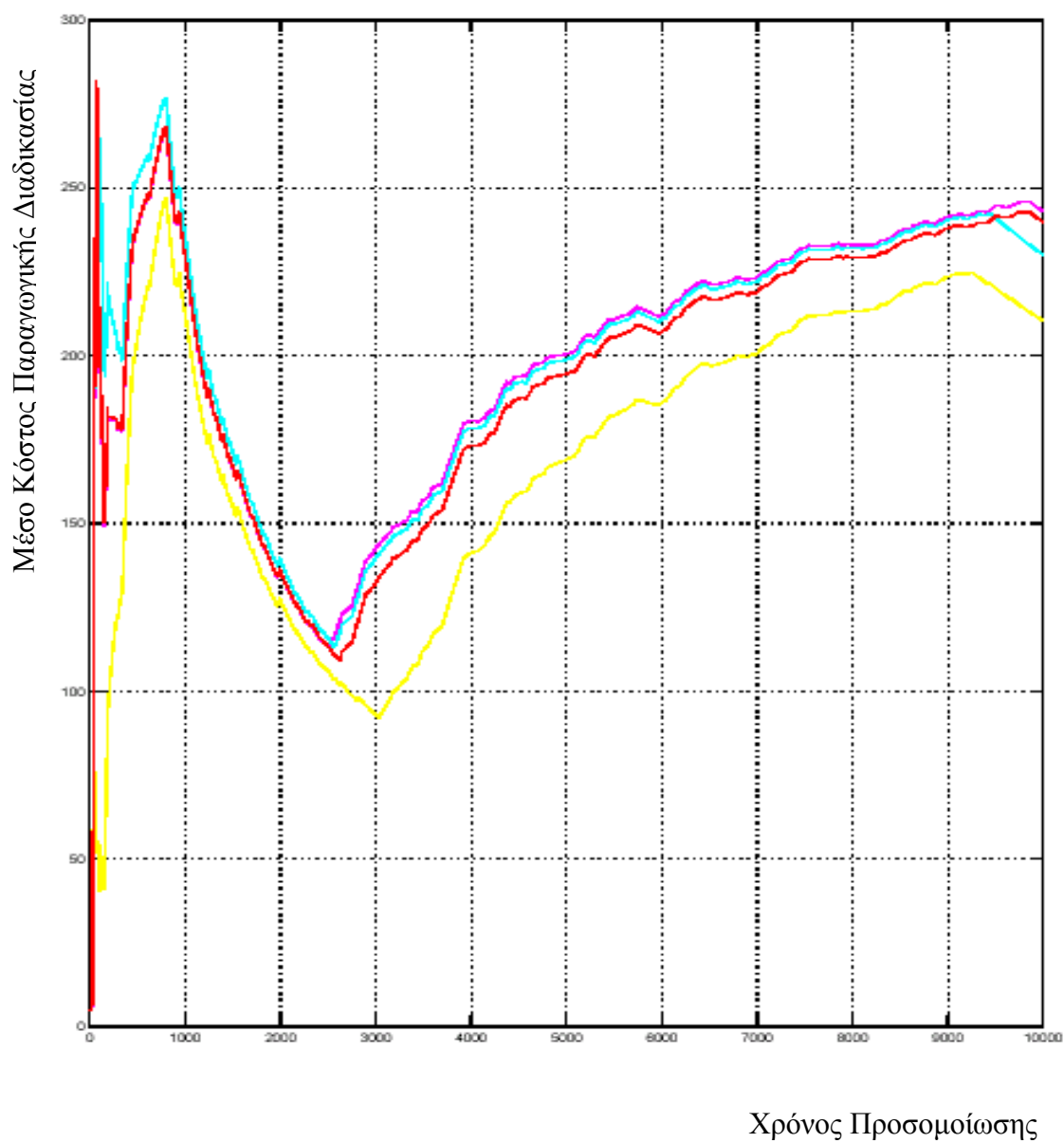
Β) Μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου = 30

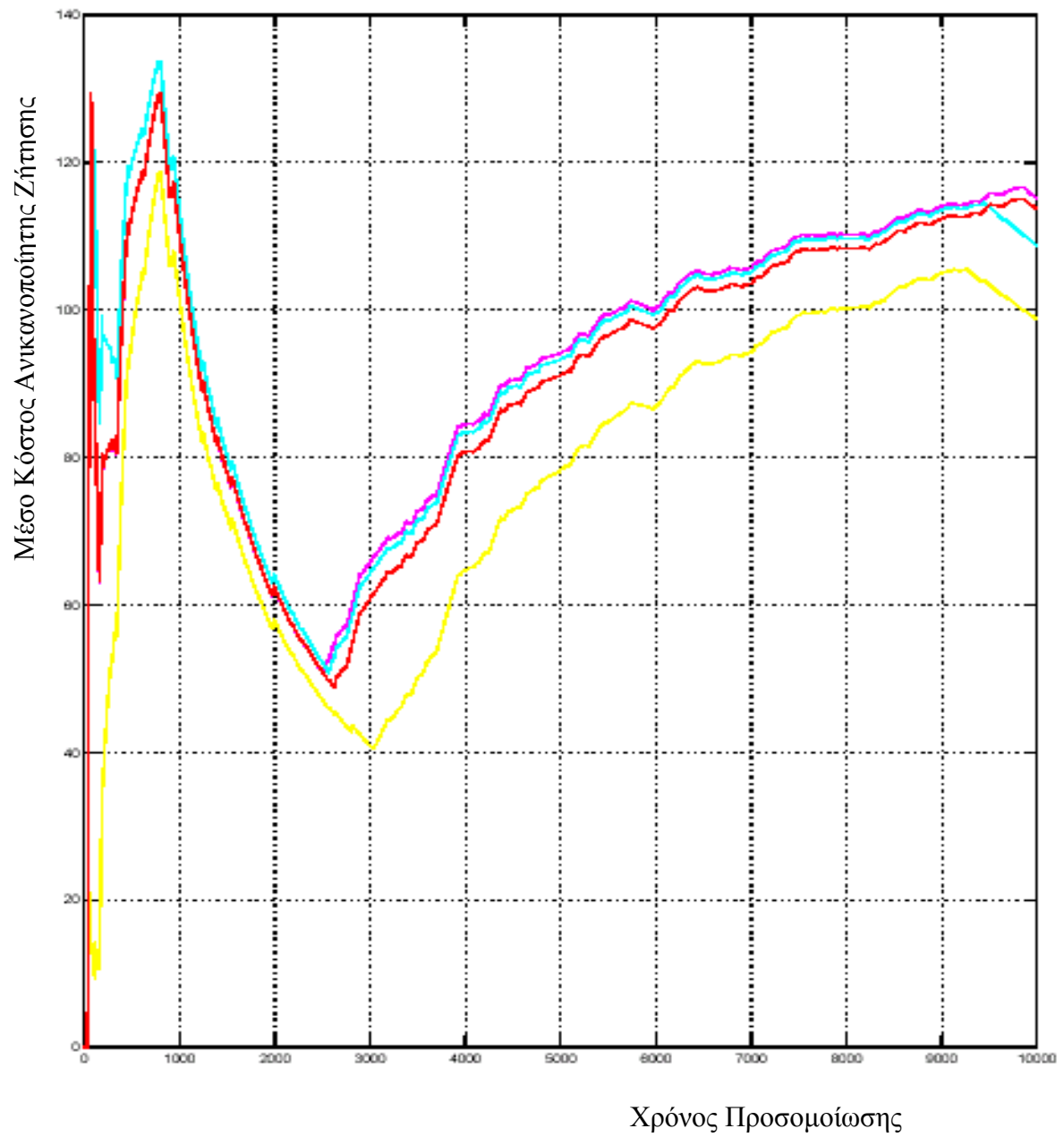


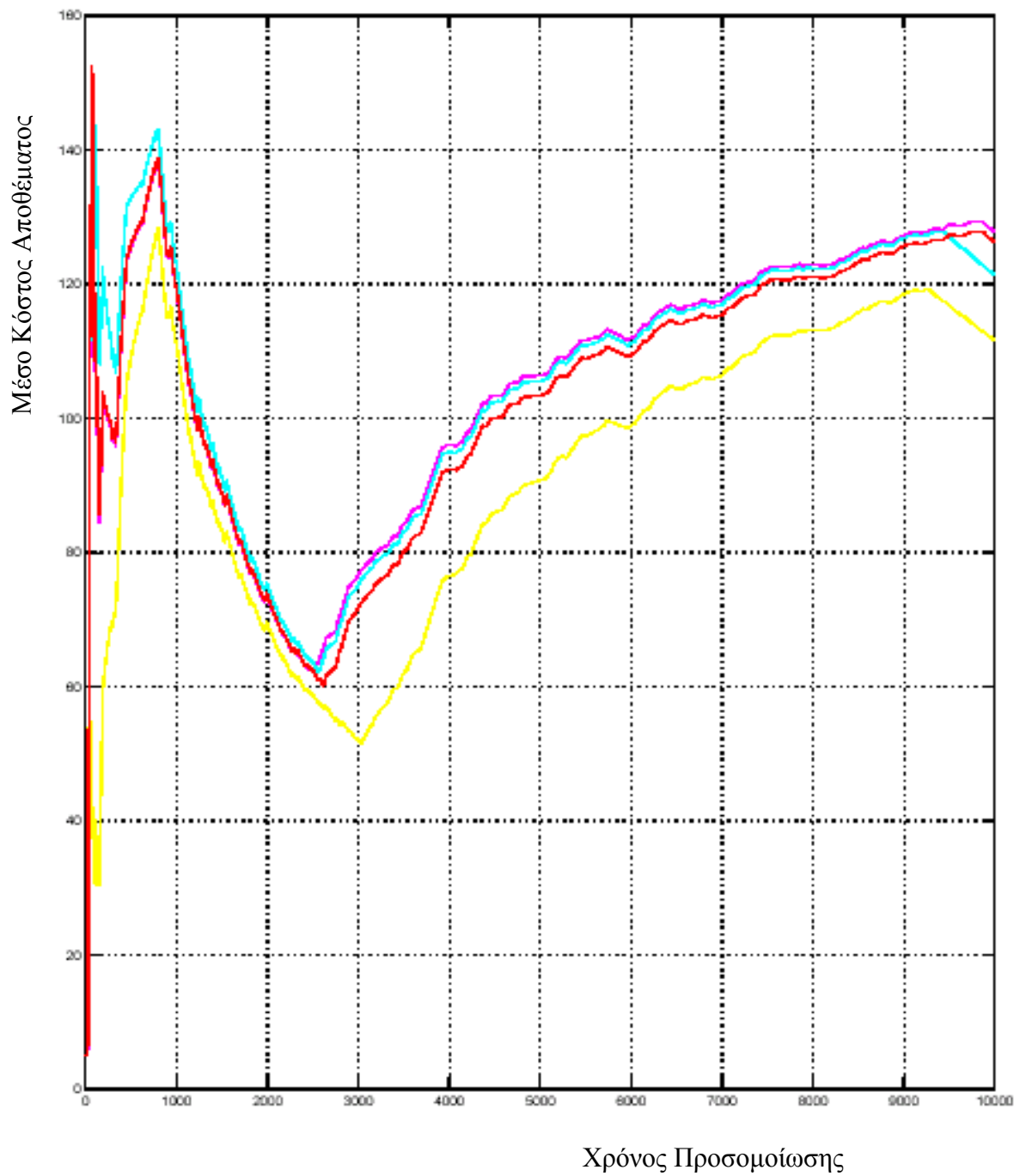




Γ) Μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου = 40







5.2.2 Συμπεράσματα

Από τα διαγράμματα που παρατέθηκαν για το πρώτο σενάριο διερεύνησης του προβλήματος, είναι εμφανές ότι το σύστημα συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με την πυκνότητα αφίξεων των παραγγελιών. Συνοψίζοντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα των άνωθι διαγραμμάτων εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- 1) Όταν ο ενδοαφιξιακός χρόνος των παραγγελιών είναι μικρός (μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου ≤ 20), όλες οι μεθοδολογίες που δοκιμάστηκαν δίνουν αποτελέσματα που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Ισχνή υπεροχή δείχνει να έχει η μεθοδολογία σύγκρισης της μέγιστης φόρτισης με τη δυναμικότητα του συστήματος, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους αποθέματος που παρουσιάζει, κάτι που αντικατοπτρίζεται και στη συνολική εικόνα του κόστους. Η παρόμοια συμπεριφορά των μεθοδολογιών, αιτιολογείται από το γεγονός ότι, λόγω αυξημένης ζήτησης, όλες οι μεθοδολογίες καθοδηγούν το σύστημα στο να παράγει όσο το δυνατό περισσότερο, να προσεγγίζει δηλαδή τη δυναμικότητα του. Η δυναμικότητα του συστήματος παραγωγής είναι ίδια για όλες τις μεθοδολογίες και για αυτό το λόγο οι διαφορές που απεικονίζονται είναι πολύ μικρές.
- 2) Για μεγαλύτερες τιμές ενδοαφιξιακού χρόνου (μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου=30), η ΜΕΘ.2 είναι εμφανώς αποδοτικότερη των υπολοίπων για ένα σημαντικό τμήμα της προσομοίωσης. Για τις πρώτες 2500 χρονικές μονάδες, εμφανίζει σαφώς μειωμένα κόστη αποθέματος και ανικανοποίητης ζήτησης σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην ευφυή διαχείριση της φόρτισης του συστήματος. Αντίθετα, η ΜΕΘ.3 (νεύρο-ασαφής έλεγχος από το σύστημα NEFCON) εμφανίζει αυξημένα κόστη αποθέματος και ανικανοποίητης ζήτησης με αποτέλεσμα να μην είναι ανταγωνιστική με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες.
- 3) Όσο αραιώνουν οι αφίξεις των παραγγελιών στο σύστημα, ο βασικός παράγοντας κόστους του συστήματος είναι το κόστος του αποθέματος, αφού η ζήτηση καλύπτεται ευκολότερα από όλες τις μεθοδολογίες. Το γεγονός ότι μία παραγγελία δεν μπορεί να αναχωρήσει από το σύστημα εάν δεν έχει εκπνεύσει η προθεσμία παράδοσης της,

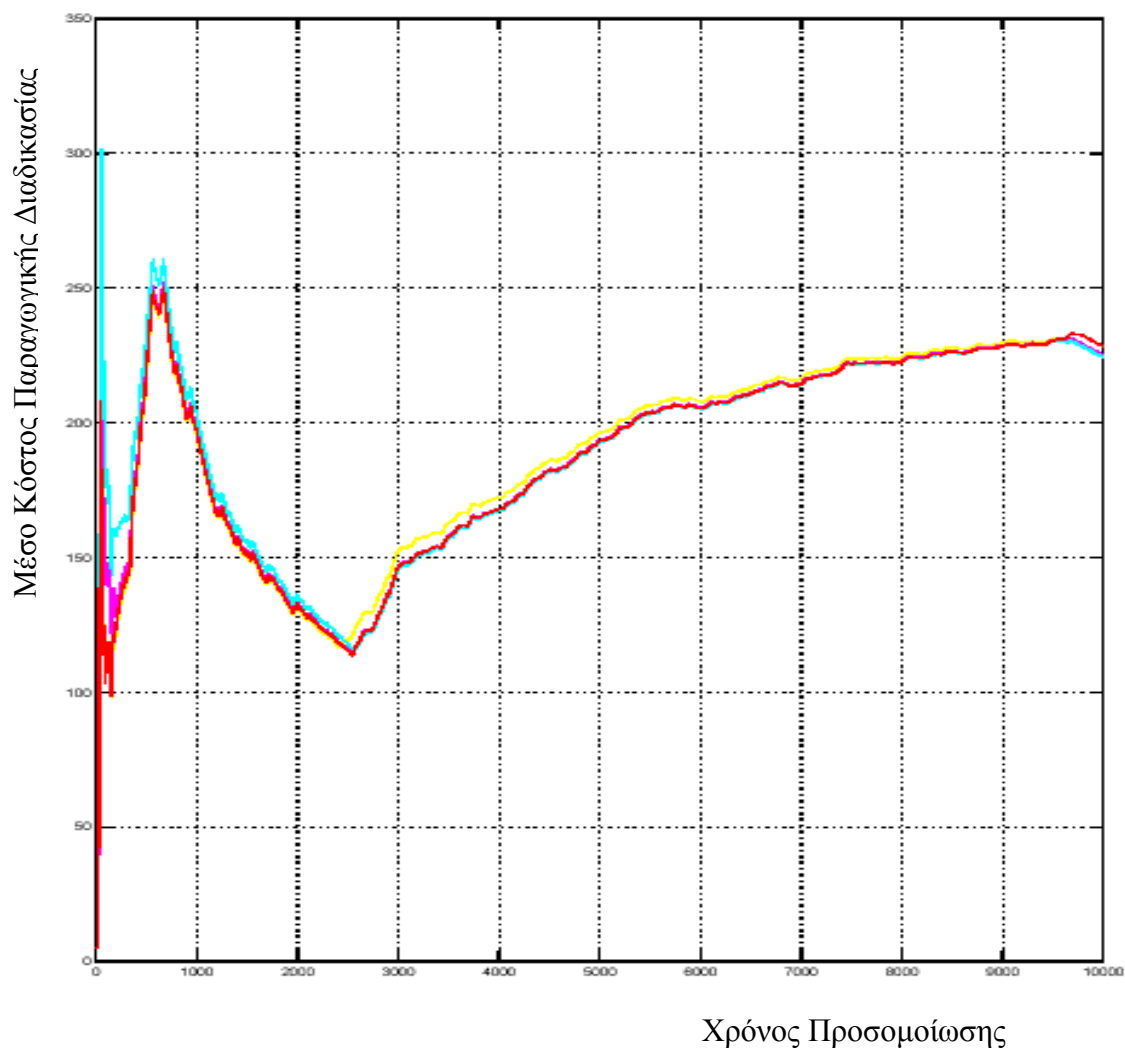
ενδέχεται να δημιουργεί συσσώρευση παραγγελιών στο σύστημα, δηλαδή αυξημένο κόστος αποθέματος, χωρίς όμως παράλληλα να έχουμε ανικανοποίητη ζήτηση.

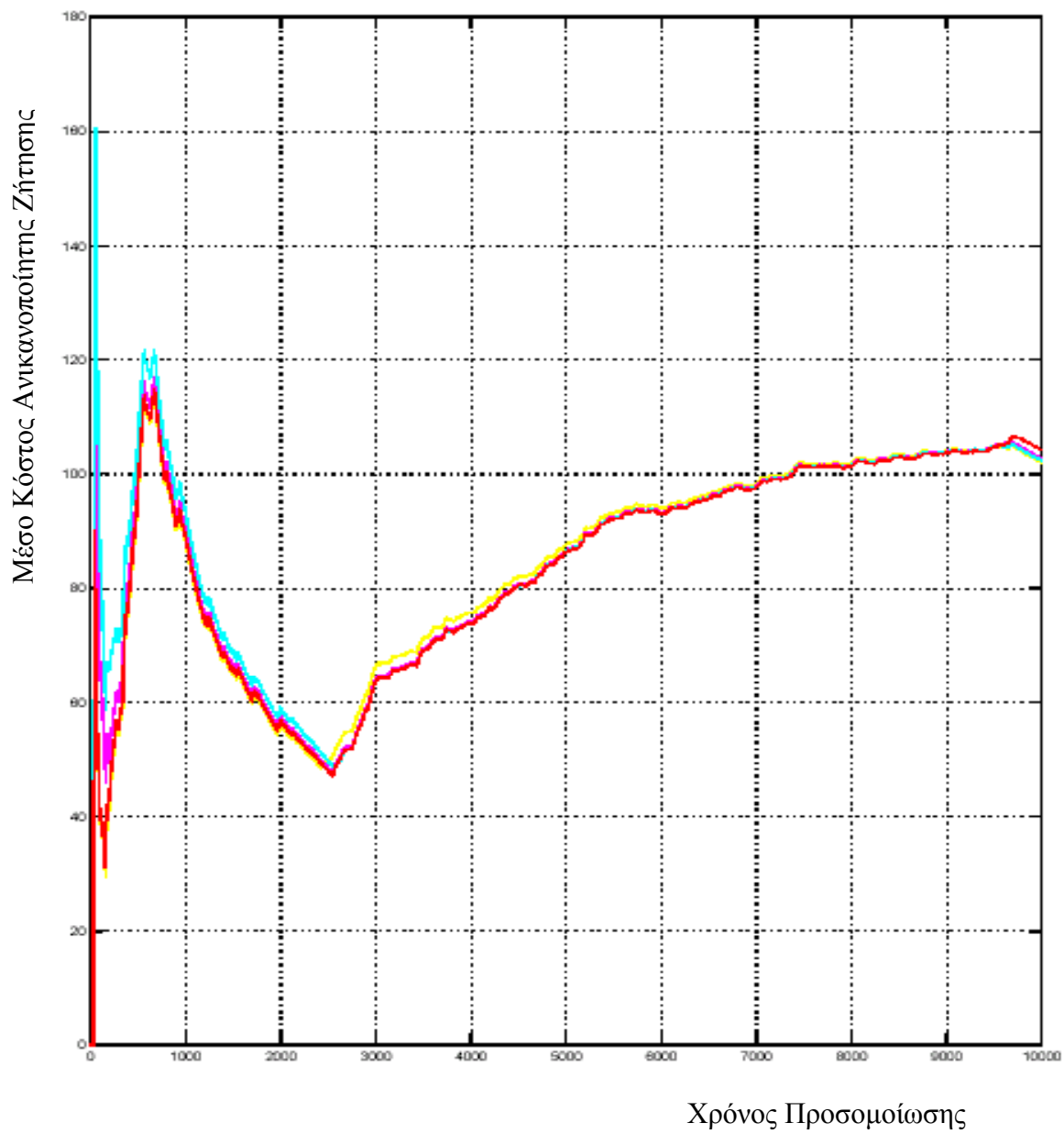
- 4) Όταν πλέον οι παραγγελίες αφικνούνται με πολύ μικρή πυκνότητα στο σύστημα (μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου=40), είναι σαφές από τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων, ότι η μεθοδολογία της παραγωγής στο μέγιστο δυνατό (produce-at-capacity) δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις όπου το σύστημα δεν δέχεται καμία πίεση από τη ζήτηση, δεν υπάρχει λόγος να γίνεται έλεγχος της παραγωγής υπό την έννοια που πραγματοποιείται από τις υπόλοιπες τρεις μεθοδολογίες. Το πιθανότερο είναι ότι σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα έχει ικανοποιήσει όλες τις προηγούμενες παραγγελίες, πριν αφιχθεί η επόμενη και κατά συνέπεια δεν πιέζεται από τη ζήτηση.

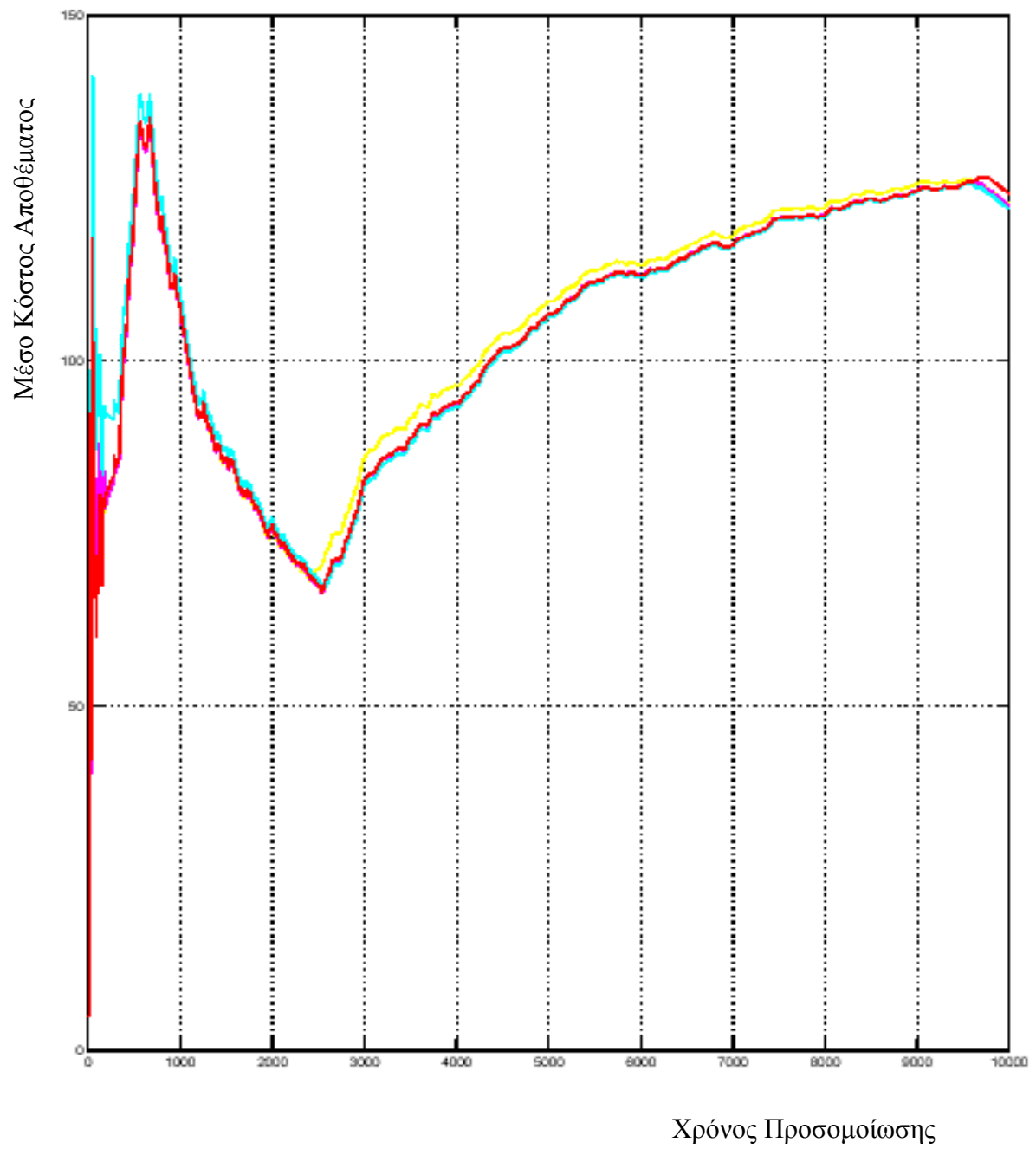
5.3 Σενάριο 2^ο

5.3.1 Αποτελέσματα

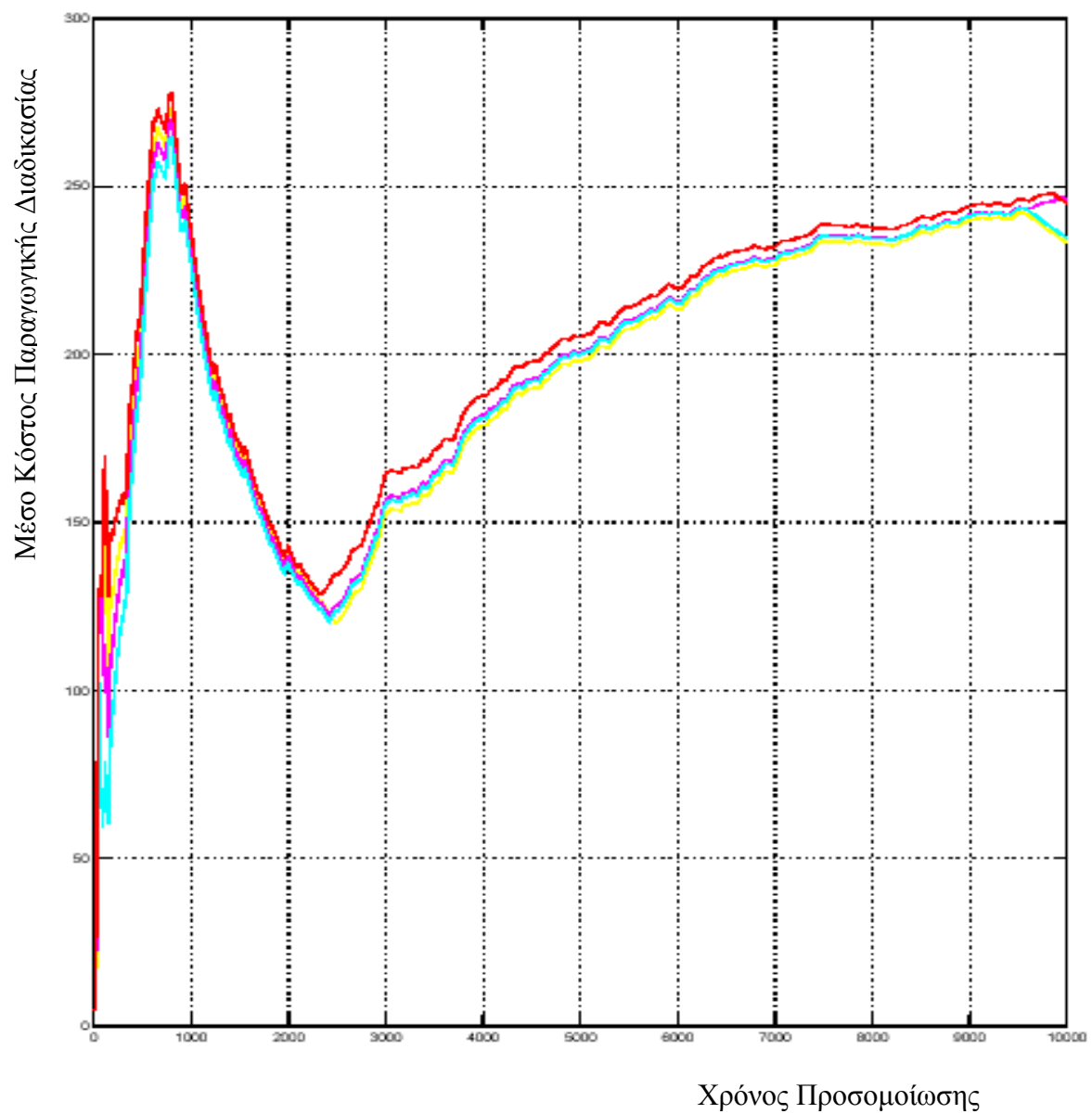
Α) Μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου = 20







Β) Μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου = 30

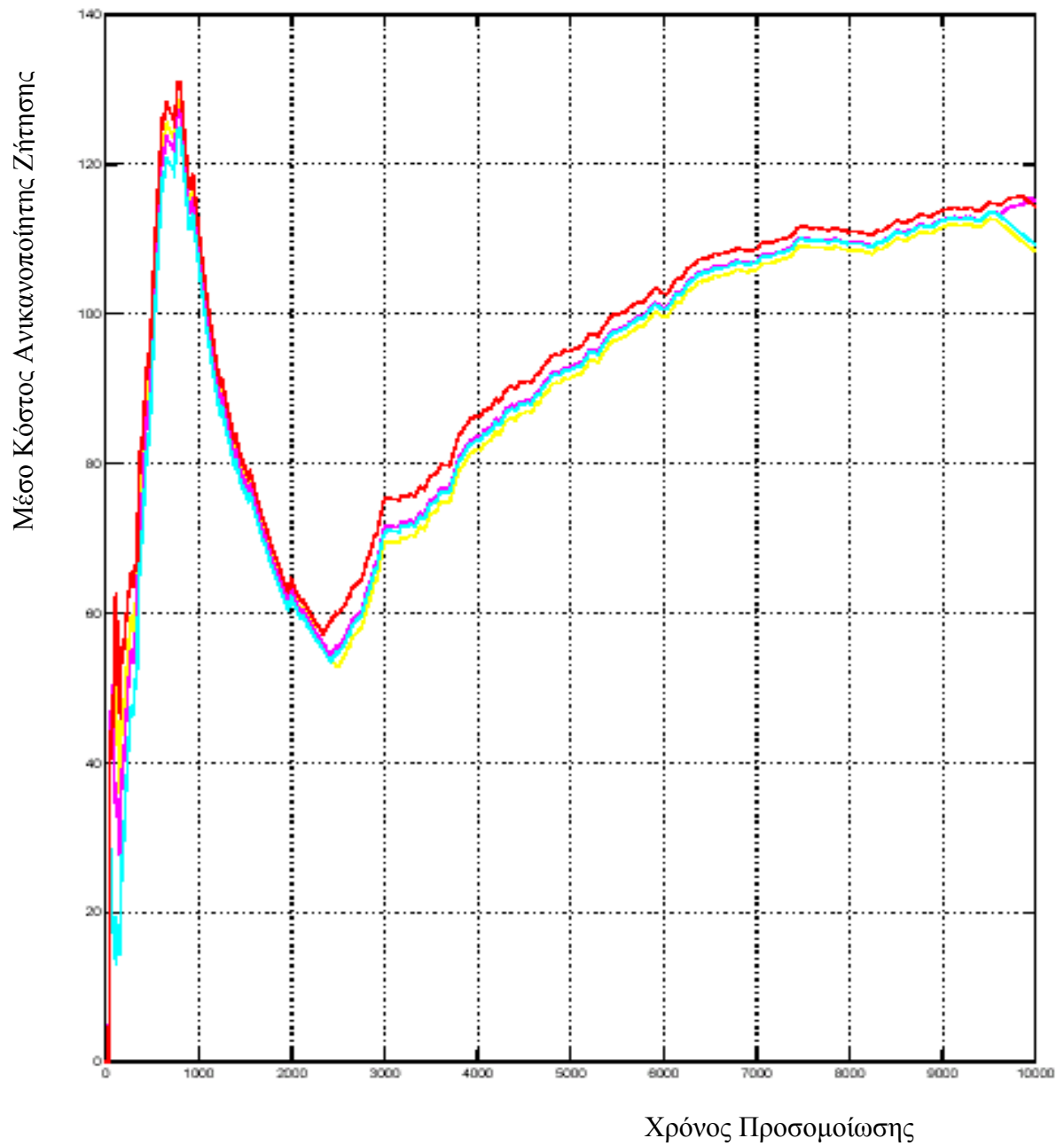


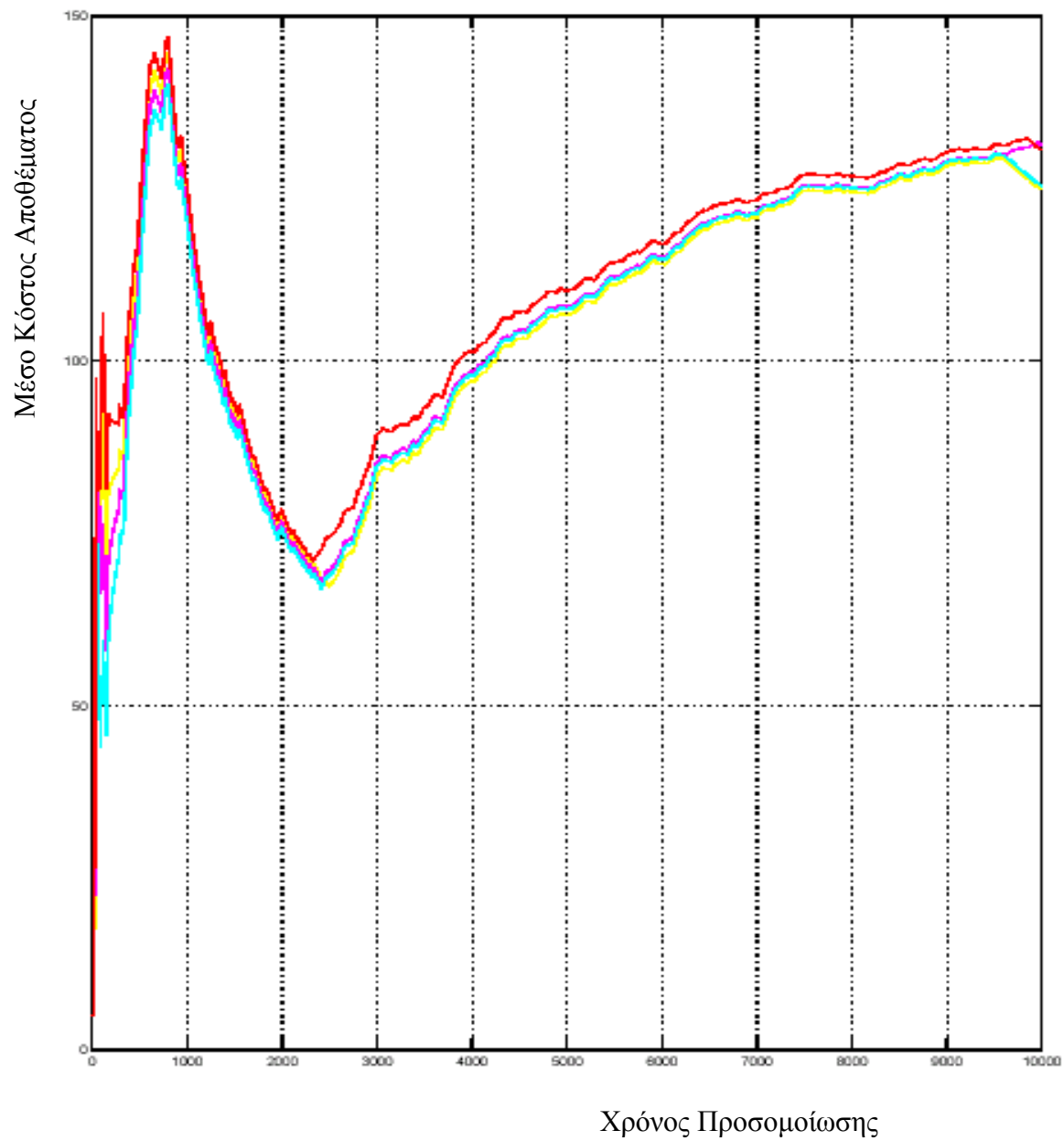
Produce-at-Capacity

Μεθοδολογία 1

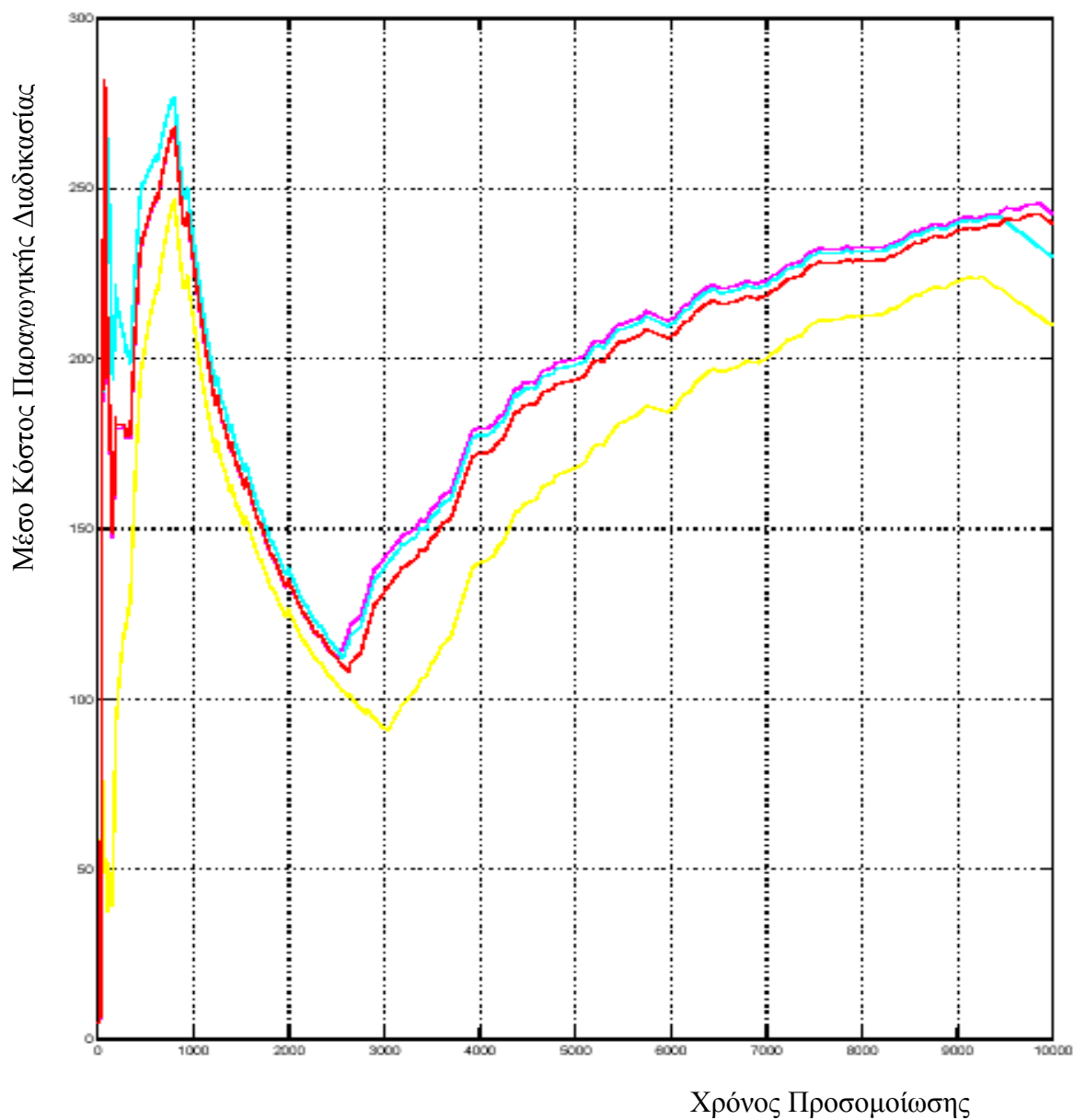
Μεθοδολογία 2

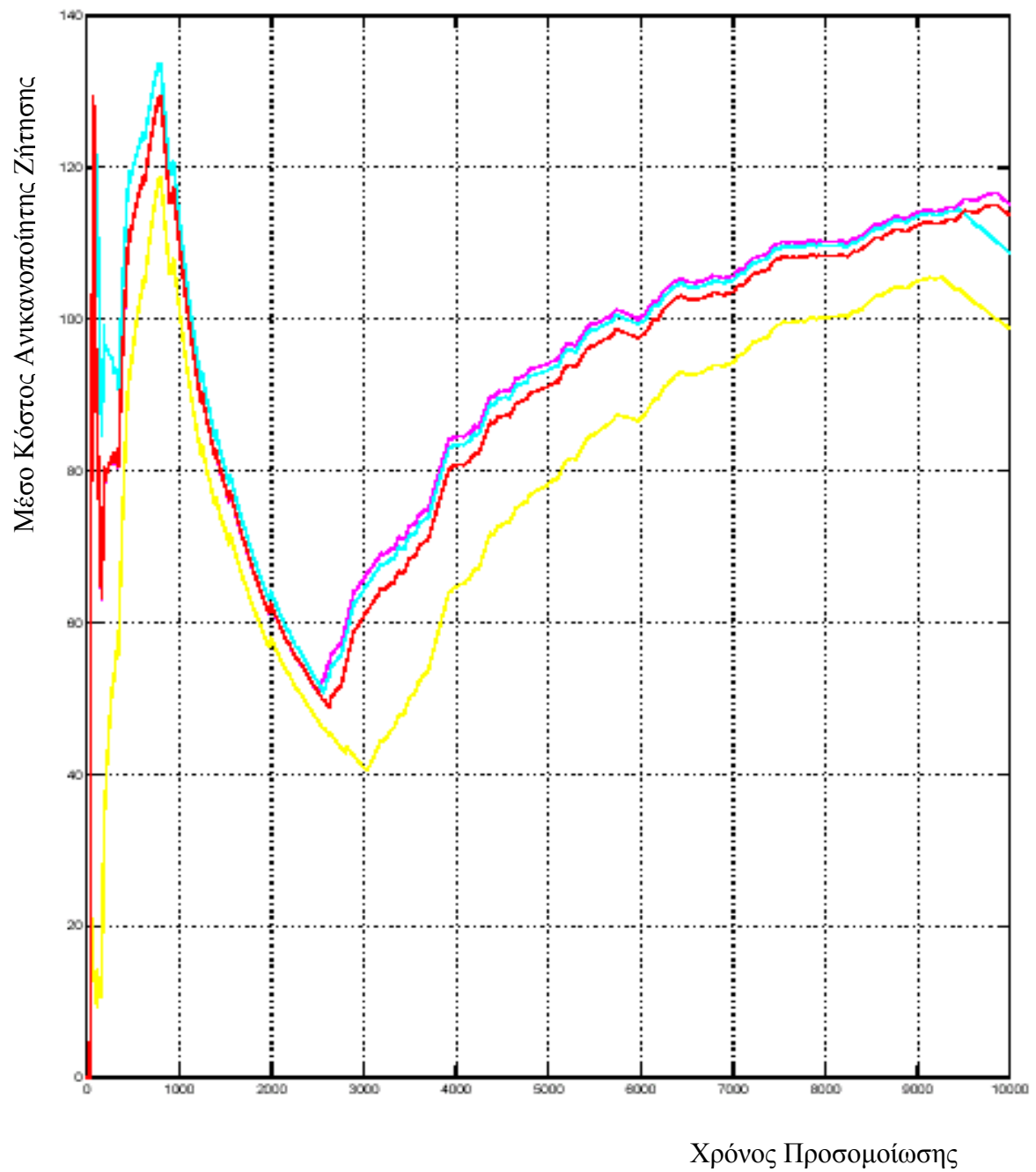
NEFCON

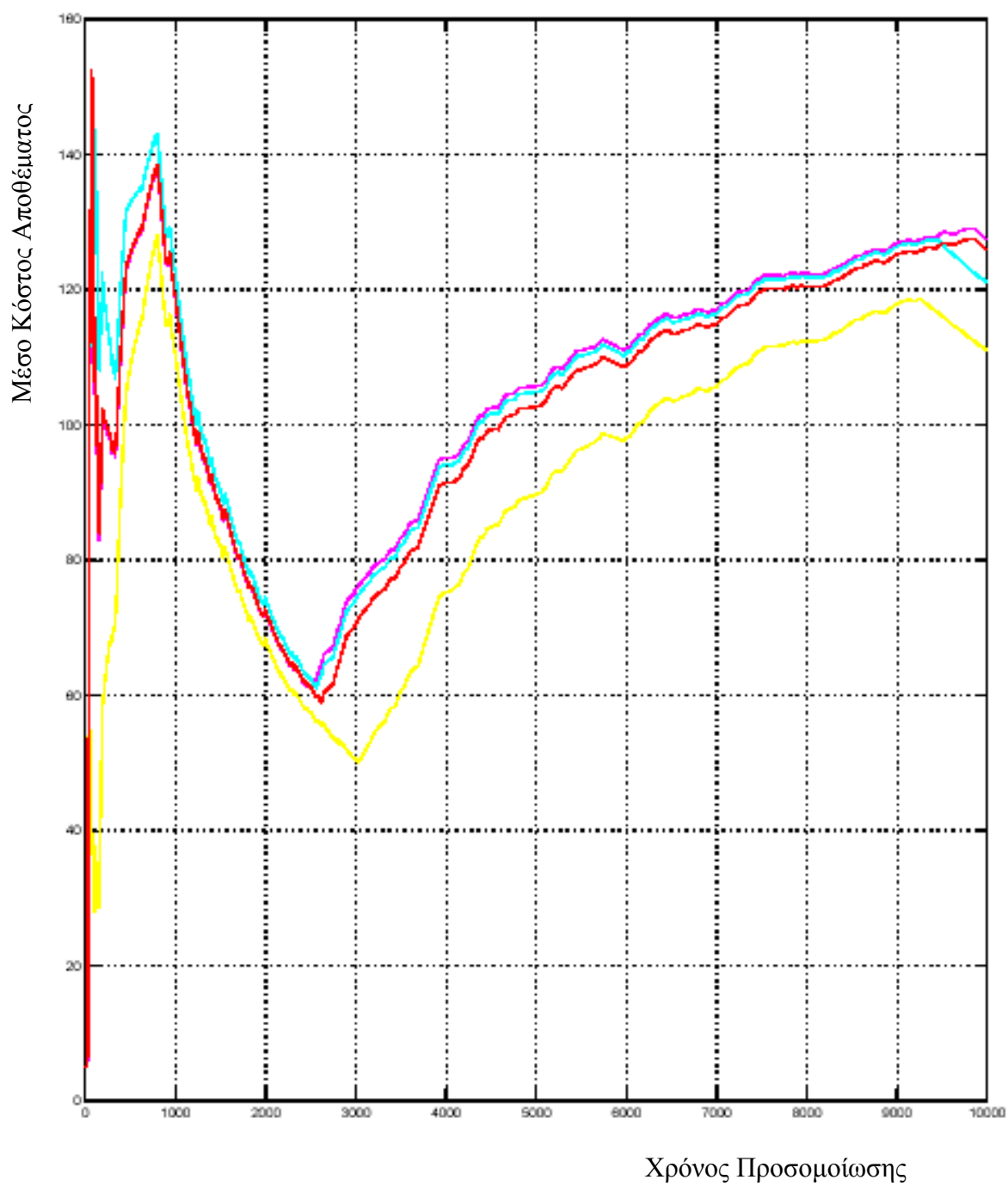




Γ) Μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου = 40







5.3.2 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας την εικόνα από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο δεύτερο σενάριο διερεύνησης του προβλήματος, μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

- 1) Όπως και στο πρώτο σενάριο, όλες οι μεθοδολογίες δίνουν παρόμοια αποτελέσματα για μικρούς ενδοαφιξιακούς χρόνους (μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου ≤ 20). Υπάρχει μία μικρή υπεροχή των τριών μεθοδολογιών που παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική (ΜΕΘ.1, ΜΕΘ.2 & ΜΕΘ.3), έναντι της μεθοδολογίας παραγωγής στο μέγιστο δυνατό, η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στο μειωμένο κόστος αποθέματος που αυτές παρουσιάζουν. Παρατηρείται επίσης, καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος που λειτουργεί με τη μεθοδολογία του νεύρο-ασαφούς ελέγχου, σε σχέση με αυτή του πρώτου σεναρίου.
- 2) Αντιθέτως, είναι εμφανές από το διάγραμμα που αντιστοιχεί σε μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου ίση με τριάντα (30), ότι δεν εμφανίζεται πλέον σημαντικό πλεονέκτημα της ΜΕΘ.2 έναντι των υπολοίπων. Διαπιστώνεται έτσι, ότι όταν οι παραγγελίες αναχωρούν άμεσα από το σύστημα – ανεξάρτητα από το αν έχει εκπνεύσει η προθεσμία παράδοσης τους – είναι αποτελεσματικότερη η μεθοδολογία της παραγωγής στο μέγιστο δυνατό (produce-at-capacity).
- 3) Τέλος, πανομοιότυπη συμπεριφορά με αυτή του πρώτου σεναρίου, παρουσιάζουν όλες οι μεθοδολογίες στην περίπτωση των πολύ αραιών αφίξεων (μέση τιμή ενδοαφιξιακού χρόνου=40). Είναι αδιαμφισβήτητο, ότι σε αυτήν την περίπτωση, οποιοσδήποτε έλεγχος και αν εφαρμοστεί στην παραγωγική διαδικασία, δεν μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος που παράγει στο μέγιστο δυνατό.

5.4 Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν τρεις (3) ευρετικές μεθοδολογίες ελέγχου δικτύων παραγωγής. Με βάση τα συστήματα που αναπτύχθηκαν στις εργασίες [1] και [3], μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός συστήματος παραγωγής ενός τύπου προϊόντος, όταν η ζήτηση έχει στοχαστικό χαρακτήρα. Αναπτύχθηκε ένα σύστημα αποθήκευσης και επεξεργασίας των εισερχόμενων παραγγελιών με στόχο την καλύτερη διαχείριση της ζήτησης, πριν αυτή τροφοδοτηθεί στις μηχανές του δικτύου. Ο τρόπος επεξεργασίας της ζήτησης, καθορίζει και τη φιλοσοφία υπό την οποία αναπτύχθηκαν οι μεθοδολογίες, που ως στόχο έχουν την κάλυψη της ζήτησης στο μέγιστο δυνατό και παράλληλα την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης του κόστους.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σύστημα ισορροπεί (μικρές μεταβολές στα μεγέθη) μετά τις 7.000 χρονικές μονάδες. Το γεγονός ότι η προσομοίωση ξεκινά με άδειους τους αποθηκευτικούς χώρους έχει ως αποτέλεσμα μία μεταβατική κατάσταση η οποία απεικονίζεται στα διαγράμματα με μεγάλα σκαμπανεβάσματα στις τιμές των μεγεθών ($T_{SIM} \cong 2500$ χρ.μον.). Μία άλλη αιτιολογία για την μορφή του διαγράμματος την ίδια χρονική περίοδο της προσομοίωσης, ενδέχεται να είναι η μη εμφάνιση πολλών βλαβών στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια όμως της προσομοίωσης ο ρυθμός των βλαβών προσεγγίζει το μέσο ρυθμό που έχει οριστεί και το σύστημα αποκτά πιο σταθερή συμπεριφορά.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, αποδεικνύουν ότι για ένα ορισμένο εύρος της ζήτησης, οι ευρετικές μέθοδοι που προτείνονται δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από την κλασσική μεθοδολογία της παραγωγής στο μέγιστο δυνατό. Πιο συγκεκριμένα, οι γενικές διαπιστώσεις για κάθε μία από τις μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν είναι οι ακόλουθες :

Μεθοδολογία Μέγιστης Φόρτισης (ΜΕΘ.1) : Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η επεξεργασία της ζήτησης στη συγκεκριμένη μεθοδολογία (υπολογισμός μέγιστης φόρτισης), είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλου κόστους αποθέματος στις περισσότερες των περιπτώσεων. Το γεγονός αυτό, είχε ως αποτέλεσμα

την υστέρηση της μεθόδου, έναντι κυρίως της μεθοδολογίας σύγκρισης φόρτισης-δυναμικότητας και της μεθόδου της παραγωγής στο μέγιστο δυνατό. Παρόλα αυτά, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης (μέση τιμή ενδοαφιζιακού χρόνου=20).

Μεθοδολογία Σύγκρισης Φόρτισης-Δυναμικότητας (ΜΕΘ.2) : Η συγκεκριμένη μέθοδος, έδωσε στο σύστημα τη δυνατότητα να διαχειρίζεται τη ζήτηση όχι μόνο βραχυπρόθεσμα αλλά και μακροπρόθεσμα. Η φιλοσοφία της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έγκειται στο ότι το σύστημα μπορεί να κρίνει πότε πρέπει να παράγει για να ικανοποιήσει κάποια πιεστική παραγγελία και πότε επιβάλλεται να παράγει με στόχο την ικανοποίηση παραγγελιών με πιο μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έδωσε τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και βελτίωσε σε ορισμένες περιπτώσεις αισθητά την απόδοση του συστήματος (συγκρινόμενο με την κλασσική μεθοδολογία produce-at-capacity).

Μεθοδολογία Νεύρο-Ασαφούς Ελέγχου (NEFCON) (ΜΕΘ.3) : Το σύστημα NEFCON δεν μας έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, ενώ και η διαδικασία προσομοίωσης του ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα σε σχέση με τις προαναφερθείσες μεθόδους. Η διαδικασία μάθησης που ακολουθεί το νεύρο-ασαφές σύστημα επηρεάζεται από πάρα πολλούς παράγοντες (χρόνος διάρκειας μάθησης, θόρυβος του συστήματος, κ.τ.λ), ενώ παράλληλα το γεγονός ότι η λειτουργία του παρομοιάζεται με αυτή ενός μαύρου κουτιού, καθιστά πολύ δύσκολη την διαπίστωση της ορθότητας του ελέγχου που πραγματοποιεί. Ενδεχομένως, κάποια άλλη επιλογή μεταβλητών εισόδου στον ελεγκτή, να δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Η χρονοβόρα διαδικασία προσομοίωσης δημιούργησε προβλήματα στην πορεία διερεύνησης της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

Καταλήγοντας, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η ευρετική προσέγγιση που πραγματοποιείται στο πρόβλημα του ελέγχου των δικτύων παραγωγής, καταλήγει σε ικανοποιητικές, μα μη βέλτιστες λύσεις. Η εξασφάλιση βέλτιστων λύσεων, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με αναλυτικές μεθόδους και όχι με τη χρήση ευρετικών μεθόδων και αλγορίθμων.

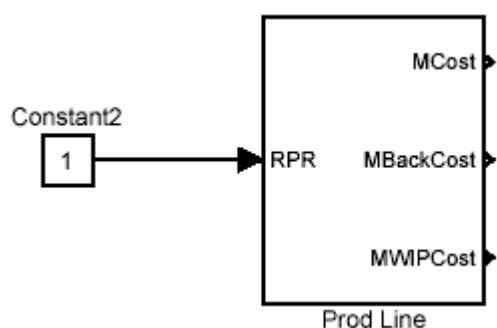
Οι προεκτάσεις που παρουσιάζει το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι πολλές και ενδιαφέρουσες. Η παρούσα μελέτη μπορεί να επεκταθεί και σε πιο πολύπλοκα δίκτυα παραγωγής, καθώς επίσης και σε δίκτυα παραγωγής περισσότερων του ενός προϊόντων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, θα πρέπει να γίνουν συγκεκριμένες υποθέσεις και εκ νέου θεώρηση του συστήματος, καθώς τα δεδομένα του προβλήματος αλλάζουν.

Επίσης, η εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών σε ένα σύστημα παραγωγής όπου θα ασκείται επιβλέπων ασαφής έλεγχος [3] στις μηχανές του κατώτερου επιπέδου, ενδέχεται να οδηγήσει σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η προσπάθεια κατασκευής ενός ασαφούς ελεγκτή (χειρωνακτικά), ο οποίος εκμεταλλευόμενος την εμπειρία του κατασκευαστή του, θα μπορούσε ενδεχομένως να ελέγξει ακόμα αποτελεσματικότερα την παραγωγική διαδικασία.

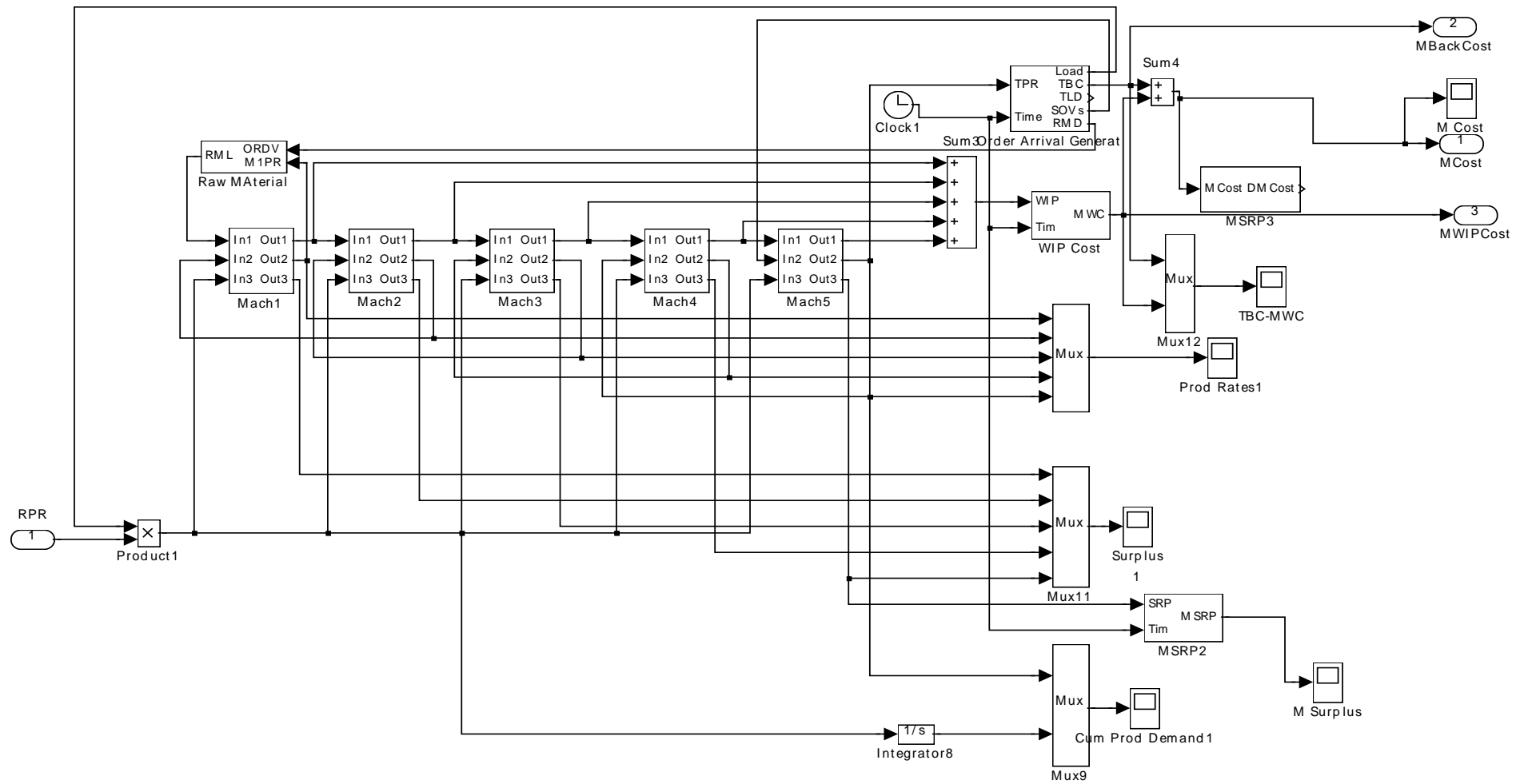
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στις σελίδες που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης της Simulink και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι οι ΜΕΘ.1 & ΜΕΘ.2 αναπτύχθηκαν πάνω σε πανομοιότυπο σύστημα και η μόνη διαφορά ανάμεσα τους, έγκειται στο υποσύστημα όπου γίνεται η επεξεργασία της φόρτισης του συστήματος. Αντίθετα η δομή του συστήματος αλλάζει για την εφαρμογή της τρίτης μεθοδολογίας, με την προσθήκη του νεύρο-ασαφούς ελεγκτή. Ακολουθεί η απεικόνιση των δύο (2) συστημάτων:

Μοντέλο μεθοδολογιών 1&2

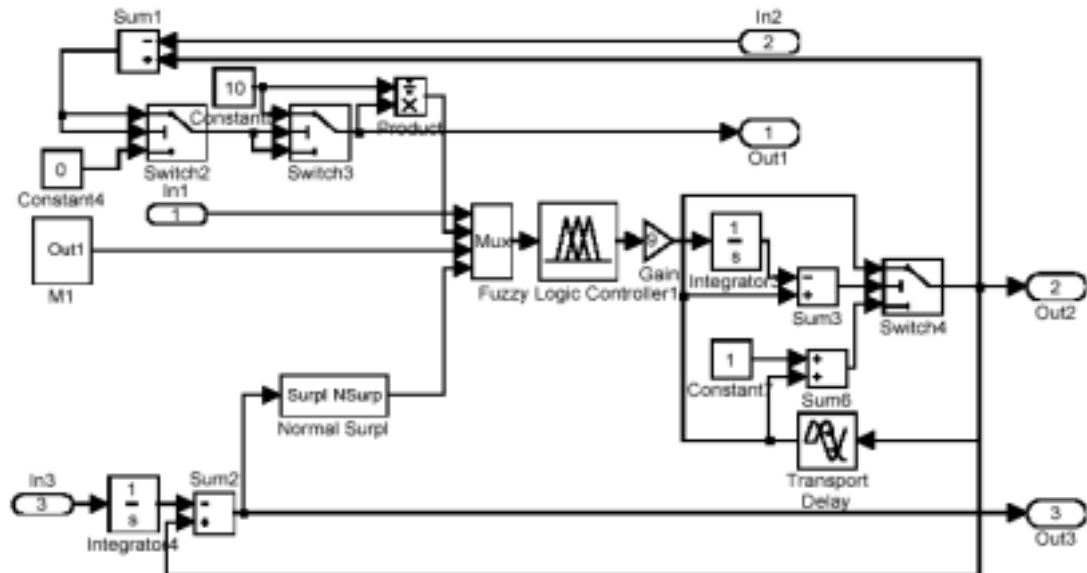
Σχήμα Π.1: Σύστημα παραγωγής για ΜΕΘ.1 & ΜΕΘ.2

Το σύστημα της γραμμής παραγωγής (Prod Line), περικλείει το υποσύστημα των δύο επιπέδων που απεικονίζονται και στο τέταρτο κεφάλαιο (Σχήμα 4.1). Το σχήμα Π.2 απεικονίζει το υποσύστημα των δύο επιπέδων:



Σχήμα Π.2 : Υποσύστημα κατώτερου επιπέδου

Στο σχήμα Π.2 απεικονίζεται το κατώτερο επίπεδο των πέντε μηχανών σε σειρά και το ανώτερο επίπεδο από όπου εισάγεται, αποθηκεύεται και γίνεται η επεξεργασία της ζήτησης (Order Arrival Generator). Απεικονίζονται επίσης, και ορισμένα υποσυστήματα στα οποία γίνονται υπολογισμοί, όπως για παράδειγμα το υποσύστημα υπολογισμού του μέσου κόστους αποθέματος (WIP Cost).

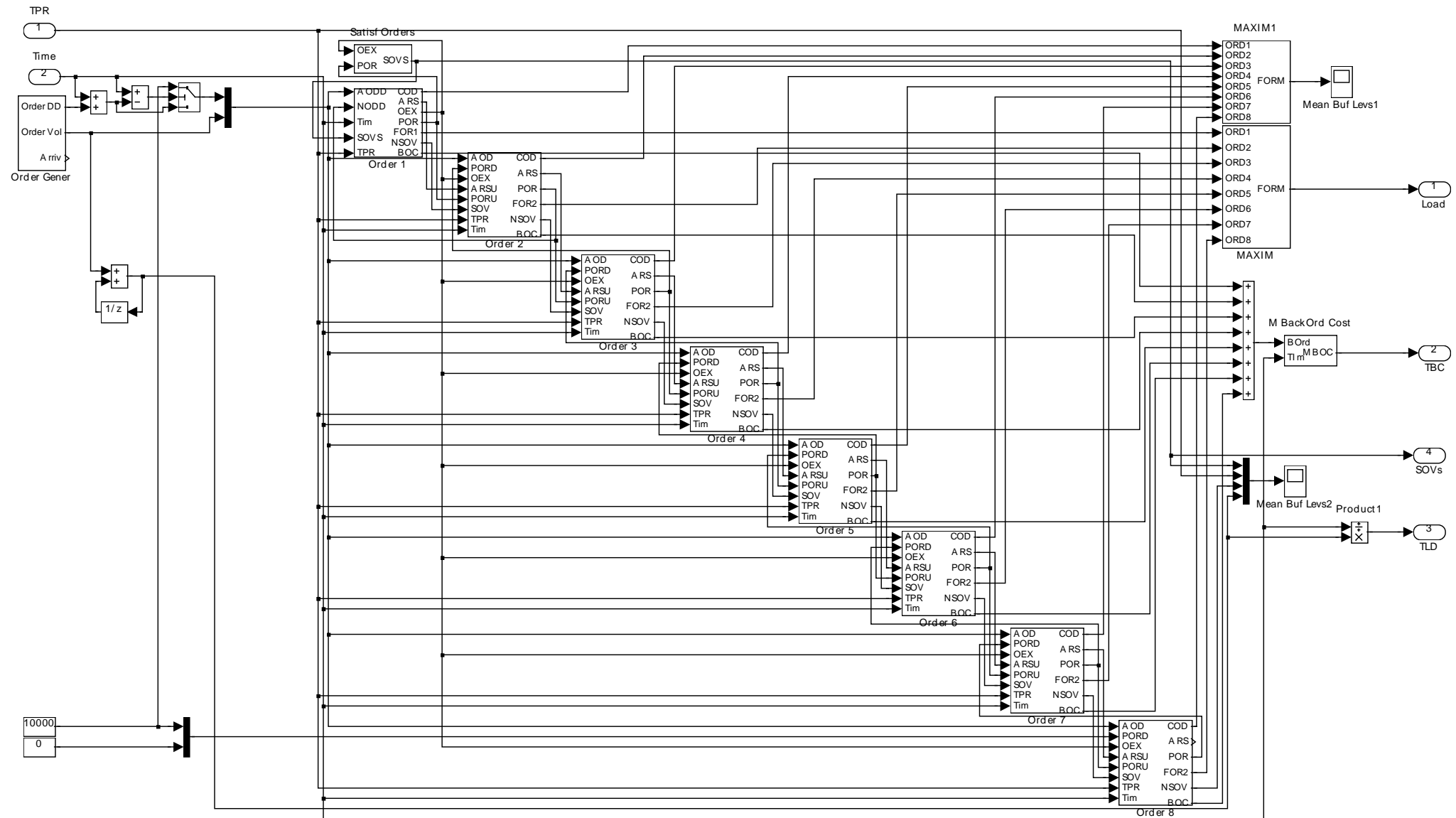


Σχήμα Π.3 : Υποσύστημα μηχανής

Το σχήμα Π.3 απεικονίζει το υποσύστημα κάθε μηχανής της γραμμής παραγωγής. Στο υποσύστημα αυτό, εμπεριέχεται ο ασαφής ελεγκτής (Fuzzy Logic Controller), ο οποίος δέχεται ως εισόδους τις παραμέτρους του συστήματος που αναφέρονται στην παράγραφο 3.2 του τρίτου κεφαλαίου και εξάγει το ρυθμό παραγωγής της μηχανής.

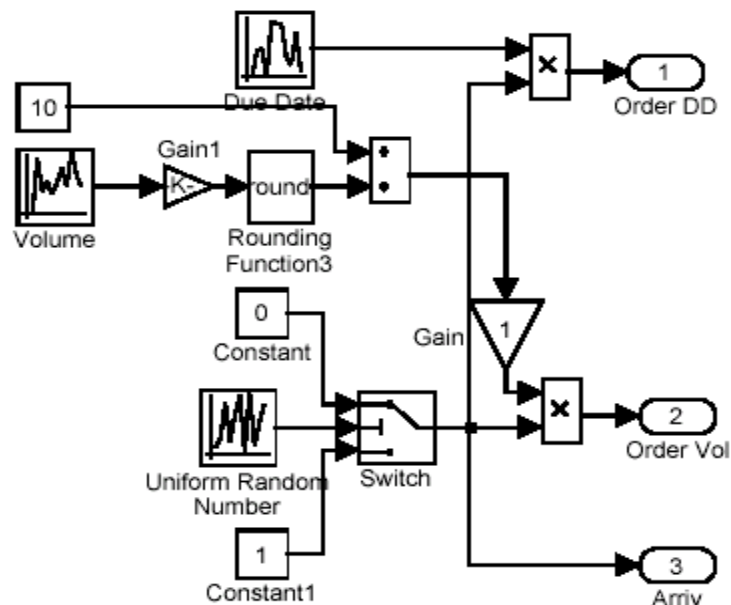
Επειδή ο ασαφής ελεγκτής μετά την από-ασαφοποίηση (de-fuzzification) δίδει μία τιμή που κυμαίνεται από μηδέν (0) έως ένα (1), έχει τοποθετηθεί στην έξοδο του ένας πολλαπλασιαστής (Gain) ο οποίος θέτει ένα άνω όριο στην τιμή που μπορεί να λάβει ο ρυθμός της μηχανής που ελέγχεται από το συγκεκριμένο ελεγκτή. Εξάλλου, το υποσύστημα Transport Delay, δίδει τη δυνατότητα της άθροισης του τωρινού ρυθμού παραγωγής με αυτόν που ίσχυε στο ακριβώς προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης (χρόνος καθυστέρησης = 1 βήμα προσομοίωσης). Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η αθροιστική παραγωγή της μηχανής.

Το υποσύστημα του ανώτερου επιπέδου του συστήματος (Order Arrival Generator), περιλαμβάνει τις γεννήτριες παραγωγής της ζήτησης, τις θέσεις αποθήκευσης των παραγγελιών αλλά και τα υποσυστήματα στα οποία πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί για την φόρτιση του συστήματος (Σχήμα Π.4).



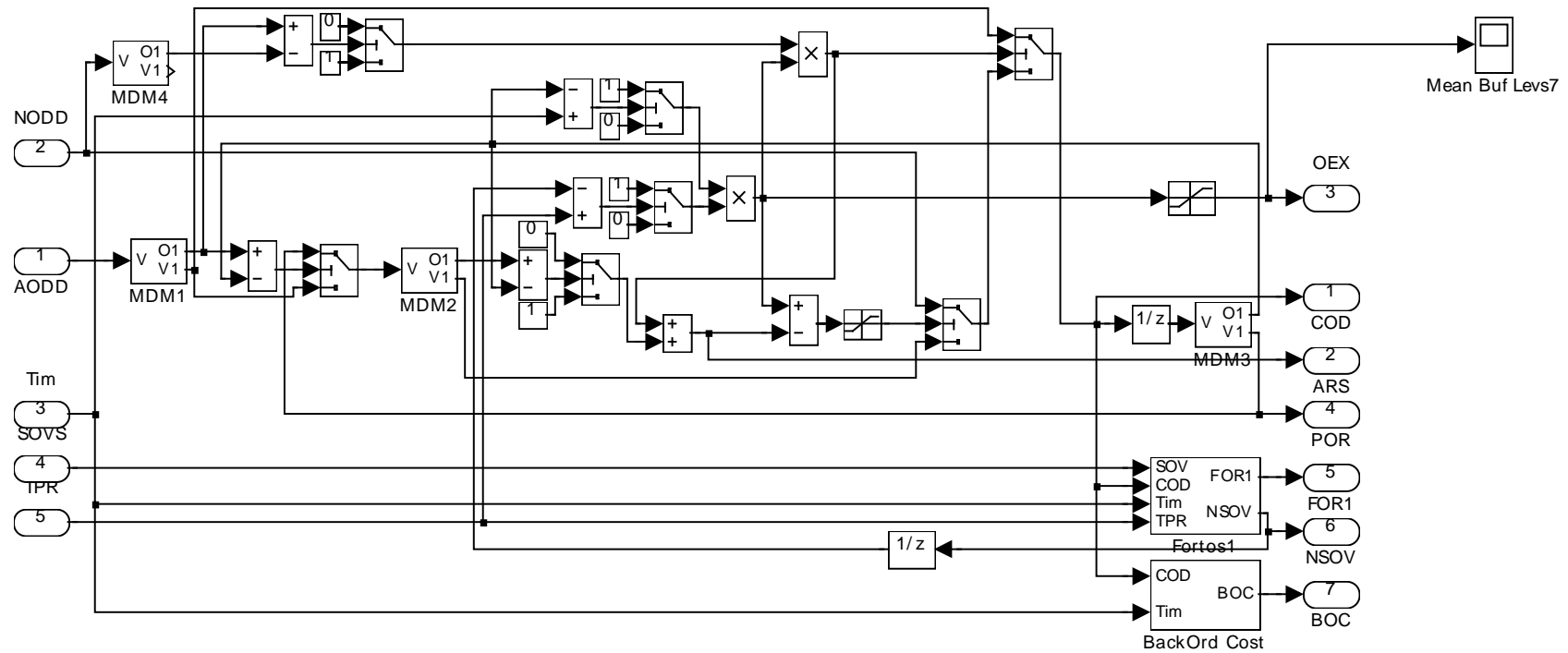
Σχήμα Π.4 : Υποσύστημα ανώτερου επιπέδου
(Παραγωγή, αποθήκευση & επεξεργασία της ζήτησης)

Το υποσύστημα της γεννήτριας άφιξης των παραγγελιών περιλαμβάνει τις τρεις (3) γεννήτριες παραγωγής τυχαίων αριθμών, που συνδυάζονται για να δώσουν την άφιξη ή μη, τον όγκο και την προθεσμία παράδοσης της παραγγελίας. Οι γεννήτριες παράγουν αριθμούς ομοιόμορφα κατανεμημένους (Σχήμα Π.5)



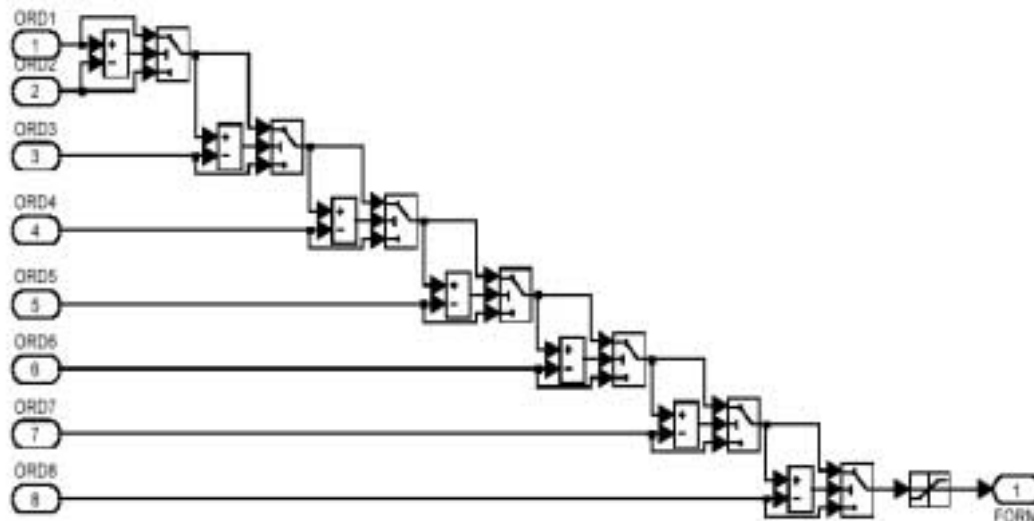
Σχήμα Π.5 : Υποσύστημα γεννήτριας άφιξης της παραγγελίας

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα Π.6), απεικονίζεται το υποσύστημα της θέσης i της λίστας παραγγελιών. Σε αυτό το υποσύστημα πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την φόρτιση κάθε θέσης της λίστας παραγγελιών και προσδιορίζεται ο όγκος των ανικανοποίητων παραγγελιών.



Σχήμα Π.6 : Υποσύστημα θέσης *i* λίστας παραγγελιών
 (Κατάταξη παραγγελιών, υπολογισμοί όγκου ανικανοποίητης ζήτησης)

Το επόμενο σχήμα, αφορά μόνο στη ΜΕΘ.1, καθώς πρόκειται για το υποσύστημα υπολογισμού της μέγιστης φόρτισης του συστήματος, η οποία στη συνέχεια δίδεται υπό τη μορφή ρυθμού παραγωγής στις μηχανές του κατώτερου επιπέδου.

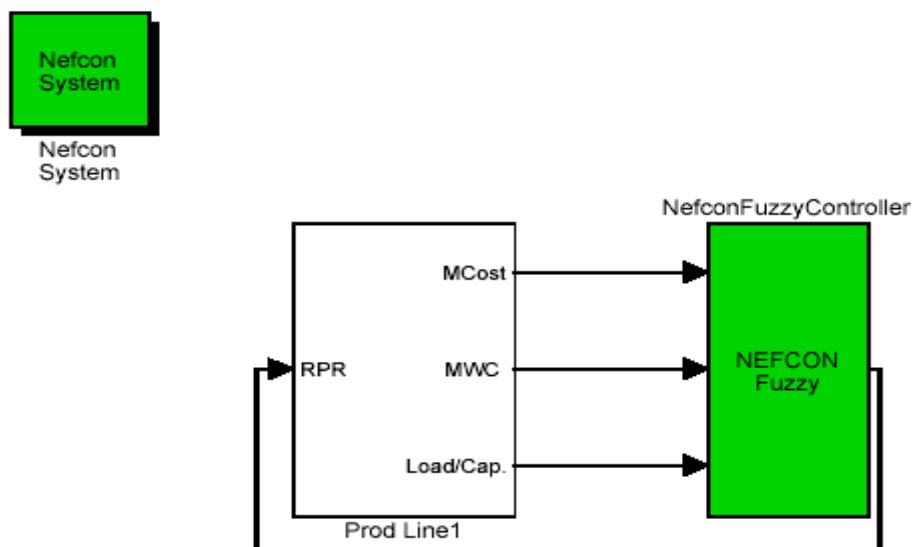


Σχήμα Π.7 : Υποσύστημα υπολογισμού μέγιστης φόρτισης (ΜΕΘ.1)

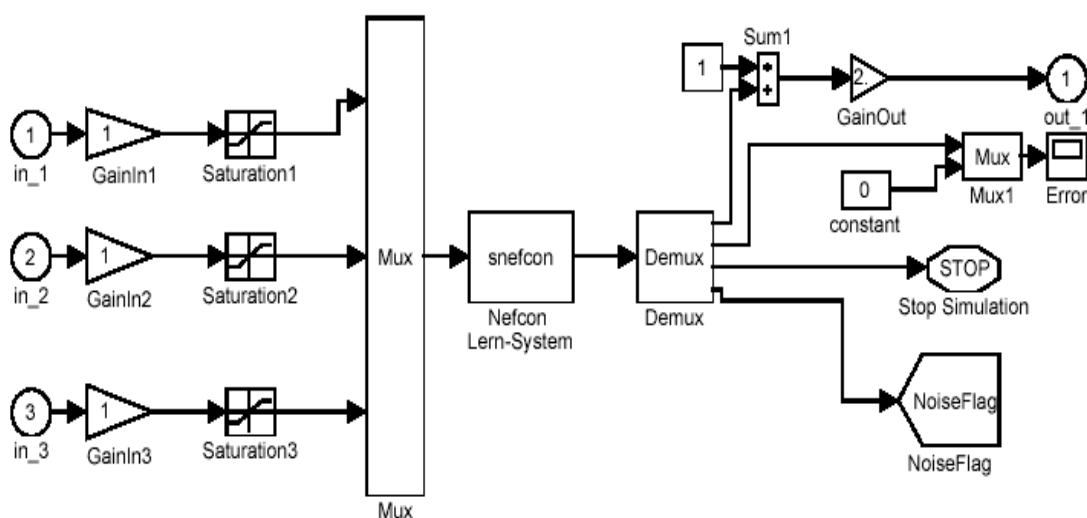
Αντίστοιχα, για την ΜΕΘ.2 παρουσιάζεται το υποσύστημα σύγκρισης της μέγιστης φόρτισης με τη δυναμικότητα του συστήματος.



Σχήμα Π.8 : Υποσύστημα σύγκρισης μέγιστης φόρτισης-δυναμικότητας (ΜΕΘ.2)

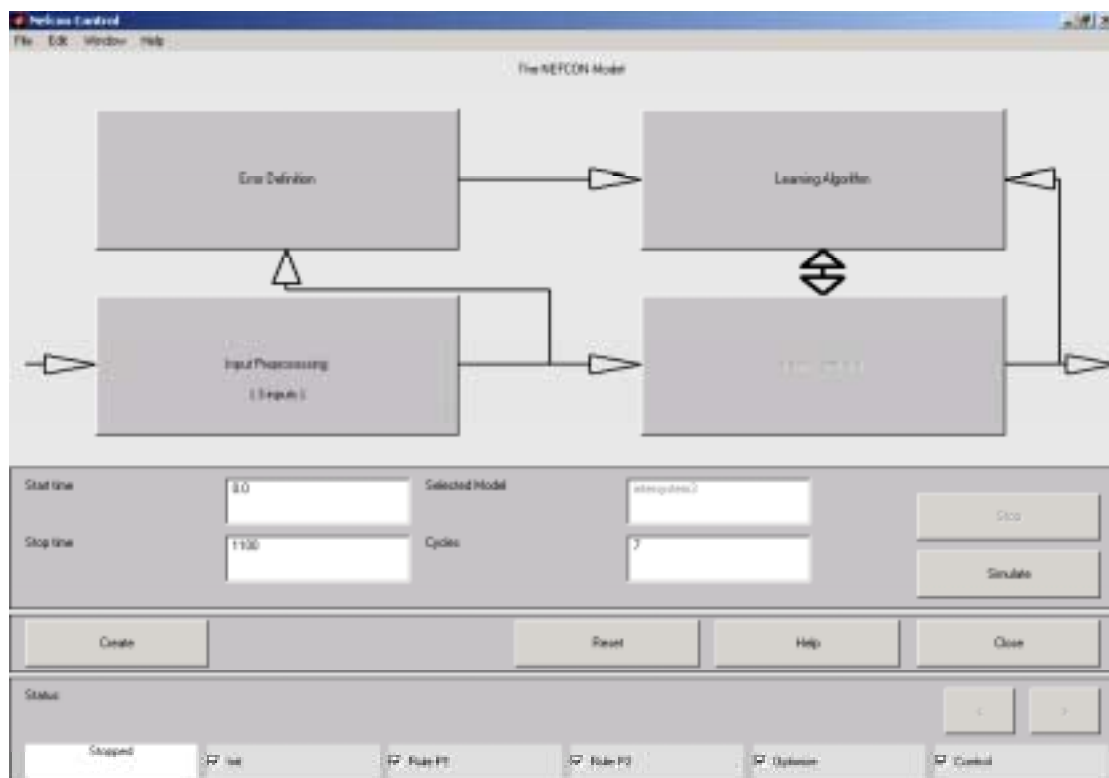
Μοντέλο μεθοδολογίας 3**Σύστημα Π.9 : Δομή συστήματος για ΜΕΘ.3**

Το υποσύστημα της γραμμής παραγωγής (Prod. Line) είναι πανομοιότυπο με αυτό των προηγούμενων μεθοδολογιών. Ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής NEFCON δέχεται ως εισόδους παραμέτρους που υπολογίζονται τόσο στο ανώτερο, όσο και στο κατώτερο επίπεδο του συστήματος παραγωγής. Η έξοδος του ελεγκτή τροφοδοτείται στις μηχανές του κατώτερου επιπέδου του συστήματος παραγωγής.

**Σχήμα Π.10 : Υποσύστημα νεύρο-ασαφούς ελεγκτή NEFCON**

Στο σχήμα Π.10 απεικονίζεται το υποσύστημα του νεύρο-ασαφούς ελεγκτή NEFCON, όπου και γίνεται η επεξεργασία των εισόδων πριν ξεκινήσει η διαδικασία μάθησης (Nefcon Learn-System). Το μπλοκ Snefcon είναι μία S-function η οποία χρησιμοποιείται για να καλούνται μέσα από τη Simulink οι αλγόριθμοι μάθησης του NEFCON.

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού του NEFCON, μέσα από το οποίο καθορίζονται όλες οι παράμετροι της διαδικασίας μάθησης και βελτιστοποίησης της βάσης κανόνων (π.χ. συνάρτηση σφάλματος, ρυθμός μάθησης, συναρτήσεις συμμετοχής κ.α.).



Σχήμα Π.11 : Γραφικό περιβάλλον καθορισμού παραμέτρων μάθησης

Το περιβάλλον του σχήματος Π.11, δίνει επιπλέον τη δυνατότητα έναρξης και τερματισμού της προσομοίωσης, αλλά και παρακολούθηση της διαδικασίας ενώ αυτή είναι σε εξέλιξη. Ο χρόνος έναρξης και λήξης της προσομοίωσης καθορίζονται στο συγκεκριμένο μενού.

Βιβλιογραφία

- [1] N.C. Tsourveloudis, E. Dretoulakis, S. Ioannidis, “Fuzzy work-in-progress inventory control of unreliable manufacturing systems”, *Information Sciences*, Vol. 127, pp. 69-83, 2000.
- [2] W. J. Hopp, M. L. Spearman, *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management, Second Edition*, McGraw-Hill International Editions, 2000.
- [3] S. Ioannidis, N.C. Tsourveloudis, K.P. Valavanis, “Supervisory control of multiple-part-type production networks”, Submitted to the IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- [4] A. Nurberger, D. Nauck, R. Kruse, “Neuro-fuzzy control based on the NEFCON-model: recent developments”, *Soft Computing*, Vol. 2, pp. 168-182, 1999.
- [5] Διδακτορική Διατριβή, Δημητρίου Ε. Κουλουριώτη, «Εξελικτικοί ασαφείς εννοιολογικοί γράφοι: ανάπτυξη τεχνικής & εφαρμογή στην μοντελοποίηση, έλεγχο & πρόβλεψη δυναμικών συστημάτων», Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2001.
- [6] D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse, *Foundations of Neuro-Fuzzy Systems*, John Wiley & Sons, 1996.
- [7] J.-S.R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, 1997.
- [8] L.A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [9] M., Sugeno, *Industrial Applications of Fuzzy Control*, Elsevier Science Pub.Co., 1985.
- [10] E. H. Mamdani, S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller”, *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, pp. 1-13, 1975.