

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **I.1 Σκοπός της διπλωματικής.**

Η εργασία που ακολουθεί έχει ως στόχο την ανάλυση μεθόδου μέτρησης της ευελιξίας των συστημάτων παραγωγής. Μέσω της κατανόησης της έννοιας της ευελιξίας και με χρήση κατάλληλων μεθόδων και εργαλείων αποσκοπείται η ποσοτικοποίηση του όρου. Η δυσκολία, λόγω της πολυπλοκότητας της έννοιας της ευελιξίας και της μέτρησης μη σταθμισμένων μεγεθών, οδηγεί στην επίτευξη του στόχου μέσω χρήσης στοιχείων της θεωρίας Ασαφών Συνόλων.

Επιπλέον η εργασία αποσκοπεί στη σύγκριση της ευελιξίας διαφορετικών συστημάτων παραγωγής με χρήση της μεθόδου μέτρησης που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια.

### **I.2 Μεθοδολογία.**

Η γενική μεθοδολογία πάνω στην οποία στηρίζεται η παρούσα εργασία βασίζεται στη θεωρία ασαφών συνόλων [1]. Επιχειρείται ο προσδιορισμός της ευελιξίας ως αποτέλεσμα σύνθεσης πολλών επιμέρους ασαφών μεγεθών που στην πραγματικότητα δεν είναι τίποτα άλλο παρά οι επιμέρους τύποι ευελιξίας (ευελιξία μηχανής, δρομολόγησης κ.τ.λ.). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην [2]. Χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη Ασαφούς Λογικής της MATLAB σχεδιάζονται οι ελεγκτές για κάθε ένα τύπο ευελιξίας. Στη συνέχεια γίνεται η σύνθεση των ελεγκτών αυτών με τη δημιουργία ενός μοντέλου SIMULINK το οποίο υπολογίζει τη συνολική ευελιξία του συστήματος παραγωγής.

Με βάση την ανωτέρω μεθοδολογία γίνονται μετρήσεις ευελιξίας διαφορετικών συστημάτων παραγωγής και σύγκριση αποτελεσμάτων.

### **I.3 Αναμενόμενα αποτελέσματα.**

Αναμένεται η μοντελοποίηση της μεθόδου που αναπτύχθηκε στη [2] και αλλού, μέσω ελεγκτών ασαφούς λογικής της σχετικής εργαλειοθήκης της MATLAB. Θα εξεταστεί η μετρητική συμπεριφορά της μεθόδου για αριθμό διαφορετικών συστημάτων παραγωγής και για ποικιλία δεδομένων εισόδου. Περαιτέρω, αναμένεται η εξαγωγή συμπερασμάτων που αποσκοπούν στη βελτίωση της μεθόδου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 Βασικές έννοιες – Ορισμοί

Η έννοια και η μέτρηση της βιομηχανικής ευελιξίας αποτελούν αντικείμενα έντονης ερευνητικής δραστηριότητας τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια. Η έλλειψη συστήματος μέτρησης ευελιξίας αναγνωρίζεται ως σημαντικό μειονέκτημα στην προσπάθεια αποτίμησης της αποτελεσματικότητας των συστημάτων παραγωγής, αλλά και της αξιολόγησης των επενδύσεων σε ευέλικτο μηχανολογικό εξοπλισμό. Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται βασικές έννοιες και ορισμοί που αφορούν στην ευελιξία των συστημάτων παραγωγής.

Οι *σταθμοί εργασίας* αποτελούνται από μία ή περισσότερες μηχανές οι οποίες δέχονται ακατέργαστα κομμάτια ή πρώτες ύλες και επιτελούν ένα σύνολο κατεργασιών. Ένα σύνολο σταθμών εργασίας και αποθηκευτικών χώρων που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους παράγοντας διαφορετικά είδη προϊόντων, αποτελεί ένα δίκτυο παραγωγής.

Τα *ευέλικτα συστήματα παραγωγής* (ΕΣΠ) είναι δίκτυα παραγωγής που περιλαμβάνουν :

1. Σταθμούς εργασίας αποτελούμενους από αριθμητικά ελεγχόμενες εργαλειομηχανές με αυτόματη αλλαγή εργαλείων και κομματιών, οι οποίοι ελέγχονται από υπολογιστικό σύστημα.
2. Σύστημα διαχείρισης υλικών που αποτελείται από μέσα μεταφοράς όπως ταινιόδρομους, αυτόματα οδηγούμενα οχήματα και βιομηχανικά ρομπότ, με άμεση πρόσβαση στους σταθμούς εργασίας.
3. Κεντρικό υπολογιστικό σύστημα για τον έλεγχο της παραγωγής.

Κύρια χαρακτηριστικά των ΕΣΠ είναι η ικανότητά τους να κατεργάζονται ένα μεγάλο φάσμα διαφορετικών προϊόντων και η δυνατότητά τους να αντεπεξέρχονται αποτελεσματικά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος παραγωγής.

Τέτοιες μεταβολές οφείλονται σε παράγοντες εκτός του συστήματος παραγωγής, όπως :

- ζήτηση
- χαρακτηριστικά προϊόντων
- εισαγωγή νέων προϊόντων
- στρατηγικές και τακτικές επιλογές της διοίκησης

και σε παράγοντες εντός του συστήματος, όπως :

- βλάβες στις μηχανές και στον εξοπλισμό
- νέα υλικά και διαδικασίες παραγωγής.

Ορισμός : Ως **ευελιξία συστήματος παραγωγής** ορίζεται η ικανότητά του να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις ποικίλες μεταβολές των παραμέτρων συνεχίζοντας απρόσκοπτα την παραγωγή προϊόντων αποδεκτής ποιότητας.

Η ευελιξία είναι μια πολυπόθητη ιδιότητα των συστημάτων παραγωγής. Η ανάπτυξη μιας μεθόδου μέτρησης της ευελιξίας είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων ενός ΕΣΠ. Η ευελιξία δεν είναι αποτέλεσμα μόνο υψηλής τεχνολογίας και προχωρημένης οργανωτικής και διοικητικής δομής, αλλά και προϊόν ανθρώπινων ικανοτήτων και ενεργειών.

Οι Tsourveloudis και Phillis [3] έχουν διατυπώσει τις βασικές αρχές που θα πρέπει να ικανοποιεί μία μέθοδος μέτρησης της ευελιξίας ανεξάρτητα από τη δομή του. Αυτές είναι:

1. Η έμφαση σε συγκεκριμένους τύπους ευελιξίας από τους οποίους θα προέρχεται η συνολική.
2. Η δυνατότητα σύγκρισης της ευελιξίας διαφορετικών εγκαταστάσεων.
3. Η παροχή ανά περίπτωση ξεχωριστής μέτρησης που θα λαμβάνει υπόψη τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος.
4. Ο συνυπολογισμός της συσσωρευμένης ανθρώπινης γνώσης.

Η ευελιξία των συστημάτων παραγωγής είναι πολυδιάστατη έννοια, με επιπτώσεις σε όλα τα επίπεδα της ιεραρχίας ενός οργανισμού και σήμερα αποτελεί μια στρατηγική απάντηση στον έντονο ανταγωνισμό. Δεν πρέπει να θεωρηθεί ως αποκλειστική ιδιότητα των ΕΣΠ, αφού όλα

τα παραγωγικά συστήματα είναι ευέλικτα σε κάποιο βαθμό. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές προσπάθειες διασαφήνισης της έννοιας. Οι ερευνητές ορίζουν διάφορες κατηγορίες ή τύπους ευελιξίας και επικεντρώνονται στα διαφορετικά επίπεδα εμφάνισής της. Ο αριθμός των διαφορετικών τύπων ευελιξίας ξεπερνά τους 50, ωστόσο υπάρχουν έντονες νοηματικές επικαλύψεις. Μία περιεκτική κατηγοριοποίηση των τύπων ευελιξίας παρουσιάζεται στην εργασία των Tsurveloudis και Phillis [3] που βασίζεται στον ορισμό των Sethi and Sethi [4]. Οι ορισμοί των τύπων ευελιξίας που αναφέρονται στη συνέχεια βασίζονται στις εργασίες αυτές.

Η **ευελιξία μηχανής** (machine flexibility) αφορά στην ευκολία κατά την αλλαγή μεταξύ κατεργασιών που απαιτούνται για την παραγωγή ενός αριθμού προϊόντων. Υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των κατεργασιών που μπορεί να πραγματοποιήσει ένας σταθμός εργασίας καθώς και από το χρόνο που απαιτείται για να λάβει χώρα η αλλαγή.

**Ευελιξία δρομολόγησης** (routing flexibility) είναι ικανότητα ενός συστήματος παραγωγής να κατασκευάζει ένα προϊόν χρησιμοποιώντας εναλλακτικές δρομολογήσεις και ορίζεται από τον αριθμό αυτών των εναλλακτικών δρομολογήσεων και από τον εφεδρικό εξοπλισμό σε περίπτωση βλάβης.

**Ευελιξία διαχείρισης υλικών** (material handling system flexibility) είναι η ικανότητα του συστήματος μεταφοράς να κινεί αποτελεσματικά τα τεμάχια από ένα σημείο σε άλλο. Μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον αριθμό, την ποικιλία και το χρόνο μεταφοράς των κομματιών.

**Ευελιξία προϊόντος** (product flexibility) είναι η ευκολία με την οποία αλλάζει το μείγμα των τεμαχίων με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου προϊόντος. Υπολογίζεται από το χρόνο ή το κόστος μεταβολής του μείγματος τεμαχίων.

**Ευελιξία κατεργασίας** (operation flexibility) ενός προϊόντος είναι η ικανότητα μεταβολής της σειράς των κατεργασιών που απαιτούνται για την παραγωγή του προϊόντος. Υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των διαφορετικών σειρών κατεργασιών από τις οποίες μπορεί να παραχθεί το προϊόν.

Η **ευελιξία διαδικασίας** (process flexibility) μετράει την ικανότητα ενός συστήματος παραγωγής να παράγει διαφορετικά είδη προϊόντων χωρίς επαναδιάθρωση. Ένας τρόπος υπολογισμού αυτής της ευελιξίας είναι από τον αριθμό των ειδών προϊόντων που μπορεί ταυτόχρονα παράγει το σύστημα.

**Ευελιξία βαθμού** (volume flexibility) είναι η ικανότητα του συστήματος να λειτουργεί κερδοφόρα με διαφορετικούς όγκους παραγωγής. Ποσοτικοποιείται με βάση την έκταση των όγκων παραγωγής για τους οποίους το σύστημα λειτουργεί κερδοφόρα.

Η **ευελιξία επέκτασης** (expansion flexibility) αναφέρεται στη δυνατότητα το σύστημα να είναι προσαρμοστικό και επεκτάσιμο. Μπορεί να υπολογιστεί με βάση το χρόνο ή το κόστος που απαιτείται για την επέκταση του συστήματος μέχρι μία παραγωγική ικανότητα.

**Ευελιξία εργασίας** (labor flexibility) είναι η ευκολία με την οποία μετακινείται προσωπικό σε διάφορα τμήματα ενός οργανισμού και επιτυγχάνεται με την ύπαρξη προσωπικού κατάλληλα εκπαιδευμένου για ευρεία ποικιλία εργασιών.

## 1.2 Μέτρηση της ευελιξίας.

Πολλές απόπειρες ποσοτικοποίησης της ευελιξίας αναφέρονται στη βιβλιογραφία, κοινή είναι όμως η πεποίθηση ανάμεσα στους ερευνητές ότι δεν υπάρχει ένα συνολικό σύστημα μέτρησης. Στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που ακολουθεί οι εργασίες κατατάσσονται είτε με βάση το θεωρητικό πλαίσιο που χρησιμοποιούν για τη μέτρηση της ευελιξίας, είτε ανάλογα με τις συνέπειες της στο σύστημα παραγωγής ή την επιχείρηση.

Αρχικά μελετήθηκαν οι οικονομικές επιπτώσεις της ευελιξίας σε έναν οργανισμό. Όσο μικρότερο είναι το κόστος που προκαλούν οι διαταραχές στην παραγωγική διαδικασία τόσο μεγαλύτερη είναι η ευελιξία του συστήματος. Μέτρο της ευελιξίας μηχανής ή εξοπλισμού θεωρείται το αναμενόμενο κόστος λόγω διαταραχών, που ορίζεται ως το πηλίκο του ρυθμού παραγωγής με διαταραχές προς το ρυθμό χωρίς διαταραχές. Τέσσερα μέτρα που έχουν προταθεί ([5]) προκύπτουν από το πηλίκο της αξίας της συνολικής παραγωγής του συστήματος προς:

- α) το κόστος αναμονής των προϊόντων (ευελιξία διαδικασίας)
- β) το κόστος προετοιμασίας του εξοπλισμού (ευελιξία προϊόντος)
- γ) το κόστος αποθεματοποίησης ετοιμών προϊόντων (ευελιξία ζήτησης)
- δ) το κόστος λόγω αργίας των σταθμών εργασίας (ευελιξία εξοπλισμού).

Η συνολική ευελιξία είναι το άθροισμα των επιμέρους ευελιξιών. Σε άλλη εργασία [6] το μέτρο ισούται με το λόγο της εναπομένουσας αξίας του εξοπλισμού προς τη δαπάνη απόκτησής του. Επίσης με χρήση δυναμικού προγραμματισμού έχει αναπτυχθεί ένα στοχαστικό μοντέλο για την ανάλυση της οικονομικής αξίας της ευελιξίας, υποθέτοντας ότι ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής συμπεριφέρεται καλύτερα σε αβέβαιο περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας παρόμοια μέθοδο έχει δειχθεί ότι η επένδυση σε ευέλικτο εξοπλισμό είναι συμφέρουσα στην περίπτωση που η ζήτηση είναι αιτιοκρατική.

Η μελέτη των οικονομικών συνεπειών της ευελιξίας συνεχίζεται και σε άλλες εργασίες ([7], [8], [9], [10]) και η άποψη που επικρατεί είναι ότι δεν υπάρχει γενική σχέση ανάμεσα στην κερδοφορία της επιχείρησης και στην ευελιξία του συστήματος παραγωγής εξ' αιτίας του

ασαφούς χαρακτήρα της ευελιξίας.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω εργασίες που παρουσιάζουν έμμεσες μετρήσεις της ευελιξίας, αρκετοί συγγραφείς προτείνουν μεθόδους που εξετάζουν λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής. Ως μέτρο ευελιξίας χρησιμοποιείται η πιθανότητα με την οποία ένα σύστημα προσαρμόζεται σε δυναμικό περιβάλλον, ενώ για την ευελιξία δρομολόγησης ως μέτρο θεωρήθηκε ο αριθμός των εναλλακτικών δρομολογήσεων που μπορούν να ακολουθηθούν για την επεξεργασία ενός προϊόντος.

Η πρώτη συστηματική αναφορά σε λειτουργικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ευελιξία αποδίδεται στους Browne et al. [10]. Κύριο μέτρο της ευελιξίας μηχανής είναι ο χρόνος και το κόστος προετοιμασίας μιας μηχανής εν όψει κατεργασίας νέου τύπου προϊόντος. Η ευρωστία του συστήματος παραγωγής είναι για τους Browne et al. το μέτρο της ευελιξίας δρομολόγησης. Ως ευρωστία ορίζεται η ικανότητα του συστήματος να επηρεάζεται ελάχιστα από ενδεχόμενες βλάβες κρατώντας αμετάβλητο το ρυθμό παραγωγής του.

Για την ευελιξίας μηχανής οι Brill and Mandelbaum ([11], [12]) χρησιμοποιούν ως μέτρο την αποτελεσματικότητα με την οποία μια μηχανή επιτελεί ένα σύνολο κατεργασιών. Το σύστημα μέτρησης που προτείνουν μπορεί να επεκταθεί σε επίπεδο ομάδας μηχανών ή εργοστασίου.

Στην πράξη συνήθως ενδιαφέρει ποιο σύστημα ή ποια μηχανή πλεονεκτεί έναντι άλλων έχοντας ως κριτήριο την ευελιξία. Χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που συγκρίνει τους λειτουργικούς παράγοντες των υπό εξέταση συστημάτων οι Abdel-Malek and Wolf [13] εμπλουτίζουν παλαιότερη ιδέα για συγκριτική και όχι απόλυτη μέτρηση της ευελιξίας. Σε στατιστική ανάλυση των απόψεων της διεύθυνσης του συστήματος παραγωγής σε σχέση με το ποιοι παράγοντες και σε ποιο βαθμό επηρεάζουν την ευελιξία, βασίζεται το σύστημα μέτρησης των Gupta and Somers [14]. Στις εργασίες αυτές τα αναγκαία δεδομένα προέρχονται από ερωτηματολόγια που απευθύνονται σε ανώτερα και ανώτατα στελέχη της διοίκησης.

Παρουσιάζοντας τους σταθμούς εργασιών ως κόμβους και τις μετακινήσεις των προϊόντων ως τόξα, αρκετοί ερευνητές χρησιμοποιούν τη θεωρία δικτύων για να διατυπώσουν μέτρα



ευελιξίας μοντελοποιούν το σύστημα παραγωγής με δίκτυα Petri που περιλαμβάνουν γεγονότα (π.χ. άφιξη προϊόντος, αρχή-τέλος κατεργασίας κ.λ.π.) και καταστάσεις (όπως π.χ. διαθέσιμη μηχανή, αναμονή προϊόντος κ.λ.π.). Μέτρο της ευελιξίας είναι ο χρόνος προσαρμογής του συστήματος μετά από την εμφάνιση κάποιας διαταραχής. Με προσανατολισμένα δίκτυα που περιγράφουν τις καταστάσεις και τις μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων του συστήματος, οι Kochikar and Narendran [15] ορίζουν μέτρα για τις ευελιξίες μηχανής, δρομολόγησης, προϊόντος και διαχείρισης υλικών. Η συνολική ευελιξία ορίζεται ως το εσωτερικό γινόμενο του διάνυσματος που εκφράζει τη σπουδαιότητα κάθε τύπου ευελιξίας με το διάνυσμα των αντίστοιχων τύπων.

Ο Kumar [16] διατυπώνει δεκαπέντε αξιώματα που θα πρέπει να πληροί ένα μέτρο ευελιξίας και προτείνει μέτρα σε αναλογία με τα μέτρα εντροπίας.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούμε μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης και ειδικότερα ασαφών έμπειρων συστημάτων για τον προσδιορισμό της τιμής της ευελιξίας ενός συστήματος παραγωγής. Το σύστημα μέτρησης που προτείνουμε βασίζεται στην υπάρχουσα εμπειρία σχετικά με τους παράγοντες που εκδηλώνουν και επηρεάζουν την ευελιξία. Οι βασικές παραδοχές της μεθόδου είναι ([2]):

1. Η ευελιξία είναι εξ ορισμού ασαφής έννοια και η μέτρησή της προέρχεται από τη σύνθεση επιμέρους τύπων που παρουσιάζονται σε διαφορετικά λειτουργικά επίπεδα. Η σύνθεση αυτή αποδίδεται καλύτερα με λογικές παρά αλγεβρικές πράξεις.
2. Η μέτρηση λαμβάνει υπ' όψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου συστήματος παραγωγής.

### 1.3 Δυσκολίες στη μέτρηση της ευελιξίας.

Στις περισσότερες εργασίες η ευελιξία συνδέεται εννοιολογικά με την αβεβαιότητα χωρίς να ορίζονται οι διαστάσεις της ή ισοδύναμα ο χώρος εφαρμογής της. Το γεγονός αυτό προκαλεί σύγχυση όσον αφορά στην δημιουργία ενός ενιαίου θεωρητικού πλαισίου για τη διαστασιολόγηση της έννοιας. Ως παράγοντες που καθιστούν δύσκολη την καθιέρωση συνολικής μεθόδου μέτρησης της ευελιξίας αναφέρονται ([17], [18]) :

1. Η έλλειψη μεθόδου σύνθεσης

α) των λειτουργικών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τον κάθε τύπο και

β) των τύπων ευελιξίας που εκδηλώνονται σε διαφορετικά επίπεδα ιεραρχίας και είναι απαραίτητες στον προσδιορισμό της συνολικής ευελιξίας.

Ένας λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι οι παράμετροι κάθε τύπου ευελιξίας που σχετίζονται με τη μέθοδο μέτρησης δεν είναι ομογενείς.

Παράδειγμα: Έστωσαν δύο συστήματα παραγωγής A και B εκ των οποίων το A παράγει υποσύνολο προϊόντων του B. Το B με κριτήριο τον αριθμό των προϊόντων (χαρακτηριστικό ευελιξίας προϊόντος) που παράγει είναι πιο εύελικτο του A. Ταυτόχρονα όμως ο χρόνος προετοιμασίας του A είναι μικρότερος απ' αυτόν του B, γεγονός που ευθέως αποδίδεται στον μεγαλύτερο βαθμό ευελιξίας μηχανής του A έναντι του B.

2. Δεν υπάρχει ένα - προς - ένα αντιστοιχία ανάμεσα στην ευελιξία και στα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής. Η ικανότητα του συστήματος να αντεπεξέρχεται σε περιπτώσεις βλαβών (ευελιξία δρομολόγησης) μπορεί να αποδοθεί είτε σε πλεονάζοντα εξοπλισμό όπως όμοιες παράλληλες μηχανές, είτε στην ύπαρξη πολυμερών σταθμών εργασίας που επιτελούν πολλές διαφορετικές κατεργασίες και αναπληρώνουν τις μηχανές που δεν λειτουργούν.

3. Η ευελιξία μπορεί να μελετηθεί σε διαφορετικά επίπεδα ιεραρχίας μίας επιχείρησης απαιτώντας δεδομένα για τη μέτρησή της τα οποία δεν ορίζονται με ακρίβεια, όπως για παράδειγμα ο αριθμός κατεργασιών που μπορεί να εκτελέσει ένας σταθμός

εργασίας ή η ικανότητα επαναδρομολόγησης ενός συστήματος διαχείρισης υλικών.

4. Ορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά επιδρούν με αντιφατικό τρόπο στη μέτρηση της ευελιξίας. Η ύπαρξη ομοειδών κομματιών, για παράδειγμα, στη συναρμολόγηση τελικών προϊόντων ενώ αυξάνει την ευελιξία προϊόντος περιορίζει την ευελιξία κατεργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Ανασκόπηση Θεωρίας Ασαφών Συνόλων.

Η θεωρία ασαφών συνόλων που θεμελιώθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 60 από τον L. A. Zadeh αποτελεί μια μαθηματική θεωρία μοντελοποίησης της αβεβαιότητας. Η ασάφεια, κεντρική έννοια της θεωρίας, εκφράζει μια μορφή αβεβαιότητας που σχετίζεται με την έλλειψη γενικά αποδεκτού ορισμού μιας έννοιας ή με την αμφιβολία για το περιεχόμενό της. Η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται σε εκφράσεις όπως "ηλικιωμένος άνθρωπος", "υψηλή θερμοκρασία", ή "μεγάλη ακρίβεια" και προέρχεται από την απουσία καθορισμένων ορίων, είναι ασάφεια, ενώ η αβεβαιότητα στις εκφράσεις "δεν θα βρέξει αύριο" ή "το επόμενο χαρτί είναι άσσος" που σχετίζεται με την πραγματοποίηση ενός φαινομένου ονομάζεται τυχαιότητα και αντιμετωπίζεται από τη θεωρία πιθανοτήτων. Ασάφεια και τυχαιότητα είναι διαφορετικές μορφές αβεβαιότητας. Η ασάφεια εκδηλώνεται κυρίως στον τρόπο που εξηγούνται τα φαινόμενα μέσω της φυσικής γλώσσας ενώ η τυχαιότητα βασίζεται στην ενδεχόμενη εμφάνιση ενός φαινομένου κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

Η θεωρία ασαφών συνόλων αποτελεί το μαθηματικό πλαίσιο εξήγησης και μοντελοποίησης της ασάφειας θεωρώντας βαθμιαία τη μετάβαση των στοιχείων-μελών εντός και εκτός του συνόλου. Η ασαφής λογική είναι μια γενικευμένη έκφραση των ασαφών συνόλων με τη μορφή λογικής πολλών τιμών, όπου σε αντίθεση με τη δυαδική λογική μια πρόταση μπορεί να πάρει άπειρες τιμές ανάμεσα στο 0 (ψευδής) και 1 (αληθής). Στη συνέχεια παραθέτουμε βασικές έννοιες των ασαφών συνόλων και της ασαφούς λογικής ([19], [20], [21], [22]).

Έστω  $X$  ο χώρος ορισμού των συνόλων ή το γενικευμένο σύνολο του οποίου τα στοιχεία παριστάνονται με  $x$ . Ένα ασαφές σύνολο  $A$  στον χώρο  $X$  ορίζεται ως εξής:

$$A = \{[\mu_A(x), x] \mid \mu_A(x), \varepsilon [0,1], x \in X\}$$

όπου η  $\mu_A(x)$  ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής του  $x$  στο  $A$ . Η συνάρτηση συμμετοχής είναι συνεχής ή διακριτή και δηλώνει το βαθμό με τον οποίο το στοιχείο  $x$  ανήκει στο σύνολο

A. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή της  $\mu_A(x)$ , τόσο πιο πολύ το x ανήκει στο A.

Τα ασαφή σύνολα μπορούν επιπλέον να παρουσιαστούν με συναρτήσεις συμμετοχής που οριοθετούνται από διαστήματα. Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση συμμετοχής είναι  $\mu_A(x) = [\alpha, \beta]$ , με  $\alpha, \beta$  τα όρια του διαστήματος.

*Παράδειγμα 1:* Υποθέτουμε ότι κάποιος θέλει να περιγράψει το σύνολο του οποίου στοιχεία είναι οι πολύ μεγάλες πληθυσμιακά πόλεις θεωρώντας τις πόλεις: Τόκιο, Αθήνα, Μόναχο, Μιλάνο, Νέα Υόρκη, Θεσσαλονίκη, Παρίσι και Στρασβούργο. Μερικές απ' τις πόλεις, όπως το Τόκιο και η Νέα Υόρκη, σίγουρα ανήκουν στο σύνολο ενώ κάποιες άλλες όπως η Θεσσαλονίκη και το Στρασβούργο σίγουρα δεν ανήκουν σ' αυτό. Για τις υπόλοιπες όμως δεν μπορούμε εύκολα να πούμε αν ανήκουν ή όχι στο σύνολο των πολύ μεγάλων πληθυσμιακά πόλεων. Το ασαφές σύνολο "πολύ μεγάλες πόλεις" μπορεί να οριστεί:

$$\{(1, \text{Νέα Υόρκη}), (1, \text{Τόκιο}), (.8, \text{Παρίσι}), (.5, \text{Μόναχο}), (.3, \text{Αθήνα}), (.3, \text{Μιλάνο})\}$$

Η ένωση των ασαφών συνόλων A και B, ορίζεται ως το ασαφές σύνολο  $A \cup B$  με συνάρτηση συμμετοχής :

$$A \cup B \leftrightarrow \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x), \quad \forall x \in X$$

και ως τομή των A και B ορίζεται το σύνολο  $A \cap B$  με :

$$A \cap B \leftrightarrow \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x), \quad \forall x \in X$$

όπου  $\vee, \wedge$  οι τελεστές max και min αντίστοιχα. Το συμπλήρωμα  $A^c$  ενός ασαφούς συνόλου A έχει συνάρτηση συμμετοχής :

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in X$$

Οι λογικές πράξεις μεταξύ ασαφών συνόλων είναι επεκτάσεις των αντίστοιχων της δυαδικής λογικής στο χώρο των συναρτήσεων συμμετοχής. Οι κλασσικές ιδιότητες των συνόλων

ισχύουν και στα ασαφή σύνολα με εξαίρεση τον κανόνα της αντίφασης όπου:

$$A \cap A^c \neq \emptyset$$

και ι του αποκλειστικού μέσου όπου

$$A \cup A^c \neq X$$

Η αναπαράσταση της γνώσης στην ασαφή λογική γίνεται μέσω των λεκτικών μεταβλητών (linguistic variables), οι οποίες δέχονται ως τιμές λέξεις ή προτάσεις φυσικής ή τεχνητής γλώσσας. Για παράδειγμα, η ηλικία είναι μια λεκτική μεταβλητή που παίρνει τιμές όπως: νέος, όχι νέος, πολύ νέος, γέρος, όχι πολύ γέρος, κλπ. Κάθε λεκτική μεταβλητή συμβολίζεται με:

$$[V, LV, \mu_{LV}, X]$$

όπου  $V$  : το όνομα της μεταβλητής,

$LV$  : το σύνολο των λεκτικών τιμών της μεταβλητής,

$\mu_{LV}$  : οι συναρτήσεις συμμετοχής των λεκτικών τιμών,

$X$  : το γενικευμένο σύνολο ορισμού.

Το σύνολο ορισμού  $X$  περιέχει τις αριθμητικές τιμές που σχετίζονται με τη μεταβλητή. Στην περίπτωση της μεταβλητής "ηλικία" είναι το  $[0, 100 \text{ έτη}]$ .

Μία ασαφής υπό συνθήκη δήλωση ή ένας ασαφής παραγωγικός κανόνας είναι έκφραση της μορφής "ΕΑΝ το  $X$  είναι  $A$  ΤΟΤΕ το  $Y$  είναι  $B$ " ή συμβολικά  $(A \rightarrow B)$ , όπου  $A, B$  είναι οι τιμές των λεκτικών μεταβλητών  $X$  και  $Y$  αντίστοιχα. Η πρόταση "το  $X$  είναι  $A$ " ονομάζεται προηγούμενο του κανόνα και είναι μαθηματικά ισοδύναμη με τη συνάρτηση συμμετοχής  $\mu_A(x)$  του ασαφούς συνόλου  $A$ . Ομοίως η πρόταση "το  $Y$  είναι  $B$ " ονομάζεται επακόλουθο ή συμπέρασμα και εκφράζεται από τη συνάρτηση  $\mu_B(x)$  του  $B$ . Οι "ΕΑΝ-ΤΟΤΕ" κανόνες αποτελούν τον τρόπο αναπαράστασης της γνώσης στα ασαφή έμπειρα συστήματα. Μαθηματικά ένας "ΕΑΝ-ΤΟΤΕ" κανόνας είναι ισοδύναμος με τη σχεσιακή εξίσωση  $\mu_R$  :

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \otimes \mu_B(x), \quad x \in X, y \in Y$$

όπου  $\otimes$  οποιοσδήποτε τελεστής ασαφούς συμπεράσματος.

Η *προσεγγιστική συνεπαγωγή* είναι η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος που χρησιμοποιούν τα ασαφή έμπειρα συστήματα και βασίζεται στη σύνθεση ασαφών σχέσεων μεταξύ παρατηρήσεων που δεν ταυτίζονται με την αποκτηθείσα γνώση για το πρόβλημα και των κανόνων που εκφράζουν τη γνώση αυτή. Σχηματικά, για μία παρατήρηση  $A'$  ( $A \neq A'$ ), η διαδικασία προσεγγιστικής συνεπαγωγής είναι:

το $x$ είναι $A'$	(παρατήρηση)
"ΕΑΝ το $x$ είναι $A$ ΤΟΤΕ το $y$ είναι $B$ "	(κανόνας)
το $Y$ είναι $B'$	(συμπέρασμα)

ή στο χώρο των συναρτήσεων συμμετοχής

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{A'}(x) \circ \mu_R(x, y)$$

όπου  $\circ$  κάποιος τελεστής ή μέθοδος σύνθεσης. Ο κανόνας συνθετικού συμπεράσματος είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσεγγιστικής συνεπαγωγής (Zadeh 1973), σύμφωνα με την οποία η συνάρτηση συμμετοχής  $\mu_{B'}(y)$  του συμπεράσματος είναι:

$$\mu_{B'}(y_j) = \bigvee_i [\mu_{A'}(x_i) \wedge \mu_{A \rightarrow B}(x_i, y_j)], \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, J$$

Μία λογική πρόταση  $\Phi$  έχει τη *Διαζευκτική Κανονική Μορφή* (ΔΚΜ) όταν:

$$\Phi = \Phi_1 \vee \Phi_2 \vee \dots \vee \Phi_\nu, \quad \nu \geq 1$$

όπου κάθε  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_\nu$  είναι σύζευξη στοιχειωδών προτάσεων.

Η δυϊκή έννοια της ΔΚΜ ονομάζεται *Συζευκτική Κανονική Μορφή* (ΣΚΜ). Μία

πρόταση  $\Phi$  έχει την ΣΚΜ αν και μόνο αν είναι της μορφής:

$$\Phi = \Phi_1 \wedge \Phi_2 \wedge \dots \wedge \Phi_n. \quad n \geq 1$$

όπου κάθε  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  είναι διάζευξη στοιχειωδών προτάσεων.

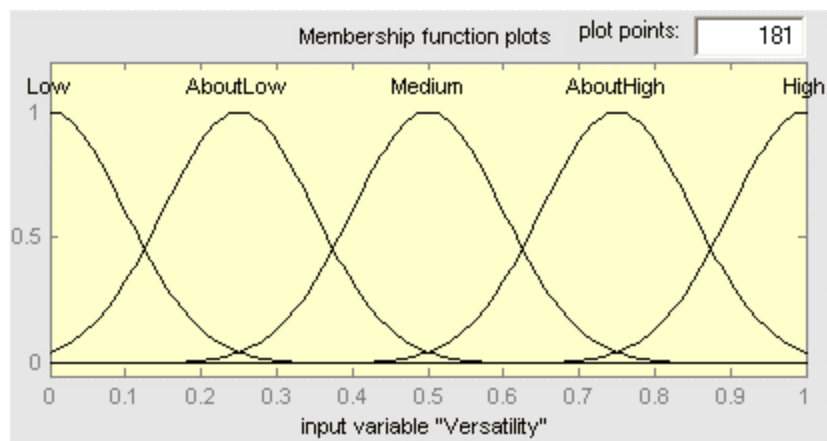


## 2.2 Πώς χρησιμοποιείται η ασαφής λογική για τη μέτρηση της ευελιξίας.

Η βασική ιδέα για τη δημιουργία του μοντέλου είναι η σύνθεση όλων των επιμέρους τύπων και των αντίστοιχων λειτουργικών παραμέτρων τους για τον καθορισμό της συνολικής ευελιξίας. Κάτι τέτοιο πραγματοποιείται μέσω ασαφών AN - TOTE κανόνων, οι οποίοι είναι υποθετικές δηλώσεις που συσχετίζουν παρατηρήσεις που αφορούν σε κάθε λειτουργικό παράγοντα (AN - μέρος) με την τιμή της ευελιξίας (TOTE – μέρος). Παράδειγμα τέτοιου κανόνα είναι :

*AN η Ομοιότητα Λειτουργιών είναι Μικρή ΚΑΙ η Ικανότητα Αντικατάστασης είναι Μέτρια TOTE η Ευελιξία Δρομολόγησης είναι Περίπου Μικρή,*

όπου Ευελιξία Δρομολόγησης, Ομοιότητα Λειτουργιών και Ικανότητα Αντικατάστασης είναι οι λεκτικές μεταβλητές του παραπάνω κανόνα, δηλαδή μεταβλητές που οι τιμές τους είναι λεκτικές, όπως Μικρή, Μεσαία, Μεγάλη, αντί για αριθμητικές. Αυτές οι τιμές είναι ασαφή σύνολα με συγκεκριμένη μαθηματική έννοια που αναπαριστάται από την κατάλληλη συνάρτηση συμμετοχής. Στην εικόνα 1 φαίνονται πέντε συναρτήσεις συμμετοχής με τις λεκτικές τιμές τους.



Εικόνα 1: Συναρτήσεις συμμετοχής - Λεκτικές τιμές

Οι ασαφείς κανόνες είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος απεικόνισης των περιοχών εισόδου με περιοχές εξόδου, ειδικά όταν η φυσική σχέση μεταξύ τους είναι αρκετά πολύπλοκη για να

περιγραφεί με μαθηματικά μοντέλα. Καθώς η επιρροή των επιμέρους λειτουργικών παραμέτρων στην ευελιξία είναι δύσκολο να υπολογιστεί αναλυτικά, επινοούμε ασαφείς κανόνες για την αναπαράσταση της συσσωρευμένης ανθρώπινης γνώσης. Η γνώση που αφορά την ευελιξία, η οποία είναι ασαφής ή ακόμα και μερικώς ασυνεπής, χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ευελιξία μέσω απλών υπολογισμών. Στη συνέχεια περιγράφεται η δομή των ασαφών κανόνων και αναλύεται η ασαφής μορφοποίηση που χρησιμοποιείται κατά τη δημιουργία της μεθόδου μέτρησης.

Έστω ότι  $F_i, i = 1, \dots, N$ , είναι το σύνολο των λειτουργικών παραμέτρων ενός τύπου ευελιξίας και  $A_i$  η λεκτική τιμή για κάθε τύπο, τότε ο κανόνας που προκύπτει από τη γνώση είναι :

$$\text{AN } F_1 \text{ είναι } A_1 \text{ ΚΑΙ } \dots \text{ ΚΑΙ } F_N \text{ είναι } A_N \text{ ΤΟΤΕ } F_{MF} \text{ είναι } MF$$

ή

$$(A_1 \text{ ΚΑΙ } A_2 \text{ ΚΑΙ } \dots \text{ ΚΑΙ } A_N) \rightarrow MF$$

όπου  $MF$  είναι το σύνολο των λεκτικών τιμών του τύπου ευελιξίας  $F_{MF}$ . Όλες οι λεκτικές τιμές είναι  $A_i$  και  $MF$  είναι συναρτήσεις συμμετοχής που καθορίζονται από τα σύνολα αναφοράς έτσι ώστε  $a_i(x)$  και  $mf_i(y)$  να δηλώνουν το βαθμό συμμετοχής των στοιχείων  $x$  και  $y$  στα  $A_i$  και  $MF$  αντίστοιχα. Το 'ΚΑΙ' αναπαριστά την ασαφή σύνδεση και έχει διάφορες μαθηματικές ερμηνείες. Η επιλογή του 'ΚΑΙ' ως συνδετικό στους κανόνες επαφίεται στην εμπειρία και στη δομή της εγκατάστασης, καθώς η ευελιξία εμπεριέχει και το στοιχείο της υποκειμενικότητας.

Έστω ότι  $D = A_1 \text{ ΚΑΙ } A_2 \text{ ΚΑΙ } \dots \text{ ΚΑΙ } A_N$ . Τότε η προηγούμενη σχέση γράφεται :

$$\text{AN } (F_1, F_2, \dots, F_N) \text{ είναι } D \text{ ΤΟΤΕ } F_{MF} \text{ είναι } MF,$$

ή  $D \rightarrow MF$ , όπου  $(F_1, F_2, \dots, F_N)$  είναι ενοποιημένη μεταβλητή. Η ασαφής σχέση  $L$  που περιέχεται στην προηγούμενη σχέση είναι :

$$L_{D \rightarrow MF}(x, y) = f_{\rightarrow}[d(x), mf(y)] \quad (1)$$

όπου  $f_{\rightarrow}$  είναι η συναρτησιακή μορφή της ασαφούς συνεπαγωγής και  $d(x)$  η συνάρτηση συμμετοχής της σύνδεσης  $D$ . Η εξίσωση (1) είναι η μαθηματική ερμηνεία ενός ασαφή κανόνα και καταλήγει στην κατασκευή ενός πίνακα που απεικονίζει τη γνώση που περιγράφεται στον κανόνα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιοδήποτε τελεστές συνεπαγωγής και σύνδεσης για να επιτευχθεί η επιθυμητή αναπαράσταση γνώσης με αυτή τη μορφή.

Οι είσοδοι των κανόνων είναι ασαφή σύνολα τα οποία, εν γένει, είναι διαφορετικά από τα  $A_i$  που περιέχονται στη βάση κανόνων. Συνεπώς, η σύνδεση των συνόλων αυτών είναι διαφορετική από το  $D$ . Τότε η ευελιξία υπολογίζεται ως εξής :

$$MF' = D' \circ L_{D \rightarrow MF} \quad (2)$$

όπου το  $\circ$  αναπαριστά τη σύνθεση (approximate reasoning),  $MF'$  είναι η συναγόμενη τιμή της ευελιξίας και  $D'$  είναι η σύνδεση των παρατηρήσεων. Η σύνθεση χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπεράσματος από μία παρατήρηση που διαφέρει από τους πρώτους όρους των κανόνων. Για παράδειγμα, έστω ότι γνωρίζουμε ότι :

*ΑΝ η Ομοιότητα Λειτουργιών είναι Μικρή ΚΑΙ η Ικανότητα Αντικατάστασης είναι Μέτρια  
ΤΟΤΕ η Ευελιξία Δρομολόγησης είναι Περίπου Μικρή (Κανόνας)*

και για ένα σύστημα παραγωγής έχουμε ότι :

*Η Ομοιότητα Λειτουργιών είναι Περίπου Μικρή (Παρατήρηση)*

Μπορούμε να υπολογίσουμε την *Ευελιξία Δρομολόγησης* με χρήση της εξίσωσης (2). Σε επίπεδο συναρτήσεων συμμετοχής η τιμή δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$mf'(y) = d'(x) \circ f_{\rightarrow}[d(x), mf(y)] \quad (3)$$

όπου,  $mf'(y)$ ,  $d'(x)$ ,  $d(x)$ ,  $mf(y)$  είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής των  $MF'$ ,  $D'$ ,  $MF$  και  $D$ , αντίστοιχα. Ωστόσο, στην (3) χρειαζόμαστε τη συνάρτηση συμμετοχής  $d'(x)$ , η οποία στο παράδειγμά μας ήταν η συνάρτηση συμμετοχής της λεκτικής μεταβλητής «Περίπου Μικρή». Έχειδειχθεί ότι αν  $A$  είναι μία λεκτική τιμή οι οποία εκφράζεται από ένα ασαφές σύνολο, τότε η  $A^k$  ορίζεται ως μία τροποποιημένη έκδοση της αρχικής λεκτικής τιμής,

$$A^k = \int_x [\mu_A(x)]^k / x, x \in X \quad (4)$$

όπου η ολοκλήρωση δηλώνει ένωση των ζευγών  $[\mu_A(x), x]$  και «/» είναι δείκτης.

Παράδειγμα :

Το *Περίπου A* ορίζεται ως η διεύρυνση (dilation operation) η οποία είναι :

$$\text{Περίπου } A = \text{DIL}(A) = A^{0.5}$$

και το *Πολύ A* που είναι αποτέλεσμα συγκέντρωσης (concentration operation) δίδεται από τη σχέση :

$$\text{Πολύ } A = \text{CON}(A) = A^2$$

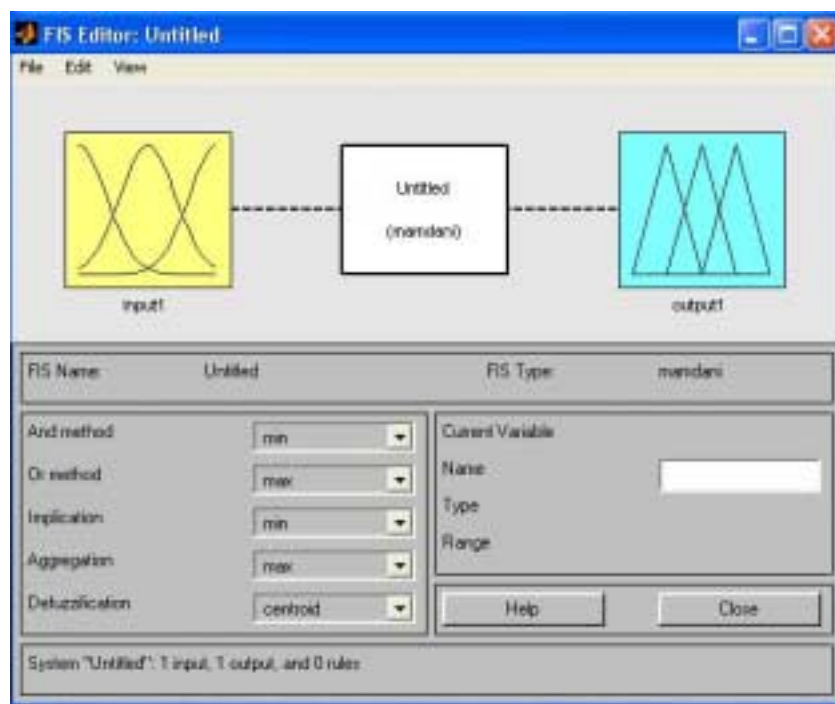
Με χρήση της (4) μαζί με την έννοια της άρνησης και το συνδετικό «ΚΑΙ», είναι δυνατή η μορφοποίηση μαθηματικών εννοιών σύνθετων λεκτικών μεταβλητών, όπως «όχι πολύ υψηλό» και «περίπου χαμηλό αλλά όχι αρκετά χαμηλό».

Η ανωτέρω ανάλυση παρουσιάζεται στην εργασία των Tsourveloudis και Phillis [3].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Σχεδίαση Ασαφή Ελεγκτή για κάθε τύπο ευελιξίας.

Για τη σχεδίαση του κάθε ασαφή ελεγκτή χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής που εμπεριέχεται στο λογισμικό πακέτο MATLAB. Πρόκειται για ένα εύχρηστο λογισμικό εργαλείο με πολύ μεγάλες δυνατότητες για τον χρήστη. Η μορφή του περιβάλλοντος σχεδίασης φαίνεται στην εικόνα 2.



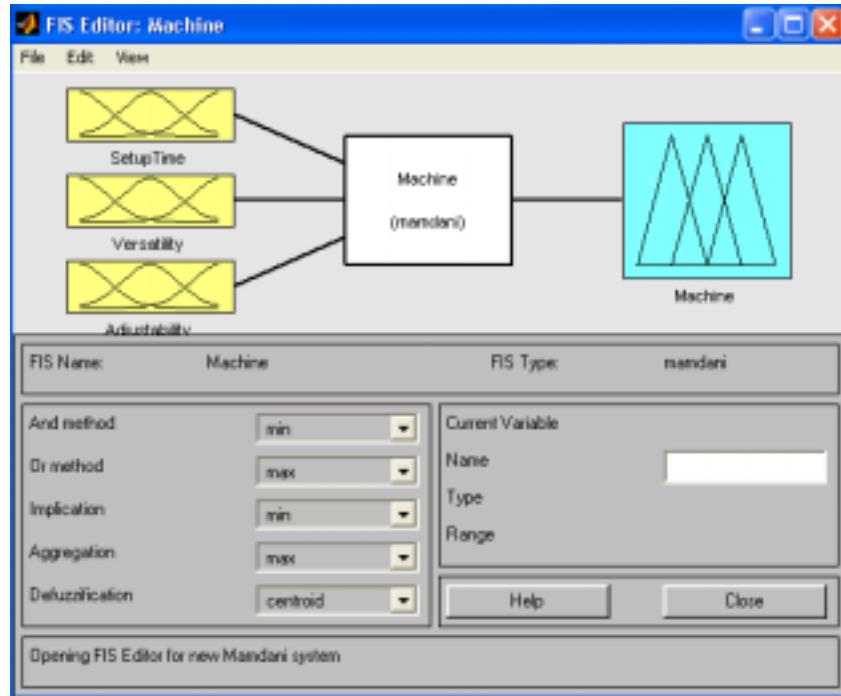
Εικόνα 2: Περιβάλλον σχεδίασης ασαφή ελεγκτή (MATLAB).

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης για κάθε ασαφή ελεγκτή.

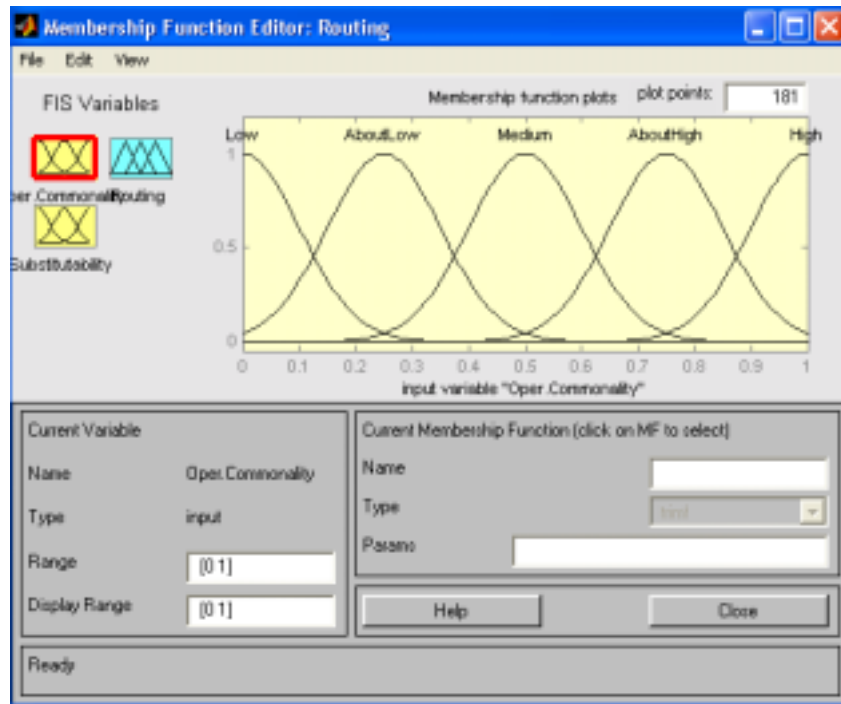
Αρχικά γίνεται επιλογή του τύπου των κανόνων που χαρακτηρίζουν τον ελεγκτή (Mamdani – Sugeno). Εδώ χρησιμοποιούνται Mamdani ελεγκτές. Χαρακτηριστικό στοιχείο των ελεγκτών

Mamdani είναι ότι η αναπαράσταση των τιμών εισόδου αλλά και εξόδου γίνεται με λεκτικές τιμές και συναρτήσεις συμμετοχής. Στη συνέχεια καθορίζονται οι ασαφείς τελεστές για την Τομή, την Ένωση, τη Συνεπαγωγή και τη Συνάθροιση, καθώς και η μέθοδος αποασαφοποίησης. Οι τιμές που δόθηκαν είναι  $\min$ ,  $\max$ ,  $\min$ ,  $\max$  και centroid αντίστοιχα. Ονομάζουμε τον ελεγκτή με το όνομα του τύπου ευελιξίας που θα υπολογίζει.

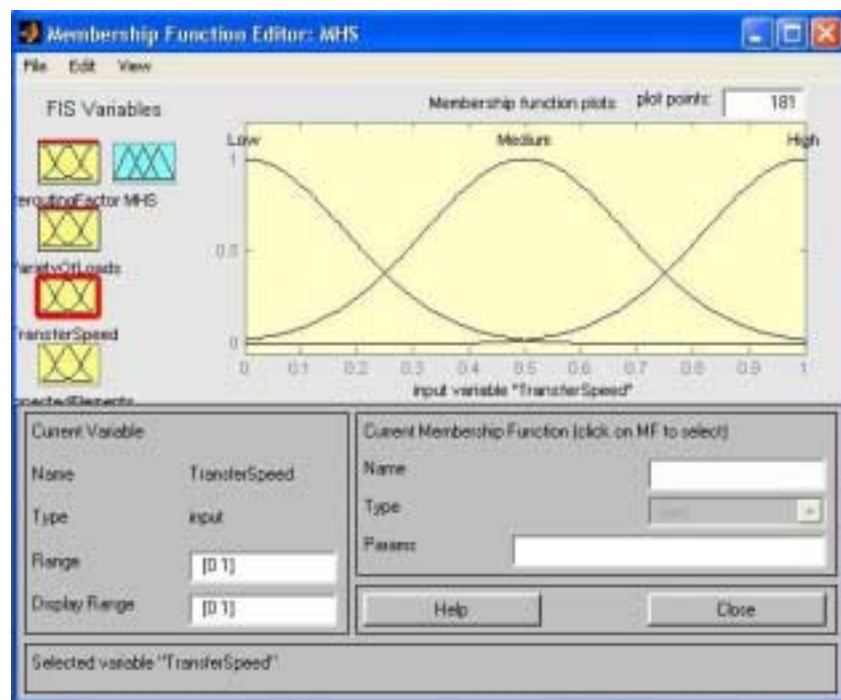
Εν συνεχεία γίνεται η προσθήκη των επιθυμητών εισόδων. Για κάθε μία είσοδο ορίζεται ο αριθμός και ο τύπος των συναρτήσεων συμμετοχής και το εύρος της. Κατά τη σχεδίαση των οκτώ από τους εννέα ασαφών ελεγκτών χρησιμοποιήθηκαν πέντε συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε είσοδο, τύπου gauss, με εύρος από μηδέν έως ένα. Σε μία περίπτωση ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν τρεις συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε είσοδο. Ομοίως για κάθε, μοναδική, έξοδο ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν πέντε συναρτήσεις συμμετοχής, τύπου gauss, με εύρος από μηδέν έως ένα. Αφού δοθούν οι επιθυμητές λεκτικές τιμές για κάθε μία συνάρτηση συμμετοχής, γίνεται η μετάβαση στη βάση κανόνων του ελεγκτή.



Εικόνα 3: Είσοδοι και έξοδος για την ευελιξία μηχανής.



Εικόνα 4: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου.

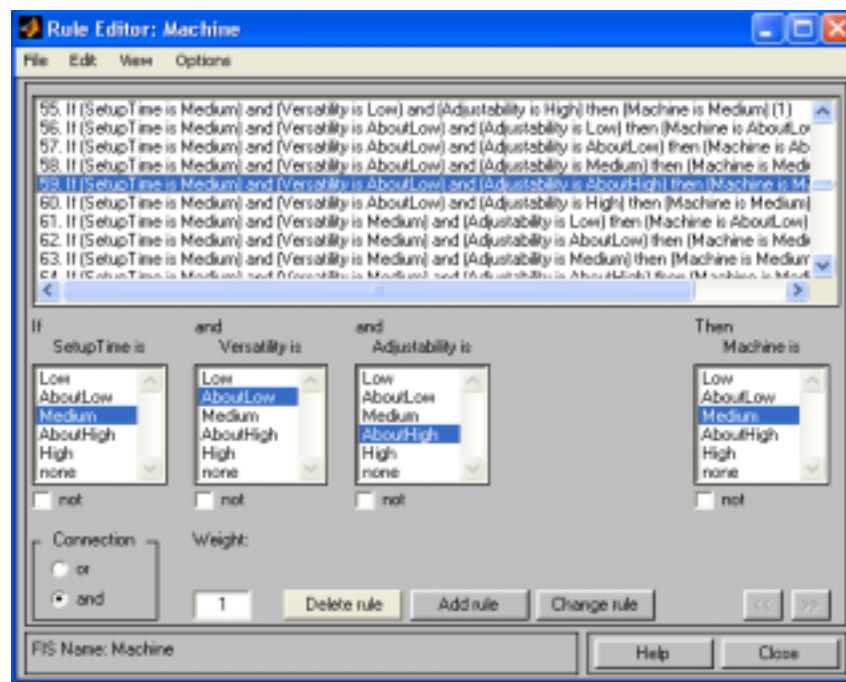


Εικόνα 5: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου.

Η βάση κανόνων διαμορφώνεται από τον χρήστη ως ακολούθως. Για κάθε κανόνα επιλέγονται οι λεκτικές τιμές των εισόδων, η σύνδεσή τους (ένωση (or) ή η τομή (and)), η αντίστοιχη επιθυμητή λεκτική τιμή της εξόδου και η βαρύτητα του κανόνα αυτού. Στη βάση κανόνων των εννέα ασαφών ελεγκτών που δημιουργήθηκαν υπάρχουν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των τιμών των εισόδων. Για τη σύνδεση των εισόδων χρησιμοποιήθηκε η τομή (and) τους και το βάρος του κάθε κανόνα ορίστηκε ένα (1) (ισοβαρείς κανόνες). Η διαμόρφωση της βάσης κανόνων όλων των ελεγκτών ακολούθησε μία ‘αυστηρή’ νοοτροπία. Σε περιπτώσεις όπου το συμπέρασμα από μία παρατήρηση θα μπορούσε να πάρει εξίσου δύο λεκτικές τιμές, κατά συνθήκη έπαιρνε την χειρότερη εξ’ αυτών.

Παράδειγμα: Αν A είναι Low ΚΑΙ B είναι About Low ΤΟΤΕ C είναι Low (και όχι About Low).

Αν A είναι High ΚΑΙ B είναι About High ΤΟΤΕ C είναι About High (και όχι High).



Εικόνα 6: Βάση κανόνων του ελεγκτή.

Με την παραπάνω μεθοδολογία σχεδιάστηκαν στο λογισμικό πακέτο MATLAB εννέα ασαφείς ελεγκτές, ένας για κάθε τύπο ευελιξίας, με τα εξής χαρακτηριστικά:



- Ευελιξία μηχανής: 3 είσοδοι, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 125 κανόνες
- Ευελιξία διομολόγησης: 2 είσοδοι, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 25 κανόνες
- Ευελιξία διαχείρισης υλικών: 4 είσοδοι, 3 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 81 κανόνες
- Ευελιξία προϊόντος: 3 είσοδοι, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 125 κανόνες
- Ευελιξία κατεργασίας: 1 είσοδος, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 5 κανόνες
- Ευελιξία διαδικασίας: 2 είσοδοι, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 25 κανόνες
- Ευελιξία βαθμού: 1 είσοδος, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 5 κανόνες
- Ευελιξία επέκτασης: 2 είσοδοι, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 25 κανόνες
- Ευελιξία εργασίας: 2 είσοδοι, 5 λεκτικές τιμές ανά είσοδο, 25 κανόνες

Η αρχιτεκτονική των ελεγκτών στηρίχτηκε στην εργασία των Tsourveloudis και Phillis [3].

### 3.1.1 Ευελιξία μηχανής.

Η ευελιξία μηχανής (*Machine Flexibility*) ( $F_M$ ) είναι ο απλούστερος τύπος ευελιξίας και αποτελεί απαραίτητο δομικό στοιχείο για την εκτίμηση της συνολικής ευελιξίας. Οι λεκτικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί είναι:

- Ο *χρόνος προετοιμασίας* (Setup time) ( $S$ ), που απαιτείται για την προετοιμασία της μηχανής προκειμένου να εκτελέσει μία λειτουργία, αντιπροσωπεύει την ικανότητα της μηχανής να απορροφά αποτελεσματικά τις αλλαγές της παραγωγικής διαδικασίας και επηρεάζει περισσότερο την ευελιξία όταν οι παρτίδες είναι μικρές.
- *Πολλαπλή χρησιμότητα* (Versatility) ( $V$ ), που ορίζεται ως η ποικιλία των λειτουργιών που μπορεί να κάνει η μηχανή. Αναφέρεται στην ικανότητα εύκολης μετάβασης μεταξύ λειτουργιών και συνθηκών εργασίας. Εργασίες με διαφορετικό εργαλείο λαμβάνονται υπόψη. Η πολλαπλή χρησιμότητα σχετίζεται με φυσικά χαρακτηριστικά της μηχανής όπως τον αριθμό αξόνων κίνησης, τη μέγιστη ακρίβεια, την ποσότητα και διαφορετικότητα των κομματιών που μπορεί να κατεργαστεί.
- *Προσαρμοστικότητα* (Adjustability) ( $R$ ) που ορίζεται ως το μέγεθος του χώρου εργασίας και σχετίζεται με τις μέγιστες και ελάχιστες διαστάσεις των κομματιών που μπορεί να κατεργαστεί.

Έστω,  $T_s$ ,  $T_v$ ,  $T_r$ ,  $T_{FM}$  λεκτικές τιμές για τα  $S, V, R, F_M$  αντίστοιχα. Οι ασαφείς κανόνες είναι της μορφής:

**AN**  $S$  είναι  $T_s$  **KAI**  $V$  είναι  $T_v$  **KAI**  $R$  είναι  $T_r$  **TOTE**  $F_M$  είναι  $T_{FM}$

Όπου το «**KAI**» δηλώνει ασαφή σύνδεση και το «**TOTE**» τη δοσμένη ασαφή συνεπαγωγή.  
Ο ίδιος συμβολισμός θα ακολουθήσει και στη συνέχεια.

### 3.1.2 Ευελιξία δρομολόγησης.

Η ευελιξία δρομολόγησης (*Routing Flexibility*) ( $F_R$ ) επιτρέπει τη γρήγορη αντίδραση όταν συμβαίνουν μη αναμενόμενα γεγονότα, όπως η βλάβη σε μία μηχανή, και ελαχιστοποιεί τις συνέπειες παρεμβολών της παραγωγικής διαδικασίας. Επιτυγχάνεται όταν το σύστημα αποτελείται από μηχανές που εκτελούν πολλές εργασίες και μπορούν να εναλλάσσονται, σύστημα διαχείρισης υλικών, λογισμικό ελέγχου επανασχεδίασης και πληθώρα σε μηχανές, εργαλεία και διαδικασίες. Η ικανότητα να αντιμετωπίζεται μία βλάβη είναι υπαρκτή όταν κάθε λειτουργία μπορεί να γίνει σε περισσότερες από μία μηχανές. Οι λεκτικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί είναι:

- *Ομοιότητα λειτουργιών* (*Operation commonality*) ( $C_o$ ) που εκφράζει τον αριθμό των κοινών λειτουργιών που κάνει μια ομάδα μηχανών για την παραγωγή ενός προϊόντος.
- *Ικανότητα αντικατάστασης* (*Substitutability*) ( $S_b$ ) η οποία ορίζεται ως η ικανότητα ενός συστήματος να επαναδρομολογεί και να επανασχεδιάζει εργασίες αποτελεσματικά, κάτω από συνθήκες αποτυχίας.

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία δρομολόγησης είναι της μορφής:

**AN**  $C_o$  είναι  $T_{C_o}$  **KAI**  $S_b$  είναι  $T_{S_b}$  **TOTE**  $F_R$  είναι  $T_{FR}$

### 3.1.3 Ευελιξία διαχείρισης υλικών.

Οι λεκτικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται τη μέτρηση της ευελιξίας διαχείρισης υλικών (*Material Handling System Flexibility*) ( $F_{MHS}$ ) είναι:

- *Παράγοντας επαναδρομολόγησης* (Rerouting factor) (B), ο οποίος υποδεικνύει την ικανότητα του συστήματος να αλλάζει διαδρομές αυτόματα ή με μικρή καθυστέρηση και κόστος.
- *Ποικιλία φορτίων* (Variety of loads) (P) που ένα σύστημα διαχείρισης υλικών μεταφέρει, όπως κομμάτια, εργαλεία κ.τ.λ.. χαρακτηρίζεται από το μέγεθος, τις διαστάσεις και το βάρος των φορτίων.
- *Ταχύτητα μεταφοράς* (Transfer speed) (C) που σχετίζεται με το βάρος και τη γεωμετρία των προϊόντων, καθώς και με τη συχνότητα μεταφοράς.
- *Αριθμός συνδεδεμένων στοιχείων* (Number of connected elements) όπως μηχανές και προσωρινές μονάδες αποθήκευσης.

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία διαχείρισης υλικών είναι της μορφής:

$AN$   $B$  είναι  $T_B$  ΚΑΙ  $P$  είναι  $T_P$  ΚΑΙ  $C$  είναι  $T_C$  **TOTE**  $F_{MHS}$  είναι  $T_{F_{MHS}}$

### 3.1.4 Ευελιξία προϊόντος.

Η ευελιξία προϊόντος (*Product Flexibility*) ( $F_P$ ) σχετίζεται με τον αριθμό των προϊόντων που παράγονται ή συναρμολογούνται από ένα σύστημα παραγωγής μέσα σε καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η ευελιξία προϊόντος βοηθά την εταιρία να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις μεταβολών με την γρήγορη εισαγωγή νέων προϊόντων στην αγορά.

Οι λεκτικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται τη μέτρηση της ευελιξίας προϊόντος είναι:

- *Ποικιλία προϊόντων* (Part variety) ( $V_P$ ) που σχετίζεται με τον αριθμό νέων προϊόντων που μπορεί να παράγει το σύστημα παραγωγής σε δεδομένη χρονική διάρκεια χωρίς σημαντικές επενδύσεις εξοπλισμό και λαμβάνει υπόψη τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των προϊόντων.

- *Κόστος αλλαγής* (Changeover effort) ( $S_p$ ) σε χρόνο και χρήμα που απαιτείται για προετοιμασία για την παραγωγή ενός νέου πακέτου προϊόντων. Εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος να απορροφά τις ποικίλες ανάγκες τις αγοράς.
- *Ομοιότητα κομματιών* (Part commonality) ( $C_p$ ) που αναφέρεται στον αριθμό των όμοιων κομματιών που χρησιμοποιούνται στη συναρμολόγηση ενός τελικού προϊόντος. Μετράει την ικανότητα εισαγωγής νέων προϊόντων γρήγορα και οικονομικά και ακόμα υποδεικνύει τις διαφορές μεταξύ δύο προϊόντων.

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία προϊόντος είναι της μορφής:

**AN**  $V_p$  είναι  $T_{V_p}$  **KAI**  $S_p$  είναι  $T_{S_p}$  **KAI**  $C_p$  είναι  $T_{C_p}$  **TOTE**  $F_p$  είναι  $T_{F_p}$

### 3.1.5 Ευελιξία κατεργασίας.

Η ευελιξία κατεργασίας (*Operation Flexibility*) ( $F_o$ ) αναφέρεται στη δυνατότητα παραγωγής ενός προϊόντος με διαφορετικούς τρόπους αλλάζοντας την ακολουθία των κατεργασιών που έχει προσχεδιαστεί. Ορίζουμε τη λεκτική μεταβλητή *αριθμός ακολουθιών παραγωγής* (Number of production sequences) ( $O_s$ ) για όλα τα προϊόντα που παράγονται από το σύστημα. Για κάθε προϊόν, η  $O_s$  δίνεται από τον αριθμό όλων των πιθανών ακολουθιών κατεργασιών μέσω των οποίων παράγεται το προϊόν.

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία κατεργασίας είναι της μορφής:

**AN**  $O_s$  είναι  $T_{O_s}$  **TOTE**  $F_o$  είναι  $T_{F_o}$

### 3.1.6 Ευελιξία διαδικασίας.

Η ευελιξία διαδικασίας (*Process Flexibility*) ( $F_s$ ) εκφράζει την ικανότητα του συστήματος παραγωγής να παράγει διαφορετικά προϊόντα ταυτόχρονα. Για να επιτευχθεί χρειάζεται

συνδυασμός βασικών χαρακτηριστικών όπως μηχανές πολλών κατεργασιών, επιπλέον εξοπλισμός, συσκευές διαχείρισης υλικών και ποικιλία διαδικασιών.

Οι λεκτικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται τη μέτρηση της ευελιξίας διαδικασίας είναι:

- *Σύνολο προϊόντων* (Set of part types) ( $P_s$ ) που μπορούν να παραχθούν ταυτόχρονα χωρίς σημαντικές καθυστερήσεις προετοιμασίας που προέρχονται από βλάβες ή επανασχεδιασμό μεγάλης κλίμακας.
- *Κόστη προετοιμασίας* (Setup costs) ( $C_s$ )

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία διαδικασίας είναι της μορφής:

**AN**  $P_s$  είναι  $T_{P_s}$  **KAI**  $C_s$  είναι  $T_{C_s}$  **TOTE**  $F_s$  είναι  $T_{F_s}$

### 3.1.7 Ευελιξία βαθμού.

Ευελιξία βαθμού (*Volume Flexibility*) ( $F_v$ ) είναι η ικανότητα ενός συστήματος παραγωγής να αλλάζει το μέγεθος της παραγωγής και να εξακολουθεί να λειτουργεί επικερδώς. Μπορεί να θεωρηθεί ως η απόκριση στις διαφοροποιήσεις της ζήτησης και υποδηλώνει ότι η εταιρία είναι παραγωγική ακόμα και σε χαμηλή χρήση. Σχετίζεται ακόμα με την πρόσληψη προσωρινού προσωπικού για την αντιμετώπιση των αλλαγών στη ζήτηση.

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία βαθμού είναι της μορφής:

**AN**  $R_v$  είναι  $T_{R_v}$  **TOTE**  $F_v$  είναι  $T_{F_v}$

όπου το  $R_v$  αναπαριστά την *έκταση των μεγεθών* (Volume) για τα οποία η εταιρία λειτουργεί επικερδώς.

### 3.1.8 Ευελιξία επέκτασης.

Ευελιξία επέκτασης (*Expansion Flexibility*) ( $F_E$ ) είναι η ικανότητα αλλαγής του όγκου ή της ποιότητας των προϊόντων εύκολα και οικονομικά. Η ευελιξία επέκτασης διευκολύνει την μετακίνηση ή την προσθήκη εξοπλισμού κάθε είδους και ελαττώνει το χρόνο και το κόστος που απαιτείται για την παραγωγή ενός νέου προϊόντος.

Οι λεκτικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται τη μέτρηση της ευελιξίας επέκτασης είναι:

- *Δείκτης προσαρμογής* (Modularity index) ( $M_D$ ) που αναπαριστά την ευκολία προσθήκης νέων μηχανημάτων σε ένα σύστημα παραγωγής χωρίς σημαντική προσπάθεια και αλλαγές.
- *Ικανότητα επέκτασης* (Expansion ability) ( $C_E$ ) που είναι ο χρόνος και το κόστος που απαιτείται για να την αύξηση της απόδοσης σε συγκεκριμένο επίπεδο.

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία επέκτασης είναι της μορφής:

AN  $M_D$  είναι  $T_{M_d}$  ΚΑΙ  $C_E$  είναι  $T_{ce}$  **TOTE**  $F_E$  είναι  $T_{fe}$

### 3.1.9 Ευελιξία εργασίας.

Η ευελιξία εργασίας (*Labor Flexibility*) ( $F_L$ ) είναι η ευκολία με την οποία μπορεί να μετακινηθεί προσωπικό από τμήμα σε τμήμα ενός οργανισμού. Εκμεταλλευόμενη το ευέλικτο εργατικό δυναμικό, μία εταιρία μπορεί να ανταποκρίνεται γρήγορα σε μη αναμενόμενο φόρτο εργασίας που ίσως προκύψει.

Οι λεκτικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται τη μέτρηση της ευελιξίας εργασίας είναι:

- *Επίπεδο εκπαίδευσης* (Training level) ( $W$ ). Η εκπαίδευση και η κατάρτιση μπορεί να οδηγήσουν σε βελτίωση της ευελιξίας. Τα προγράμματα εκπαίδευσης στοχεύουν περισσότερο στην ανάπτυξη ικανοτήτων για την απασχόληση σε διαφορετικές εργασίες, παρά στην εξειδίκευση, η οποία έρχεται σε σύγκρουση με την ευελιξία εργασίας. Με τον τρόπο αυτό οι εργαζόμενοι μπορούν να ασχοληθούν με

περισσότερες από μία εργασίες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ικανότητα της εταιρίας να αντιμετωπίζει απροσδόκητα γεγονότα.

- *Εναλλαγή εργασιών* (Job rotation) (J). Σχετίζεται με την εκπαίδευση και εκφράζει τη συχνότητα με την οποία οι εργαζόμενοι μεταφέρονται σε νέες θέσεις εργασίας κάτω από κανονικές συνθήκες. Η εναλλαγή εργασιών αυξάνει την πιθανότητα γρήγορης αντίδρασης σε μία απρόσμενη κατάσταση και επιπλέον, συνεισφέρει στην ευελιξία. Ένα ακόμα κέρδος από την εναλλαγή εργασιών είναι ότι διευρύνει τη γνώση του προσωπικού, καθιστώντας το ικανό να σχηματίσει μία γενικότερη εικόνα των στόχων της εταιρίας.

Οι ασαφείς κανόνες για την ευελιξία εργασίας θα είναι της μορφής:

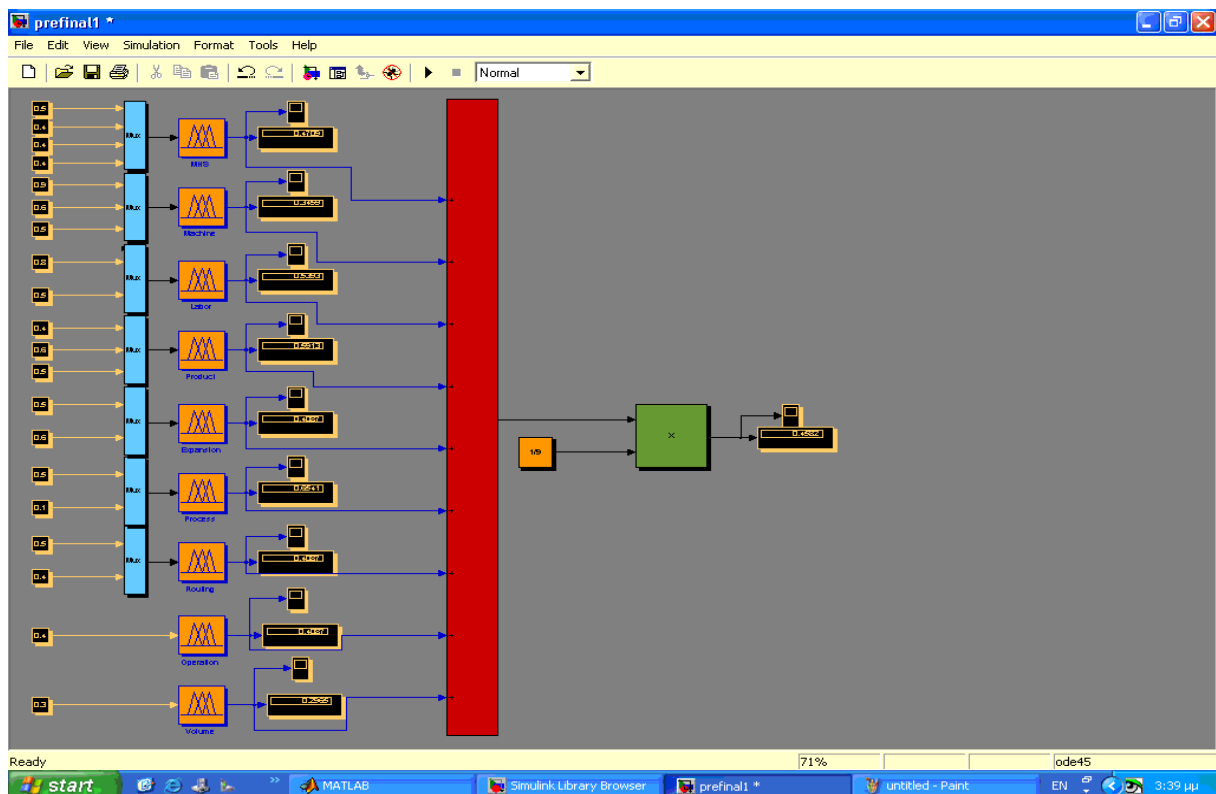
**AN** W είναι  $T_w$  **KAI** J είναι  $T_J$  **TOTE**  $F_L$  είναι  $T_{FL}$

### 3.2 Δημιουργία μοντέλου μέτρησης ευελιξίας.

Μετά τη σχεδίαση των ασαφών ελεγκτών για κάθε τύπο ευελιξίας γίνεται η ανάπτυξη του μοντέλου μέτρησης της συνολικής ευελιξίας ενός παραγωγικού συστήματος. Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό εργαλείο Simulink της MATLAB.

Η σχεδίαση του μοντέλου βασίζεται στη λογική σύνθεση των επιμέρους ελεγκτών να γίνει με τρόπο τέτοιο ώστε η μετρητική ικανότητα του μοντέλου να γίνει η μέγιστη δυνατή. Ένας απλός τρόπος για να γίνει κάτι τέτοιο είναι ο μέσος όρος ή ο βεβαρημένος μέσος όρος των επιμέρους τύπων ευελιξίας να δίνει τη συνολική ευελιξία του συστήματος. Συνεπώς, με χρήση των αντικειμένων της Simulink σχεδιάζουμε κάθε ελεγκτή με τις εισόδους του. Στη συνέχεια αθροίζουμε τα αποτελέσματα της εξόδου του κάθε ελεγκτή και διαιρώντας προκύπτει ο μέσος όρος. Για περισσότερες, προς μελέτη, πληροφορίες κρατάμε την τιμή κάθε τύπου ευελιξίας, πριν την άθροισή τους.

Με βάση τα παραπάνω το μοντέλο που προέκυψε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 7: Μοντέλο μέτρησης της ευελιξίας.

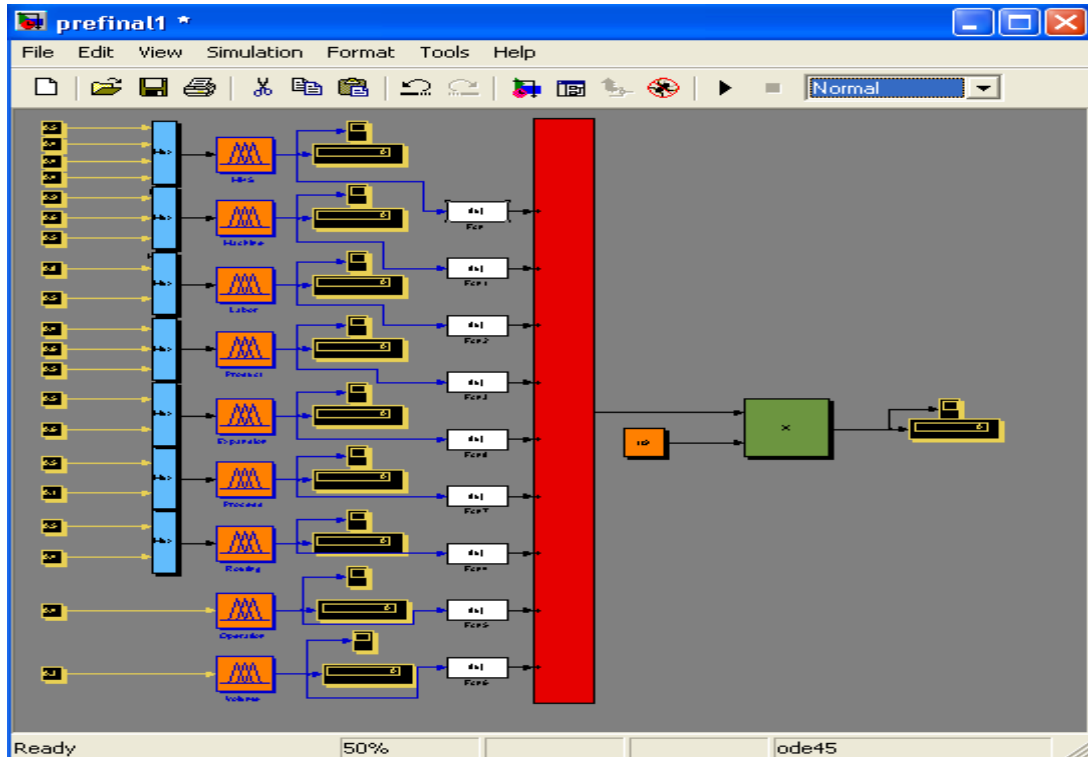


Στην εικόνα 7 μεταξύ άλλων φαίνονται:

1. Οι είσοδοι των ελεγκτών, οι οποίες όταν είναι πάνω από μία ανά ελεγκτή μετατρέπονται σε διάνυσμα
2. Οι εννέα ελεγκτές οι οποίοι έχουν ξεχωριστά σχεδιαστεί στη MATLAB
3. Οι ενδείξεις για κάθε τύπο ευελιξίας ξεχωριστά
4. Η άθροιση των τιμών από κάθε ελεγκτή
5. Η εξαγωγή του μέσου όρου και τελική ένδειξη της συνολικής ευελιξίας

Αυτό το μοντέλο μέτρησης μας παρέχει με αρκετά εύκολο τρόπο την ευελιξία ενός συστήματος παραγωγής, θεωρώντας τους εννέα επιμέρους τύπους ευελιξίας ίσης σπουδαιότητας σε σχέση με το συνολικό αποτέλεσμα. Μία πολύ απλή παραλλαγή του μοντέλου είναι η προσθήκη ενός συντελεστή βαρύτητας για κάθε τύπο ευελιξίας, οπότε δίδεται η δυνατότητα απόδοσης διαφορετικής σημαντικότητας

Στην εικόνα 8 φαίνεται το μοντέλο με την προσθήκη συντελεστών βαρύτητας.



Εικόνα 8: Μοντέλο μέτρησης με βάρη.

### 3.3 Έλεγχος μετρητικής συμπεριφοράς του μοντέλου.

Πριν από την εφαρμογή του μοντέλου μέτρησης σε πραγματικά συστήματα παραγωγής γίνεται έλεγχος της συμπεριφοράς του, μελετώντας τα αποτελέσματα που δίδει σε υποθετικά σενάρια μέτρησης. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι να διαπιστωθεί ότι όντως η μέθοδος μέτρησης αποδίδει ορθά και αναμενόμενα αποτελέσματα. Συνεπώς, τα υποθετικά αυτά σενάρια θα πρέπει να εκλεγούν με κριτήρια:

- την κάλυψη όλου του φάσματος των περιπτώσεων οι οποίες είναι δυνατόν να υπάρξουν καθώς και
- την εύκολη, με την απλή λογική του χρήστη, εξαγωγή συμπεράσματος για διαπιστωθεί η ορθότητα της μεθόδου.

Με βάση τα παραπάνω έγινε επιλογή ορισμένων σεναρίων ελέγχου τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια.

#### Σενάρια Ελέγχου.

Σενάριο 1: Όλες οι εισοδοί παίρνουν τη χειρότερη τιμή, την καλύτερη τιμή, καθώς και τις ενδιάμεσες τιμές 0.25, 0.5, 0.75.

Σενάριο 2: Δέκα από τις είκοσι εισόδους παίρνουν τη χειρότερη δυνατή και δέκα την καλύτερη δυνατή τιμή.

Σενάριο 3: Δίνονται τιμές έτσι ώστε η μέση τιμή των εισόδων του κάθε ελεγκτή να είναι 0.5.

Σενάριο 4: Επανάληψη των παραπάνω σεναρίων χωρίς να ληφθεί υπόψη ένας ή και περισσότεροι τύποι ευελιξίας.

Με την υλοποίηση των παραπάνω σεναρίων εκτιμάται ότι θα βγουν ασφαλή συμπεράσματα για τη μετρητική συμπεριφορά του μοντέλου μέτρησης.

Αποτελέσματα στη Simulink για τα επιλεγμένα σενάρια ελέγχου.

Για τον έλεγχο της μετρητικής συμπεριφοράς θα χρησιμοποιήσουμε το πρώτο μοντέλο μέτρησης (χωρίς συντελεστές βαρύτητας για κάθε ελεγκτή) για τις απαραίτητες προσομοιώσεις.

Σενάριο 1.

Σε κάθε μία είσοδο δίνουμε την χειρότερη λεκτική τιμή, για κάθε ελεγκτή και προσομοιώνουμε το σύστημα. Για παράγοντες οι οποίοι είναι ανάλογοι της ευελιξίας, αυτό επιτυγχάνεται δίνοντας τιμή 0, ενώ για παράγοντες οι οποίοι είναι αντιστρόφως ανάλογοι της ευελιξίας, αυτό επιτυγχάνεται δίνοντας τιμή 1. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία δίνοντας ακόμα τα ζεύγη τιμών 0.25-0.75, 0.75-0.25, 1-0 και 0.5. Από τους είκοσι παράγοντες της ευελιξίας οι δεκαέξι είναι ανάλογοι και μόνο τέσσερις (Χρόνος προετοιμασίας, Κόστη προετοιμασίας, Κόστος αλλαγής, Ικανότητα επέκτασης) είναι αντιστρόφως ανάλογοι αυτής. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

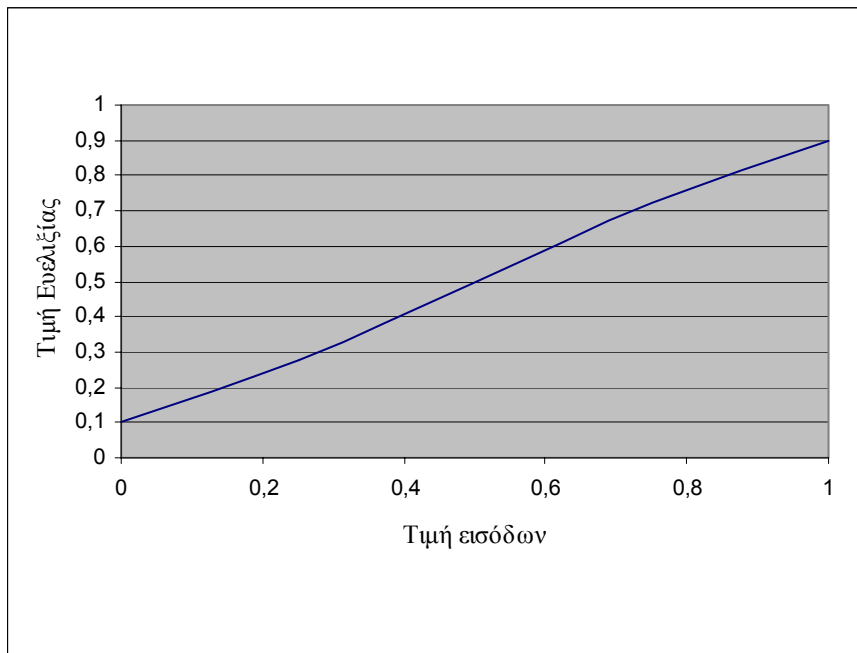
Τιμή εισόδων	Τιμή Ευελιξίας
0 και 1 (Low)	0.1038
0.25 και 0.75 (A.Low)	0.2773
0.5 (Medium)	0.5
0.75 και 0.25 (A.High)	0.7227
1 και 0 (High)	0.8962

**Πίνακας 1: Αποτελέσματα 1ου σεναρίου ελέγχου (9 ελεγκτές)**

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο μέτρησης μας δίνει την τιμή της ευελιξίας ίση με την τιμή των εισόδων μόνο για τη μέση τιμή του πεδίου ορισμού της ευελιξίας (0.5). Αντίθετα, για οποιαδήποτε άλλη τιμή υπάρχει απόκλιση, η οποία γίνεται περισσότερο αισθητή για τις ακραίες τιμές. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη μέθοδο αποασαφοποίησης που έχει επιλεγεί. Με μια πιο προσεκτική ματιά παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του κάθε ελεγκτή

είναι ανάλογη με τη συνολική. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν αποτελεί εμπόδιο στην προσπάθειά μας για την εκτίμηση και τη σύγκριση ευελιξίας συστημάτων παραγωγής, καθώς η σχέση εισόδου – εξόδου είναι γραμμική και συνεχής σε καθορισμένο διάστημα.

Στο ακόλουθο γράφημα φαίνεται η σχέση της τιμής εισόδου με την τιμή της ευελιξίας (μόνο για όμοια τιμή σε όλες τις εισόδους).



**Γράφημα 1: Μετρητική συμπεριφορά με 9 ελεγκτές**

Το ίδιο σενάριο επαναλαμβάνεται με τη διαφορά ότι δεν λαμβάνουμε υπόψη όλους τους τύπους ευελιξίας αλλά παραλείποντας δύο από αυτούς. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

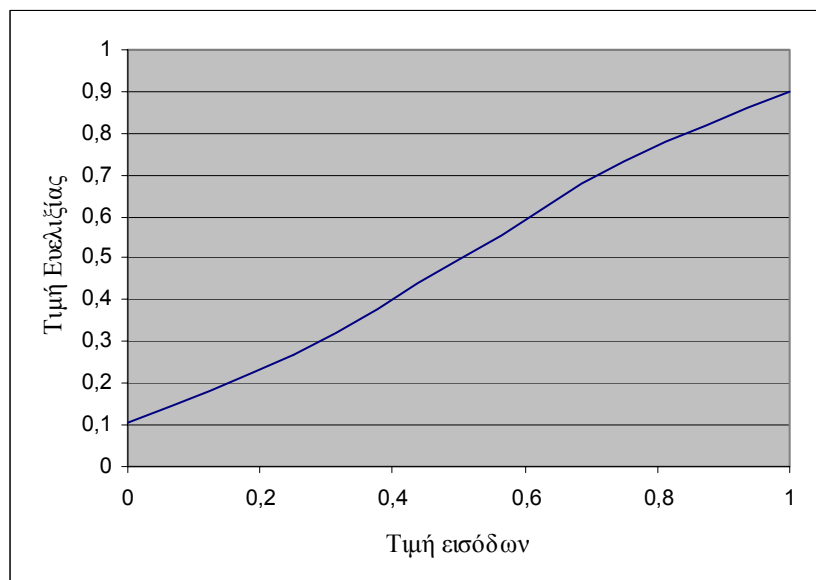
Τιμή εισόδων	Τιμή Ευελιξίας
0 και 1 (Low)	0.1034
0.25 και 0.75 (A.Low)	0.2688
0.5(Medium)	0.5
0.75 και 0.25 (A.High)	0.7312
1 και 0 (High)	0.8976

**Πίνακας 2: Αποτελέσματα 1ου σεναρίου ελέγχου (7 ελεγκτές)**

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρουσιάζει σχεδόν την ίδια συμπεριφορά όπως και πριν. Η πολύ μικρή απόκλιση που εμφανίζεται έχει να κάνει με το ρόλο των τύπων ευελιξίας που δεν λαμβάνονται υπόψη στη μέτρηση της συνολικής ευελιξίας. Το γεγονός αυτό επιτρέπει, με ασφάλεια:

- τη χρήση του μοντέλου και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η δομή του συστήματος είναι τέτοια που δεν επιτρέπει τη μέτρηση ενός ή περισσότερων τύπων ευελιξίας
- τη χρήση του μοντέλου για ένα υποσύνολο των εννέα τύπων ευελιξίας, αν αυτό είναι επιθυμία του χρήστη.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η σχέση της τιμής εισόδου με την τιμή της ευελιξίας, λαμβάνοντας υπόψη επτά τύπους ευελιξίας.



**Γράφημα 2: Μετρητική συμπεριφορά με 7 ελεγκτές**

Παρατηρώντας τα γραφήματα 1 και 2 αξίζει να αναφέρουμε ότι τη μορφή των γραφικών παραστάσεων επηρέασαν τόσο η επιλογή των συναρτήσεων συμμετοχής, όσο και η μέθοδος αποασαφοποίησης. Η επιλογή, τύπου gauss, συναρτήσεων συμμετοχής οδήγησε στην ύπαρξη μη γραμμικής σχέσης, ενώ στην επιλογή, τύπου centroid, μεθόδου αποασαφοποίησης οφείλεται το γεγονός ότι η τιμή της ευελιξίας δεν φτάνει την ελάχιστη και τη μέγιστη δυνατή τιμή.

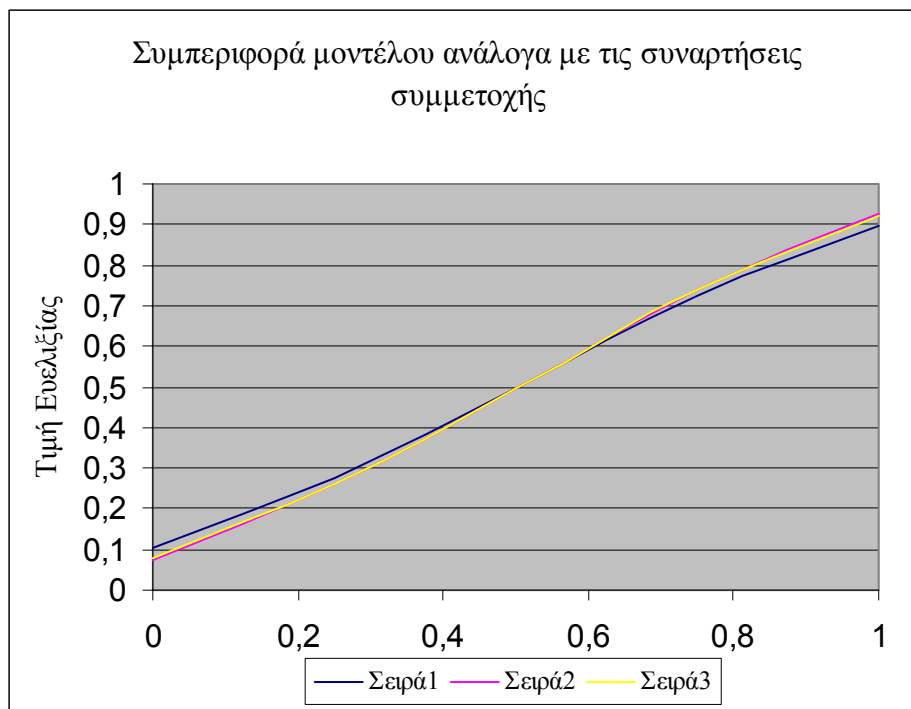
Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά του μοντέλου για το σενάριο 1 ανάλογα με τις συναρτήσεις συμμετοχής και τις μεθόδους αποασαφοποίησης που μπορούμε να

επιλέξουμε.

Ακολουθούμε την παραπάνω διαδικασία έχοντας επιλέξει α) τριγωνικές και β) τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο πίνακα και το γράφημα που ακολουθούν.

Τιμή εισόδων	Τιμή Ευελιξίας		
	gaussmf	trimf	trapmf
0 και 1 (Low)	0,1038	0,08	0,07288
0.25 και 0.75 (A.Low)	0,2773	0,2602	0,2593
0.5(Medium)	0,5	0,5	0,5
0.75 και 0.25 (A.High)	0,7227	0,7398	0,7407
1 και 0 (High)	0,8962	0,92	0,9271

**Πίνακας 3:** Ευελιξία σε σχέση με τις συναρτήσεις συμμετοχής.



**Γράφημα 3:** Συμπεριφορά μοντέλου ανάλογα με τις συναρτήσεις συμμετοχής

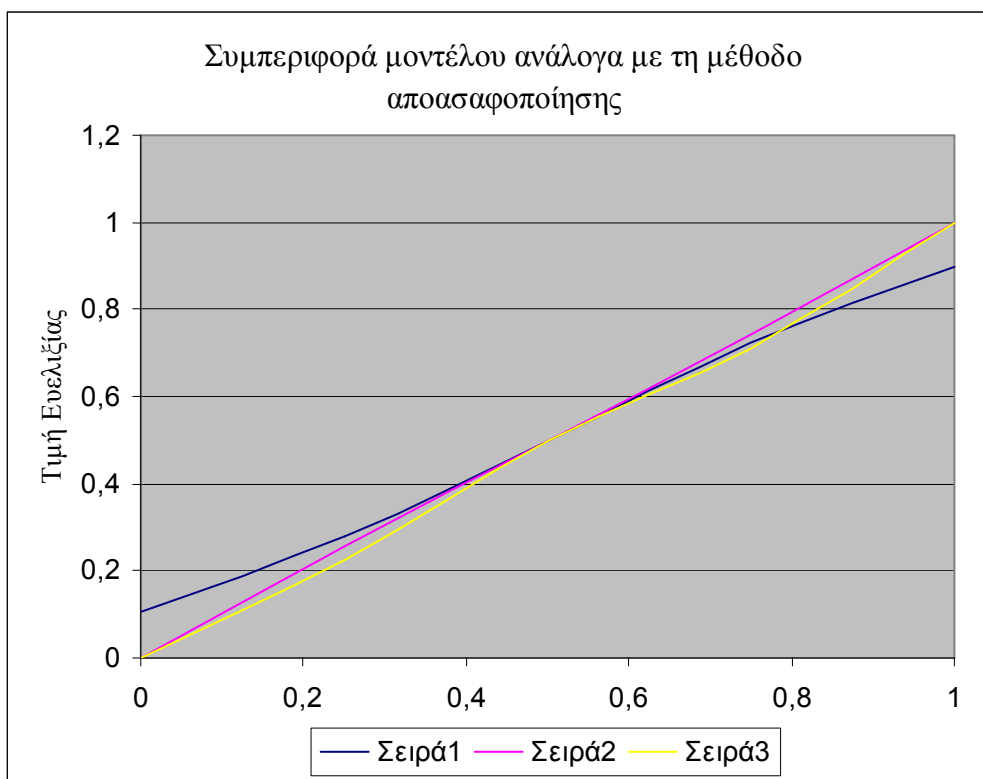
όπου Σειρά 1: gaussmf, Σειρά 2: trimf, Σειρά 3: trapmf

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία έχοντας επιλέξει δύο διαφορετικές μεθόδους

αποασαφοποίησης, α) mom (mean of maxima) και β) som (small of maxima). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο πίνακα και το γράφημα που ακολουθούν.

Τιμή εισόδων	Τιμή Ευελιξίας		
	centroid	mom	som
0 και 1 (Low)	0,1038	0	0
0.25 και 0.75 (A.Low)	0,2773	0,2572	0,2222
0.5(Medium)	0,5	0,5	0,5
0.75 και 0.25 (A.High)	0,7227	0,7428	0,7078
1 και 0 (High)	0,8962	1	1

Γράφημα 4: Ευελιξία σε σχέση με τη μέθοδο αποασαφοποίησης



Πίνακας 4: Συμπεριφορά μοντέλου ανάλογα με τη μέθοδο αποασαφοποίησης

όπου Σειρά 1: centroid, Σειρά 2: mom, Σειρά 3: som.

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρουσιάζει σχεδόν την ίδια συμπεριφορά για κάθε τύπο συνάρτησης συμμετοχής, ενώ υπάρχει διαφοροποίηση ανάλογα με τη μέθοδο

αποασαφοποίησης, γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο και δεν επηρεάζει τη σύγκριση αλλά μόνο την τιμή της ευελιξίας

### Σενάριο 2.

Οι πρώτες δέκα εισόδοι παίρνουν την τιμή ένα, ενώ οι δέκα επόμενες παίρνουν την τιμή μηδέν. Προσομοιώνουμε. Επαναλαμβάνουμε έχοντας θέσει όπου ήταν πριν το ένα, μηδέν και όπου ήταν πριν το μηδέν, ένα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Τιμές εισόδων	Τιμή Ευελιξίας
10 πρώτες = 1	0.433
10 πρώτες = 0	0.5605

**Πίνακας 5: Αποτελέσματα 2ου σεναρίου ελέγχου (9 ελεγκτές)**

Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται λογικά. Παρόλο που ο μέσος όρος των εισόδων είναι 0.5 είναι λογικό να μην επιτυγχάνεται η τιμή αυτή, για τη συνολική ευελιξία, λόγω της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης ορισμένων παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί (αναφέρονται παραπάνω), καθώς αυξάνεται η τιμή τους, τείνουν να μειώσουν την τιμή της ευελιξίας. Επιπλέον, διαπιστώνεται η συνέπεια της μεθόδου όταν με την αντιστροφή των εισόδων παρατηρείται ανάλογη απόκλιση από τη μέση τιμή και προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Το ίδιο σενάριο επαναλαμβάνεται παραλείποντας δύο τύπους ευελιξίας. Εξαιρούμε τέτοιους ώστε να παραμείνει άρτιος αριθμός εισόδων για την πραγματοποίηση του σεναρίου. Με αυτή τη λογική θα μπορούσαμε να παραβλέψουμε και περισσότερους τύπους ευελιξίας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Τιμές εισόδων	Τιμή Ευελιξίας
8 πρώτες = 1	0.4613
8 πρώτες = 0	0.5303

**Πίνακας 6: Αποτελέσματα 2ου σεναρίου ελέγχου (7 ελεγκτές)**



Όπως για το πρώτο σενάριο έτσι και για αυτό επαληθεύεται η λογική συνέπεια και η ευελιξία του μοντέλου μέτρησης.

### Σενάριο 3.

Οι εισοδοί για κάθε ελεγκτή παίρνουν τιμές με τη λογική ‘η μέση τιμή της εισόδου να είναι 0.5. Προσοχή: για επιτευχθεί κάτι τέτοιο δεν αρκεί πάντα ο αριθμητικός μέσος των εισόδων να είναι 0.5. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντίστροφη αναλογία που έχουν ορισμένοι παράγοντες (π.χ. κόστος προετοιμασίας) σε σχέση με την ευελιξία. Αυτό επιτυγχάνεται όταν για μία τιμή  $x$  ενός τέτοιου παράγοντα υπολογίζουμε τον αριθμητικό μέσο όρο θέτοντας όπου  $x$  το  $1-x$ .

Παράδειγμα: Για την ευελιξία μηχανή οι παράγοντες είναι κόστος προετοιμασίας, πολλαπλή χρησιμότητα και προσαρμοστικότητα. Έστω οι τιμές 0.4, 0.6 και 0.5 αντίστοιχα. Ο αριθμητικός μέσος όρος είναι 0.5. Για να πάρει και ο λεκτικός μέσος όρος μέση τιμή θα πρέπει αντί για 0.4 να θέσουμε  $1 - 0.4 = 0.6$  ως εισοδο για το κόστος προετοιμασίας που είναι αντιστρόφως ανάλογο με την ευελιξία.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές για τις εισόδους σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Η σειρά που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή του μοντέλου μέτρησης. Με αστερίσκο (\*) σημειώνονται οι παράγοντες που είναι αντιστρόφως ανάλογες της ευελιξίας.

ΤΥΠΟΣ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ	ΠΑΡΑΓΩΝ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ	ΤΙΜΕΣ ΕΙΣΟΔΩΝ		
Ευελιξία διαχείρισης υλικών	<i>Παράγοντας επαναδρομολόγησης</i>	0.4	0.3	0.5
	<i>Ποικιλία φορτίων</i>	0.4	0.6	0.25
	<i>Ταχύτητα μεταφοράς</i>	0.3	0.9	0.75
	<i>Αριθμός συνδεδεμένων στοιχείων</i>	0.7	0.2	0.5

Ευελιξία μηχανής	<i>Χρόνος προετοιμασίας*</i>	0.6	0.4	0.5
	<i>Πολλαπλή χρησιμότητα</i>	0.5	0.7	0.4
	<i>Προσαρμοστικότητα</i>	0.6	0.2	0.6
Ευελιξία εργασίας	<i>Επίπεδο εκπαίδευσης</i>	0.6	0.35	0.7
	<i>Εναλλαγή εργασιών</i>	0.4	0.65	0.3
Ευελιξία προϊόντος	<i>Κόστος αλλαγής*</i>	0.7	0.2	0.5
	<i>Ποικιλία προϊόντων</i>	0.6	0.35	0.8
	<i>Ομοιότητα κομματιών</i>	0.6	0.35	0.2
Ευελιξία επέκτασης	<i>Δείκτης προσαρμογής*</i>	0.4	0.3	0.7
	<i>Ικανότητα επέκτασης</i>	0.4	0.3	0.7
Ευελιξία διαδικασίας	<i>Σύνολο προϊόντων</i>	0.3	0.2	0.8
	<i>Κόστη προετοιμασίας*</i>	0.3	0.2	0.8
Ευελιξία δρομολόγησης	<i>Ομοιότητα λειτουργιών</i>	0.6	0.45	0.85
	<i>Ικανότητα αντικατάστασης</i>	0.4	0.55	0.15
Ευελιξία κατεργασίας	<i>Αριθμός ακολουθιών παραγωγής</i>	0.5	0.5	0.5
Ευελιξία βαθμού	<i>Έκταση των μεγεθών</i>	0.5	0.5	0.5

Μετά από την προσομοίωση των τριών διαφορετικών συνόλων τιμών προέκυψαν τα εξής τρία αποτελέσματα :

Σύνολο τιμών	Τιμή ευελιξίας
1 <sup>ο</sup>	0.4611
2 <sup>ο</sup>	0.4677
3 <sup>ο</sup>	0.4641

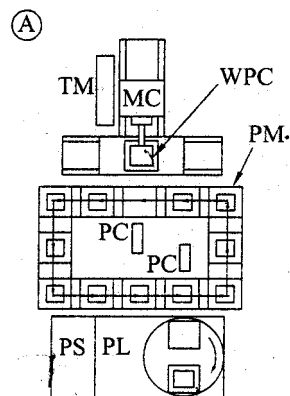
Παρατηρούμε ότι το μοντέλο δίνει αμελητέες διαφορές μεταξύ των τριών αποτελεσμάτων γεγονός που είναι λογικό και αναμενόμενο και που αποτελεί ακόμα μία ένδειξη της ορθής μετρητικής συμπεριφοράς του μοντέλου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Περιγραφή των προς σύγκριση συστημάτων.

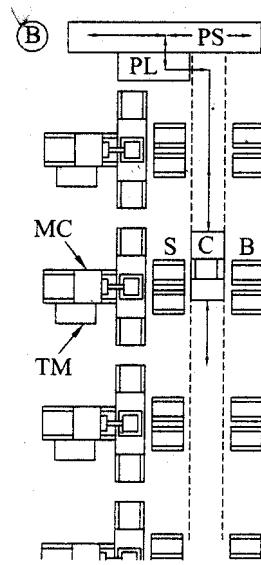
Ακολουθεί η περιγραφή των πέντε συστημάτων παραγωγής που επιλέχθηκαν προς σύγκριση της ευελιξίας τους. Πρόκειται για συστήματα παραγωγής και επεξεργασίας μεταλλικών προϊόντων.

Το σύστημα A συντίθεται από κελιά εργασίας αποτελούμενα από μία μηχανή (MC), μία ταινία φόρτωσης και εκφόρτωσης κομματιών (part magazine, PM) και έναν αποθηκευτικό χώρο (part storage, PS). Τα προς κατεργασία υλικά φτάνουν στη μηχανή μέσω της ταινίας φόρτωσης – εκφόρτωσης και, μετά την κατεργασία, οδηγούνται με τον ίδιο τρόπο προς αποθήκευση.



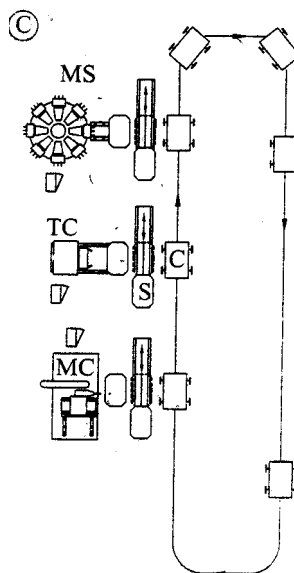
Σχήμα 1: Σύστημα A

Το σύστημα B αποτελείται από όμοιες μηχανές και σύστημα μεταφοράς από και προς την αποθήκη (part storage, PS) με βαγόνια (carrriages, C). Για την φόρτωση και εκφόρτωση των κομματιών στο χώρο επεξεργασίας, χρησιμοποιούνται κερκίδες (shuttle tables, S) και προσωρινοί χώροι αποθήκευσης (buffer, B).



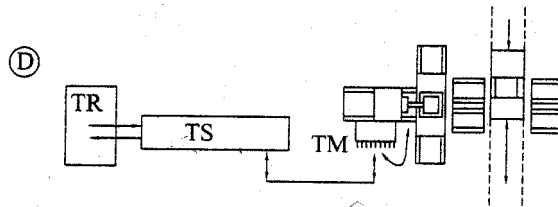
Σχήμα 2: Σύστημα Β

Το σύστημα C αποτελείται από διαφορετικές μηχανές, συνδεδεμένες μεταξύ τους και με την αποθήκη με ένα σύστημα μεταφοράς με βαγόνια. Κάθε βαγόνι μπορεί να ακολουθήσει οποιαδήποτε διαδρομή μεταξύ μηχανών και αποθήκης, χωρίς να επηρεάζεται από τα υπόλοιπα. Για την φόρτωση και εκφόρτωση χρησιμοποιούνται κερκίδες (shuttle tables, S)



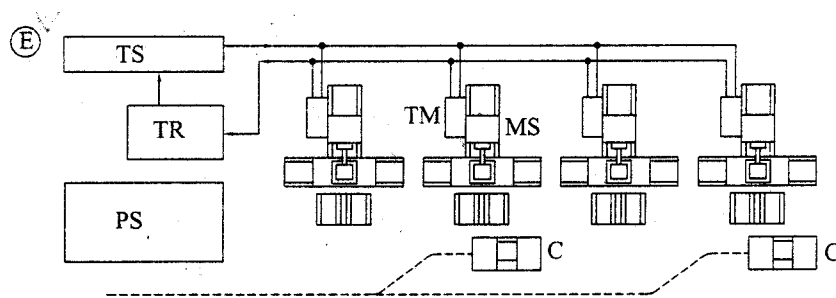
Σχήμα 3: Σύστημα C

Το σύστημα D που έχει την αρχιτεκτονική του συστήματος B με την προσθήκη μίας κεντρικής αποθήκης εργαλείων (tool storage, TS) που προμηθεύει την τοπική αποθήκη κάθε μηχανής (tool magazine, TM). Ως TR συμβολίζεται η κεντρική αποθήκη εργαλείων.



Σχήμα 4: Σύστημα D

Το σύστημα E είναι ένα μεγαλύτερης κλίμακας τύπου D σύστημα. Για τη μεταφορά των κομματιών υπάρχουν βαγόνια που κινούνται ανεξάρτητα το ένα με το άλλο και συνήθως είναι αυτόματα κατευθυνόμενα οχήματα (automatically guided vehicles, AGV).



Σχήμα 5: Σύστημα E

#### 4.2 Σύγκριση συστημάτων.

Για τη σύγκριση των συστημάτων παραγωγής με κριτήριο την ευελιξία τους απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εκτίμηση και η απόδοση τιμής σε κάθε έναν από τους είκοσι παράγοντες από τους οποίους συντίθεται η συνολική ευελιξία.

Μετά από τη μελέτη των χαρακτηριστικών των πέντε, προς σύγκριση, συστημάτων, εκτιμήθηκαν οι τιμές των παραγόντων. Οι εκτιμήσεις ενέχουν ένα βαθμό υποκειμενικότητας, κοινό για όλα τα συστήματα, που δεν επηρεάζει τη μεταξύ τους σύγκριση. Εξαγωγή των εκτιμήσεων βασίστηκε στην ακόλουθη διαδικασία. Έγιναν θεωρήσεις για τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει κάθε παράγοντας ευελιξίας, δεδομένης της δομής και του εξοπλισμού των συστημάτων. Στη συνέχεια δόθηκαν τιμές στους παράγοντες αυτούς για κάθε σύστημα από τις οποίες τελικά προέκυψαν οι εκτιμήσεις με αναγωγή στο διάστημα [0,1].

##### Παράδειγμα:

Θεωρούμε ότι μία μηχανή επεξεργασίας μετάλλων μπορεί να πραγματοποιήσει 30 διαφορετικές κατεργασίες (και η ίδιου τύπου κατεργασία με αλλαγή εργαλείου θεωρείται διαφορετική). Αν μία μηχανή ενός συστήματος μπορεί να πραγματοποιήσει 15 διαφορετικές κατεργασίες, τότε η εκτίμηση για την πολλαπλή χρησιμότητά της είναι:

$$x = \frac{1-0}{30-0} \times 15$$

Οι εκτιμήσεις για κάθε ένα από τα πέντε συστήματα, καθώς και η αντίστοιχη ευελιξία τους φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

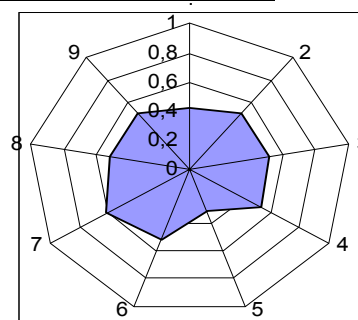
Σύστημα Α

Στον πίνακα φαίνονται οι τιμές των εισόδων για το σύστημα Α

ΣΥΣΤΗΜΑ Α		
Τύπος Ευελιξίας	Παράγοντας Ευελιξίας	Τιμή
Ευελιξία διαχείρισης υλικών	<i>Παράγοντας επαναδρομολόγησης</i>	0.3
	<i>Ποικιλία φορτίων</i>	0.4
	<i>Ταχύτητα μεταφοράς</i>	0.5
	<i>Αριθμός συνδεδεμένων στοιχείων</i>	0.7
Ευελιξία μηχανής	<i>Χρόνος προετοιμασίας</i>	0.6
	<i>Πολλαπλή χρησιμότητα</i>	0.5
	<i>Προσαρμοστικότητα</i>	0.5
Ευελιξία εργασίας	<i>Επίπεδο εκπαίδευσης</i>	0.5
	<i>Εναλλαγή εργασιών</i>	0.5
Ευελιξία προϊόντος	<i>Κόστος αλλαγής</i>	0.5
	<i>Ποικιλία προϊόντων</i>	0.6
	<i>Ομοιότητα κομματιών</i>	0.5
Ευελιξία επέκτασης	<i>Δείκτης προσαρμογής</i>	0.4
	<i>Ικανότητα επέκτασης</i>	0.7
Ευελιξία διαδικασίας	<i>Σύνολο προϊόντων</i>	0.6
	<i>Κόστη προετοιμασίας</i>	0.5
Ευελιξία δρομολόγησης	<i>Ομοιότητα λειτουργιών</i>	0.6
	<i>Ικανότητα αντικατάστασης</i>	0.7
Ευελιξία κατεργασίας	<i>Αριθμός ακολουθιών παραγωγής</i>	0.5
Ευελιξία βαθμού	<i>Έκταση των μεγεθών</i>	0.5

Θέτοντας τις τιμές του πίνακα με την ίδια σειρά, ως εισόδους στο μοντέλο μέτρησης που αναπτύχθηκε προέκυψαν οι επιμέρους και η συνολική τιμή της ευελιξίας του :

Ευελιξία συστήματος Α : 0.4802



Τιμές επιμέρους τύπων ευελιξίας



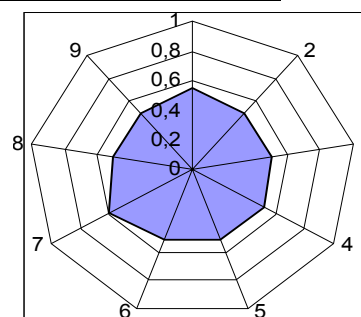
Σύστημα Β

Στον πίνακα φαίνονται οι τιμές των εισόδων για το σύστημα Α

ΣΥΣΤΗΜΑ Β		
Τύπος Ευελιξίας	Παράγοντας Ευελιξίας	Τιμή
Ευελιξία διαχείρισης υλικών	<i>Παράγοντας επαναδρομολόγησης</i>	0.4
	<i>Ποικιλία φορτίων</i>	0.7
	<i>Ταχύτητα μεταφοράς</i>	0.5
	<i>Αριθμός συνδεδεμένων στοιχείων</i>	0.7
Ευελιξία μηχανής	<i>Χρόνος προετοιμασίας</i>	0.6
	<i>Πολλαπλή χρησιμότητα</i>	0.5
	<i>Προσαρμοστικότητα</i>	0.5
Ευελιξία εργασίας	<i>Επίπεδο εκπαίδευσης</i>	0.5
	<i>Εναλλαγή εργασιών</i>	0.5
Ευελιξία προϊόντος	<i>Κόστος αλλαγής</i>	0.5
	<i>Ποικιλία προϊόντων</i>	0.6
	<i>Ομοιότητα κομματιών</i>	0.5
Ευελιξία επέκτασης	<i>Δείκτης προσαρμογής</i>	0.6
	<i>Ικανότητα επέκτασης</i>	0.5
Ευελιξία διαδικασίας	<i>Σύνολο προϊόντων</i>	0.6
	<i>Κόστη προετοιμασίας</i>	0.5
Ευελιξία δρομολόγησης	<i>Ομοιότητα λειτουργιών</i>	0.6
	<i>Ικανότητα αντικατάστασης</i>	0.6
Ευελιξία κατεργασίας	<i>Αριθμός ακολουθιών παραγωγής</i>	0.5
Ευελιξία βαθμού	<i>Έκταση των μεγεθών</i>	0.5

Θέτοντας τις τιμές του πίνακα με την ίδια σειρά, ως εισόδους στο μοντέλο μέτρησης που αναπτύχθηκε προέκυψαν οι επιμέρους και η συνολική τιμή της ευελιξίας του :

Ευελιξία συστήματος Β : 0.5155



Τιμές επιμέρους τύπων ευελιξίας

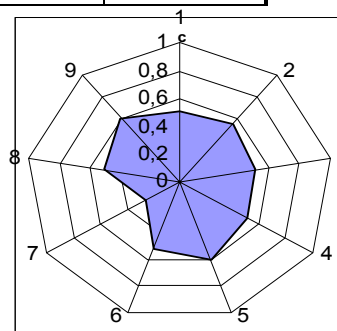
Σύστημα C

Στον πίνακα φαίνονται οι τιμές των εισόδων για το σύστημα A

ΣΥΣΤΗΜΑ C		
Τύπος Ευελιξίας	Παράγοντας Ευελιξίας	Τιμή
Ευελιξία διαχείρισης υλικών	<i>Παράγοντας επαναδρομολόγησης</i>	0.8
	<i>Ποικιλία φορτίων</i>	0.5
	<i>Ταχύτητα μεταφοράς</i>	0.5
	<i>Αριθμός συνδεδεμένων στοιχείων</i>	0.5
Ευελιξία μηχανής	<i>Χρόνος προετοιμασίας</i>	0.45
	<i>Πολλαπλή χρησιμότητα</i>	0.8
	<i>Προσαρμοστικότητα</i>	0.4
Ευελιξία εργασίας	<i>Επίπεδο εκπαίδευσης</i>	0.5
	<i>Εναλλαγή εργασιών</i>	0.5
Ευελιξία προϊόντος	<i>Κόστος αλλαγής</i>	0.5
	<i>Ποικιλία προϊόντων</i>	0.6
	<i>Ομοιότητα κομματιών</i>	0.5
Ευελιξία επέκτασης	<i>Δείκτης προσαρμογής</i>	0.8
	<i>Ικανότητα επέκτασης</i>	0.4
Ευελιξία διαδικασίας	<i>Σύνολο προϊόντων</i>	0.5
	<i>Κόστη προετοιμασίας</i>	0.5
Ευελιξία δρομολόγησης	<i>Ομοιότητα λειτουργιών</i>	0.2
	<i>Ικανότητα αντικατάστασης</i>	0.3
Ευελιξία κατεργασίας	<i>Αριθμός ακολουθιών παραγωγής</i>	0.5
Ευελιξία βαθμού	<i>Έκταση των μεγεθών</i>	0.6

Θέτοντας τις τιμές του πίνακα με την ίδια σειρά, ως εισόδους στο μοντέλο μέτρησης που αναπτύχθηκε προέκυψαν οι επιμέρους και η συνολική τιμή της ευελιξίας του :

Ευελιξία συστήματος C : 0.4981



Τιμές επιμέρους τύπων ευελιξίας

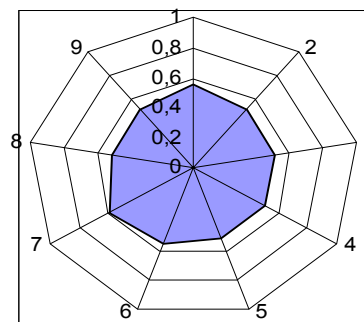
Σύστημα D

Στον πίνακα φαίνονται οι τιμές των εισόδων για το σύστημα A

ΣΥΣΤΗΜΑ D		
Τύπος Ευελιξίας	Παράγοντας Ευελιξίας	Τιμή
Ευελιξία διαχείρισης υλικών	<i>Παράγοντας επαναδρομολόγησης</i>	0.4
	<i>Ποικιλία φορτίων</i>	0.7
	<i>Ταχύτητα μεταφοράς</i>	0.5
	<i>Αριθμός συνδεδεμένων στοιχείων</i>	0.7
Ευελιξία μηχανής	<i>Χρόνος προετοιμασίας</i>	0.55
	<i>Πολλαπλή χρησιμότητα</i>	0.6
	<i>Προσαρμοστικότητα</i>	0.5
Ευελιξία εργασίας	<i>Επίπεδο εκπαίδευσης</i>	0.5
	<i>Εναλλαγή εργασιών</i>	0.5
Ευελιξία προϊόντος	<i>Κόστος αλλαγής</i>	0.5
	<i>Ποικιλία προϊόντων</i>	0.6
	<i>Ομοιότητα κομματιών</i>	0.5
Ευελιξία επέκτασης	<i>Δείκτης προσαρμογής</i>	0.6
	<i>Ικανότητα επέκτασης</i>	0.5
Ευελιξία διαδικασίας	<i>Σύνολο προϊόντων</i>	0.6
	<i>Κόστη προετοιμασίας</i>	0.45
Ευελιξία δρομολόγησης	<i>Ομοιότητα λειτουργιών</i>	0.6
	<i>Ικανότητα αντικατάστασης</i>	0.6
Ευελιξία κατεργασίας	<i>Αριθμός ακολουθιών παραγωγής</i>	0.5
Ευελιξία βαθμού	<i>Έκταση των μεγεθών</i>	0.5

Θέτοντας τις τιμές του πίνακα με την ίδια σειρά, ως εισόδους στο μοντέλο μέτρησης που αναπτύχθηκε προέκυψαν οι επιμέρους και η συνολική τιμή της ευελιξίας του :

Ευελιξία συστήματος D : 0.5207



Τιμές επιμέρους τύπων ευελιξίας

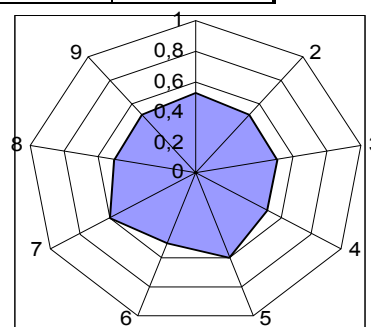
Σύστημα E

Στον πίνακα φαίνονται οι τιμές των εισόδων για το σύστημα A

ΣΥΣΤΗΜΑ E		
Τύπος Ευελιξίας	Παράγοντας Ευελιξίας	Τιμή
Ευελιξία διαχείρισης υλικών	<i>Παράγοντας επαναδρομολόγησης</i>	0.9
	<i>Ποικιλία φορτίων</i>	0.5
	<i>Ταχύτητα μεταφοράς</i>	0.5
	<i>Αριθμός συνδεδεμένων στοιχείων</i>	0.6
Ευελιξία μηχανής	<i>Χρόνος προετοιμασίας</i>	0.6
	<i>Πολλαπλή χρησιμότητα</i>	0.5
	<i>Προσαρμοστικότητα</i>	0.5
Ευελιξία εργασίας	<i>Επίπεδο εκπαίδευσης</i>	0.5
	<i>Εναλλαγή εργασιών</i>	0.5
Ευελιξία προϊόντος	<i>Κόστος αλλαγής</i>	0.5
	<i>Ποικιλία προϊόντων</i>	0.6
	<i>Ομοιότητα κομματιών</i>	0.5
Ευελιξία επέκτασης	<i>Δείκτης προσαρμογής</i>	0.8
	<i>Ικανότητα επέκτασης</i>	0.4
Ευελιξία διαδικασίας	<i>Σύνολο προϊόντων</i>	0.6
	<i>Κόστη προετοιμασίας</i>	0.5
Ευελιξία δρομολόγησης	<i>Ομοιότητα λειτουργιών</i>	0.6
	<i>Ικανότητα αντικατάστασης</i>	0.8
Ευελιξία κατεργασίας	<i>Αριθμός ακολουθιών παραγωγής</i>	0.5
Ευελιξία βαθμού	<i>Έκταση των μεγεθών</i>	0.5

Θέτοντας τις τιμές του πίνακα με την ίδια σειρά, ως εισόδους στο μοντέλο μέτρησης που αναπτύχθηκε προέκυψαν οι επιμέρους και η συνολική τιμή της ευελιξίας του :

Ευελιξία συστήματος E : 0.5227



Τιμές επιμέρους τύπων ευελιξίας

Παρατηρώντας τις τιμές των εισόδων παρατηρούμε ότι υπάρχουν ελεγκτές οι οποίοι έχουν εισόδους, αντίστοιχα ίσες τιμές για όλα τα συστήματα. Συνεπώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και άλλο τρόπο χρήσης του μοντέλου για την σύγκριση των συστημάτων. Εξαιρούμε από το μοντέλο τους δύο εκείνους ελεγκτές που παίρνουν τις ίδιες τιμές (Labor, Product) και προσομοιώνουμε.

Τα συνολικά αποτελέσματα και για τους δύο τρόπους χρήσης του μοντέλου φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

<b>ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ 9 ΕΛΕΓΚΤΕΣ</b>	
<b>ΣΥΣΤΗΜΑ</b>	<b>ΤΙΜΗ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ</b>
<b>A</b>	0.4802
<b>B</b>	0.5155
<b>C</b>	0.4981
<b>D</b>	0.5207
<b>E</b>	0.5227

Τιμή ευελιξίας κάθε συστήματος (9 ελεγκτές)

<b>ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ 7 ΕΛΕΓΚΤΕΣ</b>	
<b>ΣΥΣΤΗΜΑ</b>	<b>ΤΙΜΗ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ</b>
<b>A</b>	0.4703
<b>B</b>	0.5233
<b>C</b>	0.4971
<b>D</b>	0.531
<b>E</b>	0.5341

Τιμή ευελιξίας κάθε συστήματος (7 ελεγκτές)

### 4.3 Σχόλια – Παρατηρήσεις.

Η πρώτη παρατήρηση η οποία μπορεί να γίνει είναι ότι το μοντέλο μέτρησης έδωσε την μεγαλύτερη τιμή ευελιξίας στο σύστημα E και με τους δύο τρόπους μέτρησης.

Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι το μοντέλο μέτρησης έδωσε την ίδια κατάταξη των πέντε συστημάτων και με τους δύο τρόπους με τους οποίους έγινε η χρήση του. Είτε με εννέα είτε με επτά ελεγκτές, η ταξινόμηση που προέκυψε με βάση την ευελιξία των συστημάτων είναι : E – D – B – C – A.

Με μία πιο προσεκτική ματιά βλέπουμε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των διαφορών των τιμών της ευελιξίας του κάθε συστήματος που προέκυψαν. Δηλαδή, ο λόγος της διαφοράς της ευελιξίας του συστήματος E με την ευελιξία ενός άλλου συστήματος για τον ένα τρόπο μέτρησης, προς την ίδια διαφορά με τον δεύτερο τρόπο, είναι περίπου ίδιος για κάθε ζεύγος.

$$v = \frac{F_9(E) - F_9(D)}{F_7(E) - F_7(D)}$$

όπου  $F_9(E)$  και  $F_7(E)$  είναι οι τιμές της ευελιξίας του συστήματος E με χρήση 9 και 7 ελεγκτών αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαφορές των συστημάτων με τους δύο τρόπους μέτρησης :

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ I	ΔΙΑΦΟΡΑ II
<b>E</b>	0.5227	0.5341
<b>D</b>	-0.0020	-0.0031
<b>B</b>	-0.0072	-0.0108
<b>C</b>	-0.0246	-0.0370
<b>A</b>	-0.0425	-0.0638

Διαφορές της ευελιξίας με τους δύο τρόπους μέτρησης

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει:

$$\frac{0.020}{0.031} \approx \frac{0.072}{0.0108} \approx \frac{0.0246}{0.0370} \approx \frac{0.0425}{0.0638} \approx 1.5$$

Κάτι άλλο που αξίζει να προσέξουμε είναι ότι τα συστήματα E και D διαφέρουν ελάχιστα ως προς την ευελιξία τους, γεγονός που εξηγείται απόλυτα αν δούμε ότι τα δύο αυτά συστήματα έχουν τα ίδια σχεδόν χαρακτηριστικά.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή επιχειρείται η ανάλυση μεθόδου μέτρησης της ευελιξίας των συστημάτων παραγωγής. Η έννοια της ευελιξίας είναι μία ασαφής έννοια η οποία εμπεριέχει αβεβαιότητα που αφορά στο νόημα και στην τιμή της. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη την δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου μέτρησής της. Η δυσκολία αυτή μπορεί να αντιμετωπισθεί με χρήση ασαφούς λογικής, για τη δημιουργία του μοντέλου, μέσω της οποίας αναπαριστάται η ανθρώπινη γνώση.

Η βασικότερη δυσκολία στη μέτρηση της ευελιξίας των συστημάτων παραγωγής έγκειται στο ότι είναι έννοια πολυδιάστατη και ενυπάρχει σε όλα τα επίπεδα λειτουργίας μίας επιχείρησης. Κάτι που σχετικά εύκολα μπορούν να κάνουν οι ειδικοί είναι να αποδώσουν λεκτικές εκτιμήσεις στους παράγοντες που επηρεάζουν την ευελιξία. Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός αυτό επιχειρούμε την ανάπτυξη μίας μεθόδου η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

1. Οριοθετεί τους σημαντικότερους επιμέρους τύπους ευελιξίας.
2. Προσδιορίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.
3. Απαιτεί μικρή ποσότητα δεδομένων και αρχικής γνώσης.
4. Διαθέτει ευελιξία και έχει δυνατότητα επέκτασης.
5. Χρησιμοποιεί τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συστήματος που εξετάζει.
6. Προτείνει έναν τρόπο επίλυσης του προβλήματος της αμοιβαίας εξάρτησης των παραγόντων της ευελιξίας αλλά και της σύνθεσης των υποδιαιρέσεών της, με βάση τη διδακτορική διατριβή του Τσουρβελούδη [2].

Στην λογισμική μορφή του μοντέλου ο χρήστης έχει την δυνατότητα ελέγχου, ορισμού και τροποποίησης των :

- ◆ τύπων και παραγόντων της ευελιξίας,
- ◆ συναρτήσεων συμμετοχής των λεκτικών τιμών,
- ◆ τελεστών σύνδεσης και συνεπαγωγής,
- ◆ μεθόδων προσεγγιστικής συνεπαγωγής και



◆ μεθόδων αποσαφήνισης.

Από τον έλεγχο της συμπεριφοράς του μοντέλου καθώς και από την εφαρμογή του σε συστήματα παραγωγής διαπιστώνεται ότι λειτουργεί ικανοποιητικά, δίνοντας λογικά αποτελέσματα που εκφράζουν την ανθρώπινη γνώση. Συνεπώς θα μπορούσε να αποτελέσει ένα εύχρηστο και χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του χρήστη, για την εκτίμηση της ευελιξία των συστημάτων παραγωγής και της σύγκρισης μεταξύ τους.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] L. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338 – 353, 1965
- [2] Τσουρβελούδης, Ν. Χ., “Μέτρηση της ευελιξίας των συστημάτων παραγωγής : Μία προσέγγιση ασαφούς λογικής”, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 1995.
- [3] Tsourveloudis N. C., and Phillis, Y. A. “Manufacturing Flexibility Measurement : A Fuzzy Logic Framework”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 4, pp. 513 – 524, 1998.
- [4] Sethi, A., and Sethi, S., “Flexibility in manufacturing : A Survey,” *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 2, pp. 289 – 328, 1990.
- [5] Son, Y.K., and Park, C.S. “Economic measure of productivity, quality and flexibility in advanced manufacturing systems,” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 193 – 207, 1984.
- [6] Gustavsson, S.O. “Flexibility and productivity in complex production processes,” *International Journal of Production Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 801 – 808, 1984.
- [7] Fine, C.H., and Freud, R.M. “Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity,” *Management Science*, Vol. 36, No. 4, pp. 449 – 466, 1990.
- [8] Triantis, A.J., and Hodder, J.E. Valuing flexibility as a complex option,” *The Journal of Finance*, Vol. XLV, No.2, pp.549 – 565, 1990.
- [9] Waller, M.A., and Christy, D.P. “Competitive incentives for manufacturing flexibility,” *International Journal of Production – Economics*, Vol. 28, pp. 35 – 45, 1992.

- [10] Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S.P., and Stecke, K.E., “Classification of flexible manufacturing systems,” *The F.M.S. magazine*, Vol. 2, pp. 114 – 117 1984.
- [11] Brill, P.H., and Mandelbaum, M. “On measures of flexibility in manufacturing systems,” *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 747 – 756, 1989.
- [12] Brill, P.H., and Mandelbaum, M. “Measurement of adaptivity and flexibility in production systems,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 49, pp. 325 – 332, 1990.
- [13] Abdel – Malek, L., and Wolf, C. “Evaluating flexibility in alternative FMS designs – A comparative measure,” *International Journal of Production Economics*, Vol. 23, No. 1, pp. 3 – 10, 1991.
- [14] Gupta, Y.P., and Somers, T.M., “The measurement of manufacturing flexibility,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 60, pp. 166 – 182, 1992.
- [15] Kochikar, V.P., and Narendran, T.T., “A framework for assessing the flexibility of manufacturing systems,” *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 2873 – 2895, 1992.
- [16] Kumar, V., “Entropic measures of manufacturing flexibility,” *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 957 – 966, 1987.
- [17] Gupta, D., and Buzacott, J.A., “A Framework for Understanding Flexibility of Manufacturing Systems,” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 8, pp. 89 – 97, 1989.
- [18] Tsourveloudis, N.C., and Phillis, Y.A. “Fuzzy logic for the manufacturing flexibility measurement,” Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Congress on intelligent Techniques and Soft Computing, Aachen, Germany, Vol. 3, pp. 1619 – 1621, 1994

- [19] Dubois, D., and Prade, H. *Fuzzy Sets and Systems : Theory and Applications*, Academic Press, New York, 1980
- [20] Klir, G.J., and Folger, T.A. *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*, Prentice-Hall, Toronto, Canada, 1988.
- [21] Terano, T., Asai, K., and Sugeno, M. *Fuzzy Systems theory and its applications*, Academic Press, San Diego, 1991.
- [22] Zimmermann, H.-J. *Fuzzy Set Theory and its Applications*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1991.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
I.1 Σκοπός της διπλωματικής .....	1
I.2 Μεθοδολογία.....	1
I.3 Αναμενόμενα αποτελέσματα .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	3
1.1 Βασικές έννοιες – Ορισμοί.....	3
1.2 Μέτρηση της ευελιξίας.....	7
1.3 Δυσκολίες στη μέτρηση της ευελιξίας .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	12
2.1 Ανασκόπηση Θεωρίας Ασαφών Συνόλων .....	12
2.2 Πώς χρησιμοποιείται η ασαφής λογική για τη μέτρηση της ευελιξίας.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	21
3.1 Σχεδίαση Ασαφή Ελεγκτή για κάθε τύπο ευελιξίας.....	21
3.1.1 Ευελιξία μηχανής .....	25
3.1.2 Ευελιξία δρομολόγησης .....	26
3.1.3 Ευελιξία διαχείρισης υλικών .....	27
3.1.4 Ευελιξία προϊόντος.....	27
3.1.5 Ευελιξία κατεργασίας.....	28
3.1.6 Ευελιξία διαδικασίας.....	28
3.1.7 Ευελιξία βαθμού.....	29
3.1.8 Ευελιξία επέκτασης.....	30
3.1.9 Ευελιξία εργασίας .....	30
3.2 Δημιουργία μοντέλου μέτρησης ευελιξίας.....	32
3.3 Έλεγχος μετρητικής συμπεριφοράς του μοντέλου.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	44
4.1 Περιγραφή των προς σύγκριση συστημάτων.....	44
4.2 Σύγκριση συστημάτων .....	47
4.3 Σχόλια – Παρατηρήσεις .....	54
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	58