

Επιχειρηματικές Διαδικασίες - Μοντελοποίηση και Προσομοίωση



Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή στη Προσομοίωση	7
1.1. Εισαγωγή	7
1.1.1. Τι είναι η προσομοίωση;	7
1.1.2. Το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον της προσομοίωσης	10
1.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Προσομοίωσης	15
1.2.1. Σύγκριση της προσομοίωσης με άλλες μεθόδους	16
1.2.2. Η προσομοίωση σε προβλήματα διοικητικής επιστήμης	17
1.3. Οι Φάσεις της Προσομοίωσης	18
1.4. Περίληψη	20
2. Προσομοίωση και Μοντέλα Συστημάτων	21
2.1. Εισαγωγή	21
2.2. Προσομοίωση και Εξομοίωση	22
2.3. Η έννοια του Συστήματος	26
2.3.1. Ορισμός του συστήματος	27
2.3.2. Στοιχεία ενός συστήματος	29
2.3.3. Κατηγορίες συστημάτων	32
2.4. Μοντέλα Συστημάτων	36
2.4.1. Λόγοι κατασκευής ενός μοντέλου	36
2.4.2. Τύποι μοντέλων	37
2.5. Δημιουργία Μοντέλων Προσομοίωσης	48
2.5.1. Γενικά	48
2.5.2. Κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης	50
2.5.3. Κριτήρια καλού μοντέλου	52
3. Μοντελοποίηση Διακριτών Συστημάτων	55
3.1. Εισαγωγή	55
3.2. Συστήματα και Μοντέλα	56
3.2.1. Συστήματα	56
3.2.2. Είδη συστημάτων	57
3.2.3. Μοντέλα	58
3.2.4. Είδη μοντέλων	59
3.3. Ανάλυση Συστήματος	60
3.4. Μοντελοποίηση Συστήματος	62
3.5. Στοιχεία ενός Συστήματος	63
3.5.1. Οντότητες	63
3.5.2. Είδη οντοτήτων	66
3.5.3. Κύκλοι ζωής και πορείες οντοτήτων	67
3.5.4. Χαρακτηριστικά οντοτήτων	70
3.6. Λειτουργίες ενός Συστήματος	71

3.6.1. Η κατάσταση του συστήματος	71
3.6.2. Γεγονότα και δραστηριότητες	73
3.7. Ουρές	74
3.8. Παραδείγματα Μοντελοποίησης	77
3.8.1. Κομμωτήριο	77
3.8.2. Στάση λεωφορείου	79
3.8.3. Βενζινάδικο	81
3.9. Εμπειρικοί Κανόνες Μοντελοποίησης	84
3.10. Περίληψη	84
4. Ανάπτυξη Μοντέλων Διακριτών Συστημάτων	87
4.1. Εισαγωγή	87
4.2. Βασικά Στοιχεία Ανάπτυξης Διακριτών Μοντέλων – Ορισμοί	89
4.3. Προσομοίωση Γεγονότων	96
4.3.1. Εξαρτημένα και ανεξάρτητα γεγονότα	96
4.3.2. Διαχειριστής της προσομοίωσης γεγονότων	98
4.3.3. Ρουτίνες υλοποίησης	103
4.4. Προσομοίωση Δραστηριοτήτων	110
4.4.1. Διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων	111
4.4.2. Διαχειριστής της προσομοίωσης δραστηριοτήτων	116
4.4.3. Ρουτίνες υλοποίησης	119
4.4.4. Η μέθοδος των τριών φάσεων	123
4.5. Προσομοίωση Διεργασιών	124
4.5.1. Ορισμοί	124
4.5.2. Εκτέλεση των εργασιών	125
5. Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων – Η Μέθοδος των Τριών Φάσεων	131
5.1. Εισαγωγή	131
5.2. Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ)	131
5.2.1. Η δομή των ΔΚΔ	131
5.2.2. Κανόνες δόμησης των ΔΚΔ	133
5.2.3. Παράδειγμα κατασκευής ενός ΔΚΔ	135
5.2.4. Η τεχνητή οντότητα «Πόρτα» και η δραστηριότητα της άφιξης	138
5.2.5. Παράδειγμα κατασκευής ενός ΔΚΔ (συνέχεια)	140
5.2.6. Άλλα παραδείγματα κατασκευής ΔΚΔ	142
5.3. Σημειολογία των ΔΚΔ	143
5.4. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΔΚΔ	145
5.5. Εκτέλεση Μοντέλου Προσομοίωσης: Η Μέθοδος των Τριών Φάσεων	146
5.5.1. Ο μηχανισμός της μεθόδου	146
5.5.2. Ένα παράδειγμα	147
5.6. Περίληψη	155
6. Χειρισμός Χρόνου και Μεθοδολογίες Προσομοίωσης	157
6.1. Εισαγωγή	157
6.2. Χειρισμός Χρόνου	158

6.2.1. Μηχανισμοί ελέγχου του χρόνου _____	158
6.3. Κατάλογος Επόμενου Γεγονότος _____	160
6.4. Μεθοδολογίες Προσομοίωσης Διακριτών Συστημάτων _____	162
6.5. Περίληψη _____	164
7. Ανάλυση Εισόδου και Εξόδου Προσομοίωσης _____	165
7.1. Εισαγωγή _____	165
7.2. Ανάλυση Εισόδου Προσομοίωσης _____	166
7.2.1. Δεδομένα εισόδου _____	166
7.2.2. Δειγματοληψία από συνεχείς κατανομές _____	171
7.2.3. Δειγματοληψία από διακριτές κατανομές _____	174
7.3. Ανάλυση Εξόδου Προσομοίωσης _____	179
7.3.1. Δεδομένα εξόδου _____	179
7.3.2. Στάδιο κατά την εκτέλεση του μοντέλου _____	181
7.3.3. Πειραματισμός _____	183
7.4. Περίληψη _____	189
8. Συστημική Ανάλυση και Μοντελοποίηση Συστημάτων _____	191
8.1. Εισαγωγή _____	191
8.2. Συστημική Σκέψη στη Διοικητική Επιστήμη _____	191
8.2.1. Συστημική σκέψη για πολύπλοκα προβλήματα _____	193
8.2.2. Βασικοί τύποι συμπεριφοράς συστήματος _____	194
8.2.3. Μοντελοποίηση δομής συστήματος και μηχανισμός ανάδρασης (Feedback) _____	197
8.2.4. Σχέσεις δομής συστήματος και τύπων συμπεριφοράς _____	202
8.2.5 Μοντελοποίηση με διαγράμματα σχέσεων αιτίας/ αιτιατού (Causal Loop Diagram) _____	206
8.3. Συστημική Δυναμική _____	208
8.3.1. Βασικά στοιχεία της δυναμικής συστημάτων _____	212
8.3.2. Γενίκευση της προσέγγισης _____	214
8.3.3. Αποθέματα (Stocks) και ροές (Flows) _____	215
8.3.4. Τύποι αποθεμάτων (Stocks) και ροών (Flows) _____	216
8.3.5. Πληροφορία _____	217
8.4. Περίληψη _____	219
9. Συστημική Δυναμική και Προσομοίωση Επιχειρηματικών Διαδικασιών 221	221
9.1. Εισαγωγή _____	221
9.2. Προσομοίωση Επιχειρηματικών Διαδικασιών _____	223
9.2.1. Εξισώσεις για τα αποθέματα (Stocks) _____	223
9.2.2. Εξισώσεις για τις ροές (Flows) _____	224
9.2.3. Λύνοντας τις εξισώσεις _____	225
9.2.4. Λύνοντας το μοντέλο _____	227
9.2.5 Μερικές επιπλέον παρατηρήσεις σε σχέση με τη σημειογραφία _____	228
9.3. Βασικές Δομές Ανάδρασης _____	229
9.3.1. Εκθετική ανάπτυξη (exponential growth) _____	230
9.3.2. Αναζήτηση στόχου (goal seeking) _____	232
9.3.3. Σιγμοειδής ανάπτυξη (S-shaped growth) _____	234
9.3.4. Σιγμοειδής ανάπτυξη με πτώση (S-shaped Growth Followed by Decline) _____	238

9.3.5. Διαδικασία ταλάντωσης (Oscillating Process)	240
9.4. Περίληψη	246

1. Εισαγωγή στη Προσομοίωση

1.1. Εισαγωγή

1.1.1. Τι είναι η προσομοίωση;

Η προσομοίωση (simulation) αποτελεί μια πολύ διαδεδομένη τεχνική μελέτης και ανάλυσης της συμπεριφοράς πολύπλοκων συστημάτων. Η προσομοίωση υιοθετεί έναν έμμεσο τρόπο μελέτης: αντί να μελετήσουμε το σύστημα που μας ενδιαφέρει απευθείας, δημιουργούμε ένα εικονικό μοντέλο του συστήματος αυτού, συνήθως σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή, και στη συνέχεια το χρησιμοποιούμε προκειμένου να μελετήσουμε, να αναλύσουμε ή/και να πειραματιστούμε με το σύστημα. Αν έχουμε δημιουργήσει το μοντέλο προσομοίωσης σωστά, τότε μπορούμε να έχουμε εμπιστοσύνη ότι τα συμπεράσματα στα οποία θα καταλήξουμε μέσω της μελέτης και του πειραματισμού με το μοντέλο, θα ισχύουν και για το πραγματικό σύστημα. Έτσι, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την προσομοίωση:

- Για να σχεδιάσουμε ένα μη υπαρκτό σύστημα, μελετούμε, μέσω του μοντέλου της προσομοίωσης, διάφορες παραμέτρους κατασκευής και λειτουργίας του πραγματικού συστήματος. Για παράδειγμα, προτού σχεδιάσουμε ένα κτήριο, ένα αυτοκίνητο, μια μονάδα παραγωγής σε μια βιομηχανία ή το πλάνο εκτέλεσης των Ολυμπιακών αγώνων σε μια πόλη μπορούμε να δημιουργήσουμε μοντέλα που να προσομοιώνουν την επιθυμητή συμπεριφορά των συστημάτων αυτών. Ύστερα πειραματιζόμαστε με τα μοντέλα υιοθετώντας διαφορετικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις ή κανόνες λειτουργίας και μελετούμε τις επιπτώσεις των επιλογών μας στη συμπεριφορά των μοντέλων αυτών. Όταν είμαστε ευχαριστημένοι με τις επιλογές μας, μπορούμε να ξεκινήσουμε τη διαδικασία υλοποίησης του πραγματικού συστήματος, γλυτώνοντας έτσι χρόνο, κόστος και λάθη που θα συνεπάγονταν η τυχόν απευθείας δημιουργία του πραγματικού συστήματος και η μετέπειτα πραγματοποίηση αλλαγών σε αυτό.
- Για να βελτιώσουμε τον τρόπο συμπεριφοράς ενός ήδη υπαρκτού συστήματος, χωρίς την ανάληψη κινδύνου που θα είχε ο πειραματισμός με το ίδιο το σύστημα. Για παράδειγμα, για να αποφασίσουμε αν και πόσο πρέπει να επεκταθεί η δυναμικότητα ενός τηλεφωνικού κέντρου εξυπηρέτησης πελατών, μπορούμε να αναπτύξουμε ένα μοντέλο προσομοίωσης που να

μιμείται τη συμπεριφορά του σημερινού κέντρου εξυπηρέτησης σε παραμέτρους όπως, ο αριθμός εξυπηρετητών, η συχνότητα και διάρκεια των κλήσεων των πελατών και άλλα. Στη συνέχεια, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο για πειραματισμό με διάφορες εναλλακτικές πολιτικές επέκτασης (π.χ. πρόσληψη επιπλέον εξυπηρετητών ή αλλαγή τρόπου δρομολόγησης κλήσεων) και να δούμε τι επιπτώσεις θα είχαν οι πολιτικές αυτές σε παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν, για παράδειγμα στο μέσο χρόνο αναμονής των πελατών προτού συνδεθούν με ένα εξυπηρετητή. Αφού επιλέξουμε τις παρεμβάσεις εκείνες που φαίνεται να έχουν τα καλύτερα αναμενόμενα αποτελέσματα στο μοντέλο της προσομοίωσης, μπορούμε να τις εφαρμόσουμε και στο πραγματικό σύστημα, προσδοκώντας ότι θα υπάρξουν τα ίδια αποτελέσματα και ελαχιστοποιώντας το κόστος και τον κίνδυνο απορρύθμισης του συστήματος λόγω συνεχών πειραματισμών και παρεμβάσεων στο ίδιο το σύστημα.

- Για να εκπαιδεύσουμε τους χρήστες ενός πραγματικού συστήματος σε περιπτώσεις που η εκπαίδευση τους απευθείας με το ίδιο το σύστημα σε πραγματικές συνθήκες είναι αδύνατη ή πολύ επικίνδυνη. Για παράδειγμα, η εκπαίδευση πιλότων αεροσκαφών, πληρωμάτων διαστημικών αποστολών ή ελεγκτών πυρηνικών σταθμών δεν μπορεί, για προφανείς λόγους, να γίνει απευθείας στα ίδια τα συστήματα που θα χρησιμοποιήσουν. Στην περίπτωση αυτή, η χρήση προσομοιωτών πτήσεων που μιμούνται τον τρόπο συμπεριφοράς του πραγματικού αεροσκάφους ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και τους χειρισμούς του πιλότου, αποτελεί σημαντικό μέρος της εκπαίδευσης των χειριστών αεροσκαφών.

Από τα προηγούμενα είναι φανερό ότι η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης έχει κυρίως νόημα όταν μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος στο χρόνο και όχι όταν θέλουμε απλά να πάρουμε μια στατική εικόνα αυτού. Ακόμα, η προσομοίωση έχει περισσότερο νόημα σε περίπλοκα συστήματα, η συμπεριφορά των οποίων εξαρτάται από συνδυασμό επιρροών και δεν είναι εύκολη η άμεση εκτίμηση των επιπτώσεων που θα είχε μια αλλαγή σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

Κατά καιρούς έχουν δοθεί αρκετοί «επίσημοι» ορισμοί της προσομοίωσης. Ας δούμε ενδεικτικά μερικούς από αυτούς:

«Οι βασικές αρχές της προσομοίωσης είναι αρκετά απλές. Ο αναλυτής κατασκευάζει ένα μοντέλο του υπό μελέτη συστήματος, γράφει πρόγραμμα υπολογιστή που ενσωματώνει το μοντέλο και χρησιμοποιεί τον υπολογιστή για να παρατηρήσει τη συμπεριφορά του συστήματος όταν υπόκειται σε διάφορες πολιτικές λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο επιλέγεται η πιο επιθυμητή πολιτική». (Pidd, 1984)

«Προσομοίωση είναι η διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων στο μοντέλο ενός συστήματος αντί (α) του άμεσου πειραματισμού με το πραγματικό σύστημα (β) της άμεσης επίλυσης κάποιου προβλήματος που σχετίζεται με το σύστημα με αναλυτική μέθοδο». (Mize and Cox, 1968)

«Προσομοίωση είναι η διαδικασία κατά την οποία κατασκευάζεται ένα μοντέλο ενός πραγματικού συστήματος και πραγματοποιούνται πειράματα σε αυτό, με στόχο είτε την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος, είτε την αξιολόγηση διαφόρων στρατηγικών για τη λειτουργία του». (Shannon, 1975)

Σε ότι αφορά τη μελέτη της προσομοίωσης στα πλαίσια του παρόντος μαθήματος, ο ορισμός που χρησιμοποιείται είναι ο εξής:

Η προσομοίωση είναι μια μέθοδος μελέτης και ανάλυσης δυναμικών συστημάτων μέσω υπολογιστικών μοντέλων, με σκοπό τη λήψη αποφάσεων για το σχεδιασμό ή τη βελτίωση της λειτουργίας των συστημάτων χωρίς την ανάγκη άμεσου πειραματισμού με αυτά.

Η προσομοίωση είναι μία μέθοδος που, αρκετά συχνά, βρίσκει εφαρμογή στην καθημερινή μας ζωή. Πολλές φορές που χρειάστηκε να πάρουμε απλές ή σύνθετες αποφάσεις, δημιουργήσαμε (ίσως και χωρίς να το καταλάβουμε) νοητά μοντέλα, μέσω των οποίων κατανοήσαμε την κατάσταση που μας προβληματίζει, προβλέψαμε τις πιθανές συνέπειες εναλλακτικών πράξεων μας και καταλήξαμε στην τελική απόφαση. Η ίδια διαδικασία, αλλά σε πιο περίπλοκες καταστάσεις, όπου η νοητική αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων δεν είναι εφικτή και απαιτείται η ανάπτυξη δυναμικών υπολογιστικών μοντέλων με σκοπό τον πειραματισμό με αυτά για την εξεύρεση εφικτών και επιθυμητών λύσεων, είναι η προσομοίωση.

Η προσομοίωση βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Ο τρόπος εφαρμογής όμως της προσομοίωσης είναι πολύ διαφορετικός ανάλογα με το πρόβλημα: είναι μάλλον

λογικό ότι η προσομοίωση της λειτουργίας ενός εμπορευματικού σταθμού δε θα έχει μεγάλη σχέση με την προσομοίωση συμπεριφοράς ενός αεροσκάφους ή με την προσομοίωση των κλιματικών αλλαγών που συντελούνται στον πλανήτη. Στα πλαίσια αυτού του βιβλίου, μας ενδιαφέρει κυρίως η εφαρμογή της προσομοίωσης σε προβλήματα Διοικητικής Επιστήμης, δηλαδή σε επιχειρηματικά και οργανωσιακά περιβάλλοντα. Σε τέτοια προβλήματα, η προσομοίωση αποτελεί ένα ισχυρό όπλο για τη μελέτη πληθώρας συστημάτων.

Ζητήματα όπως η εκτίμηση του κινδύνου σε μία δεδομένη επιχειρηματική πράξη, η λήψη μίας επιχειρηματικής απόφασης για την αγορά μετοχών, ο έλεγχος της διαθεσιμότητας των αποθεμάτων καθώς και πολλά βιομηχανικά και εμπορικά προβλήματα σε τομείς όπως η παραγωγή, η συντήρηση, το μάρκετινγκ, η διανομή και τα χρηματοοικονομικά μπορούν να μελετηθούν μέσω της προσομοίωσης. Παρακάτω θα δούμε μερικές ενδεικτικές τέτοιες εφαρμογές.

1.1.2. Το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον της προσομοίωσης

Η προσομοίωση γνώρισε αρχικά άνθηση στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με εφαρμογές στο χώρο της μηχανικής (κατασκευή γεφυρών και κτηριακών έργων). Αργότερα, χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο 2^ο παγκόσμιο πόλεμο ως μέσο μελέτης πολεμικών σεναρίων και επιλογής στρατιωτικών στρατηγικών.

Οι πρώιμες όμως αυτές χρήσεις της μεθόδου γίνονταν είτε με χρήση μαθηματικών μοντέλων (στην περίπτωση των προβλημάτων μηχανικής) είτε, κυριολεκτικά, επί χάρτου. Οι μεγάλες υπολογιστικές ανάγκες της προσομοίωσης για την αντιμετώπιση πολύπλοκων προβλημάτων αποτελούσαν τροχοπέδη για την ανάπτυξη της προσομοίωσης.

Έτσι, η πρώτη υιοθέτηση της προσομοίωσης σε μεγάλη κλίμακα σε οικονομικά και επιχειρηματικά προβλήματα πραγματοποιήθηκε το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, όταν η προσομοίωση άρχισε να χρησιμοποιείται σαν εργαλείο ανάλυσης οικονομικών και επιχειρηματικών προβλημάτων. Ένα από τα πρώτα προβλήματα στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό των αποθεμάτων. Τη δεκαετία του 1970, η προσομοίωση άρχισε να εφαρμόζεται ευρέως στο χώρο του μάρκετινγκ και στη συνέχεια σε κάθε σχεδόν τομέα λειτουργίας των οργανισμών και των επιχειρήσεων.

Σήμερα, λόγω της αλματώδους ανάπτυξης της επεξεργαστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών, τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν σημαντικά

εργαλεία ανάλυσης και επίλυσης προβλημάτων σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, όπως:

Παροχή υπηρεσιών

➤ Υγεία

Με τη βοήθεια της προσομοίωσης μπορεί να μελετηθούν συστήματα παροχής υπηρεσιών υγείας, όπως για παράδειγμα η εξακρίβωση ικανοποιητικής λειτουργίας μίας μονάδα εντατικής θεραπείας (π.χ. ποιος είναι ο μέσος χρόνος αναμονής ασθενών για κλίνη ή σε τι ποσοστό των περιπτώσεων επείγοντα περιστατικά δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν λόγω έλλειψης κλινών ή/ και προσωπικού). Επίσης για να βελτιωθεί η λειτουργία της (π.χ. να μειωθούν τα περιστατικά αδυναμίας εξυπηρέτησης, να γίνεται καλύτερη διαχείριση των αποθεμάτων φαρμάκων ή καλύτερος προγραμματισμός στις βάρδιες γιατρών και νοσηλευτών).

➤ Εκπαίδευση

Μπορούν μέσω προσομοίωσης να μελετηθούν οι επιπτώσεις που θα είχαν η διαχείριση σχολικού χώρου και χρόνου ή σχετικές διαδικασίες (π.χ. βιβλιοθήκη), αλλά ακόμα και γενικότερες αλλαγές στο εκπαιδευτικό σύστημα (π.χ. αριθμός εισακτέων στα πανεπιστήμια). Μία πολύ γνωστή περίπτωση χρήσης της προσομοίωσης για εκπαιδευτικούς σκοπούς, είναι η εφαρμογή της στην εκπαίδευση των πιλότων με τη χρήση προσομοιωτών πτήσης.

➤ Ψυχαγωγία

Η εικονική πραγματικότητα και η χρήση της σε παιχνίδια ή ψηφιακές υπηρεσίες είναι στην πραγματικότητα χρήση της προσομοίωσης (όπου τα μοντέλα μιμούνται λειτουργίες του πραγματικού κόσμου). Η προσομοίωση χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή κινηματογραφικών ταινιών, στον προγραμματισμό λειτουργιών σε αίθουσες ψυχαγωγίας - χωροθέτηση, προγραμματισμός προσωπικού, κλπ.

➤ Ξενοδοχειακές υπηρεσίες

Η προσομοίωση χώρων φιλοξενίας μπορεί να βελτιώσει βασικά σημεία όπως η διαχείριση δυναμικότητας μιας ξενοδοχειακής μονάδας, των πόρων και των αποθεμάτων αυτής κ.α.

➤ Χρηματοοικονομικές υπηρεσίες

Η προσομοίωση τραπεζικών συστημάτων και αυτόματων συστημάτων ανάληψης χρημάτων (ATM) βοηθά στον προγραμματισμό και την κατανομή των αποθεμάτων και το σχεδιασμό αντίστοιχων δικτύων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επιπλέον, η προσομοίωση σεναρίων μετοχικών συναλλαγών είναι συνηθισμένη πρακτική με σκοπό τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επένδυση κεφαλαίων για την απολαβή μεγαλύτερων αποδόσεων.

➤ Μέτρα ασφαλείας

Η προσομοίωση συστημάτων ελέγχου αποσκευών σε αεροδρόμια χρησιμοποιείται για να δώσει απαντήσεις σε θέματα όπως, ο μέσος χρόνος που απαιτείται για το πέρασμα επιβατών από το χώρο ελέγχου, το μέσο μήκος της ουράς αναμονής στον ανιχνευτή μετάλλων, η βέλτιστη χωρητικότητα του χώρου προσωρινής εναπόθεσης των αποσκευών μεταξύ των ελέγχων κλπ.

➤ Κυκλοφοριακές ρυθμίσεις

Προσομοιώνοντας την κίνηση σε ένα κυκλοφοριακό κόμβο, μπορούν να γίνουν μετρήσεις (π.χ. του μέσου χρόνου αναμονής των οχημάτων στα φανάρια και της δυναμικότητας/ροής σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας) με σκοπό την αποσυμφόρηση της κίνησης μέσω κατάλληλων παρεμβάσεων (π.χ. επαναρρύθμιση φαναριών, αλλαγή προτεραιοτήτων).

➤ Κέντρα εξυπηρέτησης βλαβών

Η προσομοίωση της λειτουργίας ενός κέντρου εξυπηρέτησης βλαβών θα είχε ως πιθανά οφέλη τον υπολογισμό της απόδοσης κάθε τεχνικού, του μέσου χρόνου απόκρισης στις κλήσεις και τη δοκιμή σεναρίων για τη μείωση του χρόνου αυτού.

Συστήματα επικοινωνίας

➤ Υπολογιστικά συστήματα

Η προσομοίωση της λειτουργίας δικτύων υπολογιστών μπορεί να δώσει απαντήσεις σε ερωτήματα όπως η χωροθέτηση κόμβων, η χωρητικότητα και ταχύτητα γραμμών μετάδοσης, η τοποθέτηση σημείων ασύρματης πρόσβασης, και άλλες παραμέτρους.

➤ Τηλεφωνικά δίκτυα

Η προσομοίωση της χρήσης κινητής τηλεφωνίας ανά περιοχή μπορεί να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εγκατάσταση του σωστού αριθμού κεραιών στα κατάλληλα σημεία, την ισχύ και προσανατολισμό κάθε κεραιάς, τη ζεύξη με το δίκτυο κορμού και άλλες παραμέτρους.

Παραγωγή

➤ Βιομηχανία

Βιομηχανικές μονάδες μπορούν με τη χρήση προσομοίωσης να πάρουν αποφάσεις για χωροθέτηση εγκαταστάσεων, δυναμικότητα γραμμών παραγωγής, προγραμματισμό επενδύσεων (π.χ. αγορά εξοπλισμού), βελτίωση διαδικασιών και άλλα.

➤ Φυτική και ζωική καλλιέργεια

Η προσομοίωση τέτοιων συστημάτων βοηθά στην πρόβλεψη της παραγωγής, στην αποδοτικότερη διαχείριση των πόρων και στον ανασχεδιασμό λειτουργικών διαδικασιών (θερισμός, τροφή, κλπ).

➤ Βιοτεχνία

Προσομοιώνοντας τη λειτουργία μιας βιοτεχνικής μονάδας είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μέσου χρόνου ικανοποίησης παραγγελιών, η αξιολόγηση της επένδυσης σε επιπλέον εξοπλισμό, η εύρεση σημείων συσσώρευσης και πρόκλησης δυσλειτουργιών και ο κατάλληλος ανασχεδιασμός επιχειρηματικών διαδικασιών.

➤ Παραγωγή ενέργειας

Συστήματα παραγωγής ενέργειας προσομοιώνονται για τον προγραμματισμό δυναμικότητας και σύνθεσης, καθώς και για την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου, ασφάλειας, αξιοπιστίας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Μεταφορές

➤ Μεταφορικές εταιρίες

Η προσομοίωση συστημάτων μεταφοράς (φορτηγά, πλοία, αεροπλάνα) χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό του μέσου χρόνου των δρομολογίων, των πιθανών σημείων συμφόρησης, τον υπολογισμό της απαιτούμενης χωρητικότητας των οχημάτων, τη δρομολόγηση, τον προγραμματισμό του προσωπικού κ.α.

➤ Υπηρεσίες εφοδιαστικής αλυσίδας

Μελετώνται συστήματα, όπως supermarket και εστιατόρια, για την ορθή και έγκαιρη διαχείριση της αποθήκης, της διανομής και του εργατικού δυναμικού αυτών. Η μελέτη γίνεται με σκοπό το σχεδιασμό των προμηθειών και της διανομής, τη χωροταξική τοποθέτηση προϊόντων, τον προγραμματισμό ανθρώπινου δυναμικού, τη διαχείριση διαδικασιών επιστροφής κλπ.

Επιστήμη

➤ Μετεωρολογικές προβλέψεις, περιβάλλον και οικολογία

Η προσομοίωση χρησιμοποιείται ευρέως στη μετεωρολογία για την πρόβλεψη τοπικών και παγκόσμιων καιρικών συνθηκών. Με την ίδια μέθοδο γίνονται μελέτες σχετικά με τον έλεγχο της ρύπανσης και άλλων περιβαλλοντικών φαινομένων, όπως αυτό του θερμοκηπίου, αλλά και φαινομένων εξάπλωσης πανδημιών για εναλλακτικές πολιτικές αντιμετώπισής τους.

Από τις παραπάνω εφαρμογές, φαίνεται ότι είναι λίγες οι περιπτώσεις ζητημάτων Διοικητικής Επιστήμης, στις οποίες δε θα μπορούσε να εφαρμοστεί η προσομοίωση. Το γεγονός αυτό οδηγεί όλο και περισσότερες επιχειρήσεις να την επιλέγουν ως μέθοδο μελέτης προβλημάτων. Σε συνδυασμό και με τον αυξανόμενο ρυθμό ανάπτυξης των υπολογιστών, η εξέλιξη της προσομοίωσης αναμένεται θεαματική τα επόμενα χρόνια. Η ώθηση οφείλεται κυρίως στους παρακάτω παράγοντες:

- Στον αυξανόμενο βαθμό πολυπλοκότητας των συστημάτων, γεγονός που καθιστά απαγορευτική ή ασύμφορη τη χρήση μαθηματικών και άλλων εμπειρικών εργαλείων για την επίλυση τους.
- Στη διαθεσιμότητα πολλών μοντέρνων εργαλείων λογισμικού προσομοίωσης, με φιλικά περιβάλλοντα λειτουργίας τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης, με ελάχιστο προγραμματισμό.
- Στις αυξανόμενες δυνατότητες και το χαμηλότερο κόστος απόκτησης των ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- Στο ολοένα αυξανόμενο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον που παρατηρείται στα προπτυχιακά και μεταπτυχιακά προγράμματα, με αποτέλεσμα να τροφοδοτείται η αγορά με στελέχη ικανά να αξιοποιήσουν την προσομοίωση επιχειρηματικών προβλημάτων.

1.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Προσομοίωσης

Η αύξηση της δημοτικότητας της προσομοίωσης μπορεί να αποδοθεί στα σημαντικά πλεονεκτήματά της, έναντι άλλων μεθόδων ανάλυσης, όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός, τα ευρετικά μοντέλα, η πολυκριτήρια ανάλυση, κ.ά. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Το γεγονός ότι η προσομοίωση μπορεί κάποιες φορές να αποτελεί τη μόνη εφικτή τεχνική ανάλυσης περίπλοκων συστημάτων.
- Μπορεί να κοστίζει λιγότερο σε σχέση με τον κίνδυνο υλοποίησης μιας αμφίβολης και δαπανηρής, χωρίς ανάλυσης, απόφασης.
- Μπορεί να είναι περισσότερο κατανοητή για τους χρήστες, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μοντέλων προσομοίωσης που χρησιμοποιούν γραφικά και animation.
- Μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη αντίληψη της σχέσης μεταξύ των τμημάτων ενός συστήματος (με τη χρήση τεχνικών, όπως η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου).
- Αποτελεί μια από τις πιο ασφαλείς μεθόδους, αφού αφορά πειραματισμό με κάποιο μοντέλο και όχι με το πραγματικό σύστημα.
- Παρέχει τη δυνατότητα επανάληψης και μελέτης του ίδιου φαινομένου υπό διαφορετικές συνθήκες (πειραματισμός και ανάλυση σεναρίων).

Από την άλλη όμως μεριά, η προσομοίωση σίγουρα δεν είναι μια απλή στην εφαρμογή μέθοδος που ενδείκνυται σε όλα τα είδη προβλημάτων. Έτσι, στα μειονεκτήματα και κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας της μεθόδου μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Η κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι εξαιρετικά δαπανηρή (αγορά λογισμικού, κόστος ανάλυσης του συστήματος) και χρονοβόρα (εξοικείωση με το λογισμικό, χρόνος υλοποίησης, επικύρωσης και πειραματισμού).
- Η προσομοίωση αποτελεί μέθοδο ανάλυσης και μελέτης ενός προβλήματος και όχι μέθοδο επίλυσής του. Με άλλα λόγια, η προσομοίωση δεν μπορεί να εντοπίσει λύσεις (βέλτιστες ή μη) για ένα πρόβλημα. Απλά βοηθά τον αναλυτή να δημιουργήσει ένα περιβάλλον στο οποίο μπορεί να πειραματιστεί με εναλλακτικές λύσεις σε ένα πρόβλημα και να δει τις επιπτώσεις των παρεμβάσεων του. Οπότε, η προσομοίωση μπορεί να μην είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος μελέτης ενός απλού προβλήματος.
- Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης βρίσκεται σε απόλυτη εξάρτηση με την ποιότητα του μοντέλου: ένα κακό μοντέλο προσομοίωσης (που δεν αναπαριστά πιστά το πραγματικό σύστημα) μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.

1.2.1. Σύγκριση της προσομοίωσης με άλλες μεθόδους

Η προσομοίωση, ως μέθοδος ανάλυσης και μελέτης της συμπεριφοράς ενός συστήματος, μπορεί να συγκριθεί είτε με τον άμεσο πειραματισμό με το ίδιο το σύστημα είτε με τη χρήση εναλλακτικών, κυρίως μαθηματικών, μεθόδων μοντελοποίησης προβλημάτων.

Σε σχέση με τον άμεσο πειραματισμό, η προσομοίωση υπερέχει κυρίως σε ότι αφορά το κόστος, την ασφάλεια και την επαναληψιμότητα: Στον πραγματικό κόσμο δε μας δίνεται η δυνατότητα να επαναλαμβάνουμε ένα πείραμα κάτω από ακριβώς ίδιες κάθε φορά και ελεγχόμενες συνθήκες. Το προφανές μειονέκτημα της προσομοίωσης σε αυτή την περίπτωση είναι η αβεβαιότητα σχετικά με το αν οι αλλαγές στον πραγματικό κόσμο θα έχουν τις ίδιες επιπτώσεις όπως οι αλλαγές στο μοντέλο της προσομοίωσης.

Σε σχέση με τα μαθηματικά μοντέλα, η προσομοίωση υπερέχει όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος, καθώς τα μαθηματικά μοντέλα δεν είναι κατάλληλα για το χειρισμό πολλών περίπλοκων προβλημάτων, όπου είτε δεν μπορούν να δώσουν λύση, είτε οι λύσεις που δίνουν είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες. Για παράδειγμα, η προσομοίωση είναι καλύτερη μέθοδος στο χειρισμό ιδιαίτερα δυναμικών προβλημάτων με πολλές παραμέτρους, έχοντας βέβαια το μειονέκτημα ότι δεν επιλύει το πρόβλημα (όπως τα μαθηματικά μοντέλα) αλλά μας επιτρέπει να το μελετήσουμε καλύτερα και να σκεφτούμε πιθανές λύσεις του. Αντίθετα, είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται οι μαθηματικές μέθοδοι όταν μπορούν να χειριστούν ένα πρόβλημα, καθώς μπορεί να οδηγήσουν στη βέλτιστη λύση του.

1.2.2. Η προσομοίωση σε προβλήματα διοικητικής επιστήμης

Η προσομοίωση, ως ένα εργαλείο μοντελοποίησης, χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα διοικητικής επιστήμης. Οι δύο από τις πλέον καθιερωμένες προσεγγίσεις είναι: η προσομοίωση γεγονότων διακριτού χρόνου (Discrete Event Simulation - DES) και η Συστημική Δυναμική (System Dynamics - SD). Τόσο τα μοντέλα προσομοίωσης γεγονότων διακριτού χρόνου όσο και συστημικής δυναμικής αποτελούν απλουστευμένες αναπαραστάσεις ενός συστήματος που αναπτύσσονται με σκοπό την κατανόηση των επιδόσεων του στην πάροδο του χρόνου και τον εντοπισμό πιθανών σημείων βελτίωσης.

Η προσομοίωση γεγονότων διακριτού χρόνου έχει ιδιαίτερη εφαρμογή σε συστήματα όπου οι αλλαγές γίνονται σε διακριτά σημεία στο χρόνο και οι τυχόν δυσλειτουργίες στο σύστημα προέρχονται από την πιθανή δημιουργία ουρών σε διάφορα σημεία του. Η προσομοίωση γεγονότων διακριτού χρόνου, σε ότι αφορά τα προβλήματα διοικητικής επιστήμης, ενδείκνυται περισσότερο σε περιπτώσεις πολύπλοκων συστημάτων που παρουσιάζουν ισχυρές δομές ουρών. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος «ουρά» σε αυτό τον ορισμό αναφέρεται τόσο σε πραγματικές ουρές (π.χ. μια ουρά πελατών σε μια τράπεζα, μια λίστα τηλεφωνικών κλήσεων σε αναμονή ενός κέντρου εξυπηρέτησης) όσο και σε περιπτώσεις που μπορούν να χαρακτηριστούν ως ουρές (π.χ. μια λίστα παραγγελιών που περιμένουν για ικανοποίηση, μια δέσμη προϊόντων που περιμένουν το επόμενο στάδιο επεξεργασίας τους, μια σειρά πακέτων δεδομένων που περιμένουν για δρομολόγηση, σε ένα δίκτυο υπολογιστών κ.α.) Η πλειοψηφία των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονες επιχειρήσεις και οργανισμοί μπορούν να ειπωθούν (και) ως προβλήματα ουρών. Η

προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά στο βιομηχανικό τομέα, ενώ πρόσφατα έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο στον τομέα των υπηρεσιών, όπως είδαμε παραπάνω.

Στη συστημική δυναμική, τα προβλήματα διοικητικής επιστήμης μοντελοποιούνται ως ένα σύνολο αποθεμάτων και ροών (stock and flows), προσαρμοσμένα σε ψευδοσυνεχή χρόνο. Η ανάδραση/ανατροφοδότηση (feedback), που προκύπτει ως το αποτέλεσμα των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών του μοντέλου, είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στα μοντέλα συστημικής δυναμικής. Η συστημική δυναμική έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα υψηλότερο, πιο συγκεντρωτικό και στρατηγικό επίπεδο από ό,τι η προσομοίωση γεγονότων διακριτού χρόνου. Ο Forrester (1961) πίστευε ακράδαντα ότι τα μοντέλα συστημικής δυναμικής είναι «εργαστήρια εκμάθησης» και όχι είναι εργαλεία βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση αυτή έχει εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων, μερικά από τα οποία περιλαμβάνουν θέματα οικονομικής συμπεριφοράς, πολιτικής, ψυχολογίας, άμυνας και ποινικού δικαίου, ενέργειας και περιβάλλοντος, διαχείρισης εφοδιαστικών αλυσίδων, υγειονομικής περίθαλψης, διαχείρισης έργων, εκπαίδευσης, πρόσληψης προσωπικού, καθώς επίσης και στην βιομηχανία.

1.3. Οι Φάσεις της Προσομοίωσης

Όπως έχουμε ήδη πει, η προσομοίωση συνίσταται στην κατασκευή ενός μοντέλου του συστήματος που μελετάται. Στο μοντέλο αυτό περιλαμβάνονται όλα τα σημαντικά στοιχεία του συστήματος και καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο αυτά μεταβάλλονται με το χρόνο και αλληλοεπηρεάζονται.

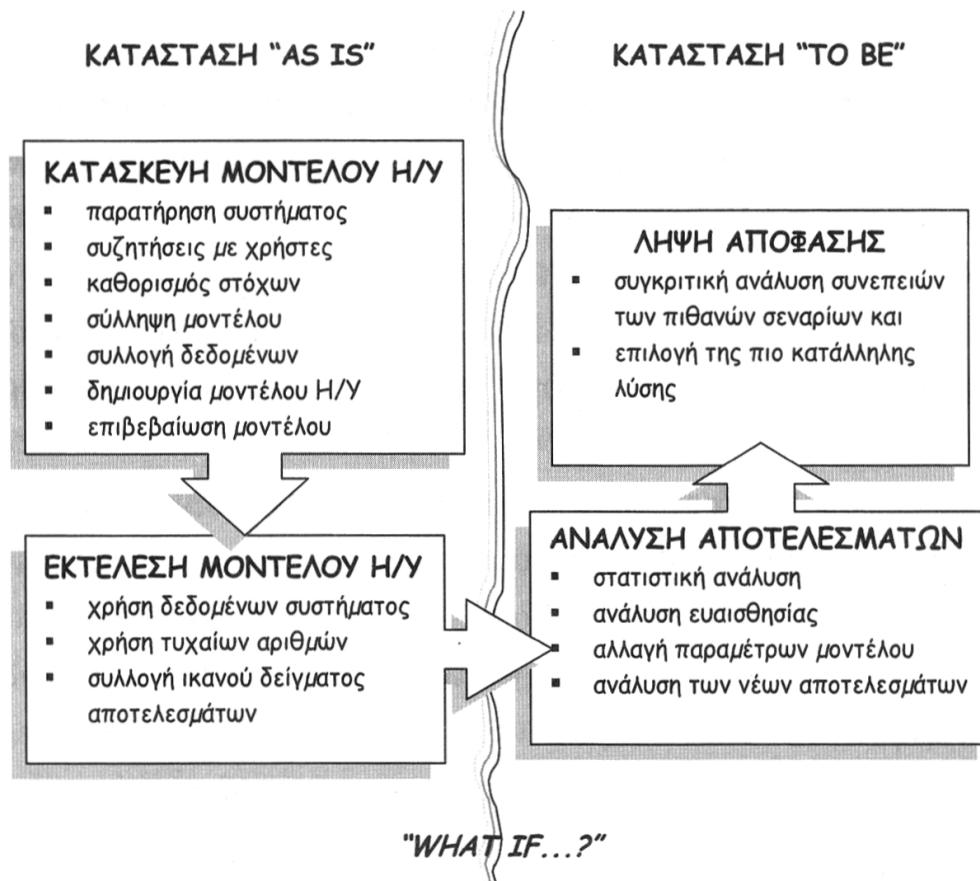
Το μοντέλο υλοποιείται σε κάποιο λογισμικό και τίθεται σε λειτουργία με σκοπό την παρατήρηση της συμπεριφοράς του. Αφού τρέξει για κάποιο χρονικό διάστημα, γίνεται σύγκριση των τιμών των μεταβλητών του μοντέλου με τις αντίστοιχες μεταβλητές του πραγματικού συστήματος. Αν οι τιμές συγκλίνουν ικανοποιητικά, τότε το μοντέλο θεωρείται καλή αναπαράσταση της πραγματικότητας.

Στην περίπτωση αυτή αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τη πραγματοποίηση ελεγχόμενων πειραμάτων. Η διαδικασία του πειραματισμού χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η επίδραση διαφόρων παραγόντων της λειτουργίας του συστήματος στην απόδοσή του.

Έτσι, η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί να διακριθεί σε τρεις κύριες φάσεις:

- I. Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης. Περιλαμβάνει την παρατήρηση του συστήματος (μελέτη υπάρχουσας κατάστασης ή κατάσταση as-is), ώστε να κατανοηθεί το πρόβλημα και να τεθούν οι στόχοι της προσομοίωσης. Ακολουθεί η σύλληψη του μοντέλου, η συλλογή ποσοτικών δεδομένων που απαιτούνται για το μοντέλο και η υλοποίηση του μοντέλου σε υπολογιστική μορφή (συνήθως με τη χρήση ειδικού λογισμικού προσομοίωσης).
- II. Εκτέλεση του μοντέλου προσομοίωσης. Το μοντέλο εκτελείται («τρέχει») στον υπολογιστή, αρκετές φορές, ώστε να συλλεχθεί ικανό δείγμα αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για δυο σκοπούς. Πρώτον, για την επικύρωση του μοντέλου, δηλαδή τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν και επομένως το μοντέλο αποτελεί πιστή αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης. Δεύτερον, για τον εντοπισμό προβληματικών σημείων στη συμπεριφορά του μοντέλου (και επομένως και του συστήματος), για παράδειγμα σημεία δημιουργίας ουρών ή άλλων καθυστερήσεων και τη σύλληψη ιδεών για πιθανές βελτιωτικές παρεμβάσεις. Ο εντοπισμός των προβλημάτων γίνεται με στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων από την εκτέλεση του as-is μοντέλου προσομοίωσης.
- III. Πειραματισμός. Οι ιδέες που θα προκύψουν σχετικά με πιθανές αλλαγές στο σύστημα, εφαρμόζονται στο μοντέλο της προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό, το αρχικό as-is μοντέλο τροποποιείται αλλάζοντας κάποιες παραμέτρους του μοντέλου και τα μοντέλα που θα προκύψουν (to-be μοντέλα) εκτελούνται και αναλύονται με τον ίδιο τρόπο στατιστικά τα αποτελέσματά τους. Η σύγκριση επιτρέπει την εκτίμηση των συνεπειών από τις αλλαγές και την επιλογή της πλέον επιθυμητής λύσης.

Το Σχήμα 1.1. απεικονίζει τη διαδικασία της προσομοίωσης.



Σχήμα 1.1. Φάσεις της προσομοίωσης

1.4. Περίληψη

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού επιχειρήθηκε μια εισαγωγή στην έννοια και το περιεχόμενο της προσομοίωσης ως μεθόδου πειραματισμού στη λήψη αποφάσεων. Παρουσιάστηκε η πορεία της ιστορικά και συζητήθηκαν χρήσεις της μεθόδου σε τομείς όπως παροχή υπηρεσιών, παραγωγή προϊόντων και επιστημονικές μελέτες. Έγινε αναφορά στα δυνατά και αδύνατα σημεία της προσομοίωσης σε σχέση με εναλλακτικές μεθόδους μελέτης και ανάλυσης συστημάτων και αποσαφηνίστηκαν οι περιπτώσεις στις οποίες ενδείκνυται η χρήση της προσομοίωσης σε προβλήματα διοικητικής επιστήμης. Τέλος, παρουσιάστηκαν οι κύριες φάσεις της προσομοίωσης, οι οποίες θα αναπτυχθούν εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια.

2. Προσομοίωση και Μοντέλα Συστημάτων

2.1. Εισαγωγή

Η μελέτη συστημάτων με μαθηματικές μεθόδους απαιτεί αφενός πλήρη γνώση του υπάρχοντος ή προτεινομένου συστήματος και αφετέρου δυνατότητα αναπαράστασης του συστήματος με μαθηματικά μοντέλα. Επειδή, όμως, οι δύο αυτές προϋποθέσεις σχεδόν ποτέ δεν πληρούνται σε πολύπλοκα συστήματα, αναπτύχθηκαν άλλες μεθοδολογίες μελέτης και ανάλυσης συστημάτων, οι οποίες αν και δεν είναι τόσο ακριβείς όσο οι μαθηματικές μέθοδοι, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι η προσομοίωση.

Ο στόχος του μαθήματος αυτού είναι να περιγραφούν οι τεχνικές με τις οποίες χρησιμοποιείται ο υπολογιστής για να μιμηθεί ή να προσομοιώσει τη συμπεριφορά μίας διεργασίας ή ενός συστήματος μέσα στο χρόνο. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται για να περιγραφεί και να αναλυθεί η συμπεριφορά και η αντίδραση ενός πραγματικού συστήματος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, να επαληθευτεί η ορθότητα της λειτουργίας του, με σκοπό την τελική σχεδίαση αυτού του συστήματος. Ορισμένα παραδείγματα χρήσης της προσομοίωσης αποτελούν τα εξής:

1. Ανάλυση και σχεδίαση συστημάτων παραγωγής
2. Σχεδίαση και λειτουργία συστημάτων μεταφορών, όπως αεροδρόμια, λιμάνια, αυτοκινητόδρομοι κλπ.
3. Ανάλυση των απαιτήσεων υλικού και λογισμικού των ψηφιακών συστημάτων (υπολογιστών, δικτύων υπολογιστών, συστημάτων παράλληλης επεξεργασίας, κλπ)
4. Ανάλυση των εφοδιαστικών αλυσίδων
5. Ανάλυση του τρόπου λειτουργίας διαφόρων συστημάτων παροχής υπηρεσιών (π.χ. τράπεζες, ταχυδρομεία, ανελκυστήρες, κ.α.)
6. Πειραματισμός πάνω σε διάφορες στρατηγικές διοίκησης πριν αυτές υλοποιηθούν
7. Μελέτες μικροοικονομικών και μακροοικονομικών στρατηγικών
8. Μελέτες εξαιρετικά πολύπλοκων συστημάτων, όπως είναι τα μετεωρολογικά συστήματα

Η προσομοίωση αποτελεί μία πειραματική μέθοδο που έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση συστημάτων, την ανάλυση της ευαισθησίας τους και τη μελέτη της

λειτουργίας τους. Ως πειραματική μέθοδος εξαρτάται πολύ από την πιστότητα του μοντέλου του συστήματος που χρησιμοποιείται, καθώς και από την επιλογή εκείνων των παραμέτρων που απαιτούνται για την εξαγωγή αξιόπιστων και χρήσιμων συμπερασμάτων. Το μοντέλο συνήθως αποτελείται από ένα πεπερασμένο σύνολο υποθέσεων, οι οποίες αφορούν τη λειτουργία του συστήματος και τον τρόπο με τον οποίο αντιδρά σε κάθε μεταβολή των εισόδων του συστήματος. Οι υποθέσεις αυτές μπορούν να εκφραστούν με τη βοήθεια μαθηματικών, λογικών, ή συμβολικών σχέσεων, οι οποίες διέπουν τα στοιχεία ή τις οντότητες του συστήματος. Το βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι ότι καθορίζεται πολύ πιο εύκολα και με πιο μεγάλη σαφήνεια, σε σχέση με το πραγματικό σύστημα.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική εισαγωγή στις έννοιες της προσομοίωσης και μοντελοποίησης. Ο στόχος του είναι να εξηγήσει τι είναι τα μοντέλα συστημάτων και ποια είναι τα χαρακτηριστικά τους και για να αναλύσει τους λόγους για τους οποίους χρησιμοποιείται η προσομοίωση για τη μελέτη συστημάτων.

2.2. Προσομοίωση και Εξομοίωση

Ο όρος προσομοίωση (Simulation) συγχέεται συχνά με τον όρο εξομοίωση (Emulation), αν και οι όροι αυτοί υποδηλώνουν τελείως διαφορετικές μεθοδολογίες.

Ορισμός 2.1.

Προσομοίωση είναι μια μέθοδος μελέτης ενός συστήματος και εξοικείωσης με τα χαρακτηριστικά του, με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής.

Ορισμός 2.2.

Εξομοίωση είναι μια μέθοδος αναπαραγωγής ενός συστήματος εντός ή μέσω ενός άλλου συστήματος παρόμοιου με το πρώτο.

Είναι λοιπόν εμφανές ότι κατά την προσομοίωση δεν πρέπει να υπάρχει η επιθυμία υλοποίησης του πραγματικού συστήματος, γιατί σκοπός είναι η μελέτη του συστήματος και όχι η χρήση του. Αντίθετα, κατά την εξομοίωση υπάρχει η εντύπωση υλοποίησης του πραγματικού συστήματος γιατί σκοπός είναι η χρήση του.

Παράδειγμα 2.1.

Ως πρώτο παράδειγμα ας εξετάσουμε την προσομοίωση και την εξομοίωση ενός αεροσκάφους τύπου Airbus A320. Η προσομοίωση ενός τέτοιου αεροσκάφους, μπορεί να γίνει είτε εξ ολοκλήρου σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή είτε με την κατασκευή ενός συστήματος που έχει όλα τα χειριστήρια και όργανα του αεροσκάφους.

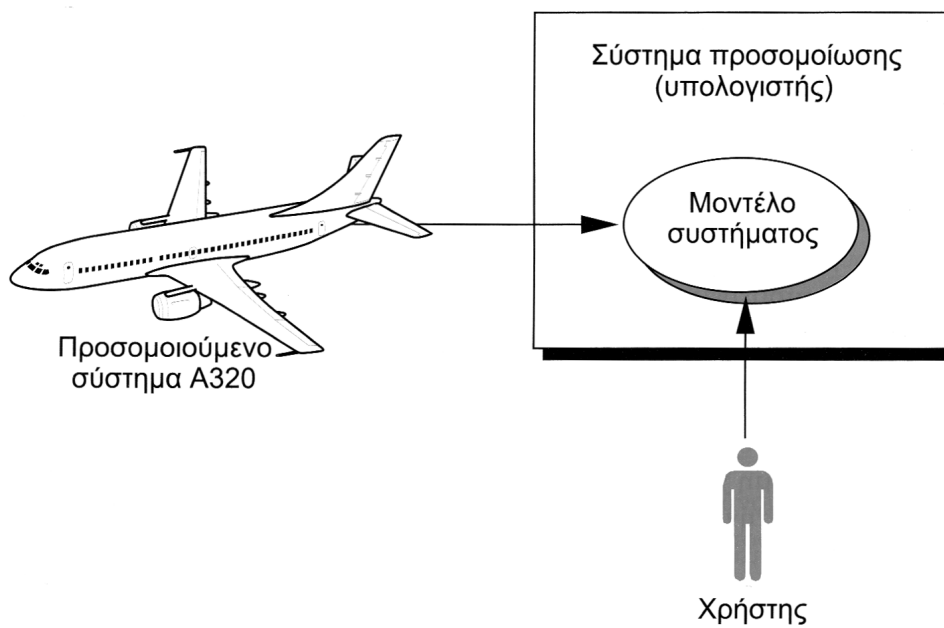
Στην πρώτη περίπτωση είναι πιθανόν να απαιτείται η μελέτη της συμπεριφοράς του αεροσκάφους από αεροδυναμικής απόψεως, της αντίδρασής του σε ανέμους, κενά αέρος, κλπ. Για το σκοπό αυτό δημιουργείται στον υπολογιστή ένα μαθηματικό μοντέλο του αεροσκάφους και εισάγονται σ' αυτό οι παράμετροι των φυσικών χαρακτηριστικών του αεροσκάφους καθώς και οι εξισώσεις αεροδυναμικής. Από την προσομοίωση κατόπιν εξάγονται τα αποτελέσματα που αφορούν την αντίσταση του αέρα, τις δυνάμεις άνωσης, την πιθανή δημιουργία στροβίλων, κ.α.

Στη δεύτερη περίπτωση είναι πιθανόν να επιδιώκεται η εκπαίδευση πιλότων του αεροσκάφους, πριν ακόμη αυτό κατασκευασθεί ή να επιλέγεται η προσομοίωση για λόγους ασφαλείας ή οικονομίας. Προς το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα σύστημα προσομοίωσης, το οποίο έχει όλα τα απαραίτητα χειριστήρια και όργανα του αεροσκάφους και ελέγχεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο υπολογιστής, αντιδρώντας στους χειρισμούς του εκπαιδευόμενου πιλότου, μεταβάλλει τις ενδείξεις στα όργανα και είναι πιθανό να κινεί ολόκληρο τον προσομοιωτή, για περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

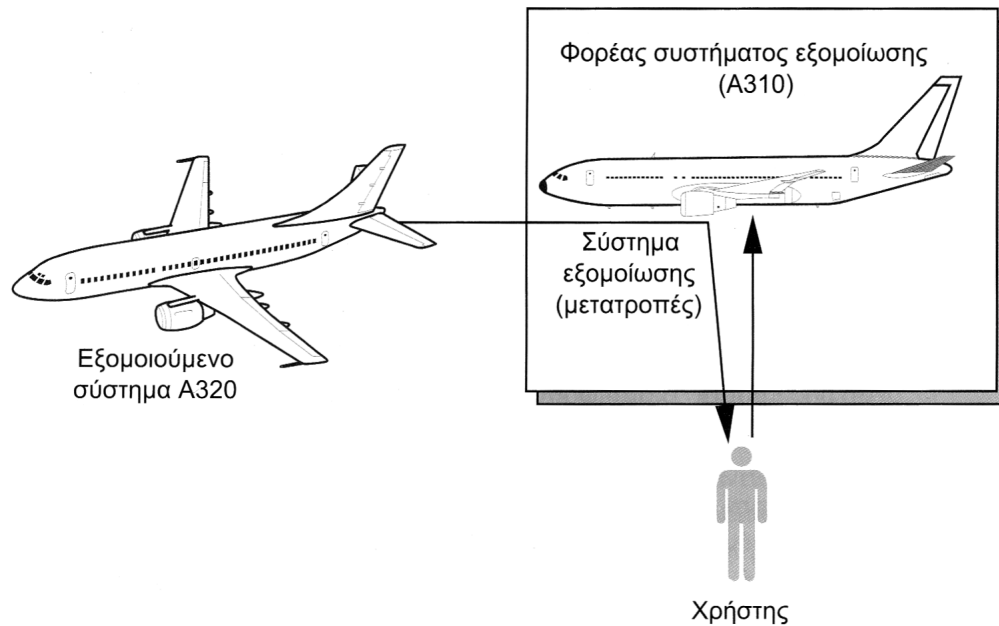
Και στις δύο περιπτώσεις όμως ούτε οι χειριστές του υπολογιστή ούτε οι εκπαιδευόμενοι πιλότοι έχουν την εντύπωση ότι εργάζονται με το πραγματικό σύστημα, δηλαδή το αεροσκάφος τύπου A320. Όπως φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.1. το προσομοιούμενο σύστημα υπάρχει μόνον ως μοντέλο στον υπολογιστή και ο χρήστης έρχεται σε επαφή μόνον με τον υπολογιστή.

Η εξομοίωση του αεροσκάφους μπορεί να γίνει μόνο με βάση ένα παρόμοιο αεροσκάφος και τις κατάλληλες μετατροπές σε αυτό. Για το σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αεροσκάφος τύπου Airbus A310, στο οποίο να αντικατασταθούν τα απαιτούμενα χειριστήρια και όργανα με αυτά του A320.

Έτσι, ο πιλότος που κυβερνά το A310 που μετατράπηκε θα έχει την εντύπωση ότι κυβερνά ένα αεροσκάφος A320. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι για την πραγματική εξομοίωση δεν αρκεί μόνο η αντικατάσταση των χειριστηρίων και των οργάνων αλλά και η όσο το δυνατόν πιο πιστή μετατροπή των χαρακτηριστικών του αεροσκάφους A310, ώστε να συμπεριφέρεται όπως ένα A320. Στο Σχήμα 2.2. φαίνεται το διάγραμμα εξομοίωσης του παραδείγματος αυτού.



Σχήμα 2.1. Διάγραμμα προσομοίωσης του A320



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα εξομοίωσης του A320 με A310

Παράδειγμα 2.2.

Ως δεύτερο παράδειγμα ας εξετάσουμε την προσομοίωση και εξομοίωση ενός μικροεπεξεργαστή Intel Core i7. Η προσομοίωση αυτού του μικροεπεξεργαστή μπορεί να γίνει σε οποιονδήποτε υπολογιστή γενικής χρήσης ή σε εξειδικευμένους υπολογιστές για προσομοίωση ψηφιακής λογικής. Επειδή η σχεδίαση ενός μικροεπεξεργαστή είναι πολύ περίπλοκη και η κατασκευή του πρωτοτύπου υπερβολικά δαπανηρή, χρησιμοποιείται η προσομοίωση για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του συστήματος. Ο χρόνος προσομοίωσης εξαρτάται πολύ από το επίπεδο λεπτομέρειας που περιλαμβάνεται στο μοντέλο. Το ανώτερο επίπεδο, είναι το λειτουργικό επίπεδο, το οποίο προσομοιώνει μόνο τη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λογικής της σχεδίασης.

Το χαμηλότερο επίπεδο προσομοίωσης είναι το επίπεδο τρανζίστορ στο οποίο προσομοιώνονται όλα τα δομικά στοιχεία (τρανζίστορς) του μικροεπεξεργαστή. Υπάρχει και ακόμη χαμηλότερο επίπεδο, αυτό του πυριτίου, αλλά ποτέ δεν χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ολόκληρου του μικροεπεξεργαστή επειδή αν λειτουργεί σωστά μία ομάδα τρανζίστορς στο επίπεδο πυριτίου, τότε λειτουργούν όλα σωστά. Στο επίπεδο του τρανζίστορ, η πολυπλοκότητα είναι τόσο μεγάλη που η σχέση ταχύτητας εκτέλεσης προσομοιώνοντος/

προσομοιωνόμενου υπολογιστή μπορεί να φθάσει το 1.000.000. Δηλαδή, εκτελούνται 1.000.000 εντολές στον υπολογιστή που υλοποιεί την προσομοίωση για να προσομοιωθεί μία εντολή του Core i7. Γίνεται αντιληπτό ότι ποτέ δεν θα χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση για την εκτέλεση προγραμμάτων του Core i7 στον υπολογιστή που τον προσομοιώνει.

Η εξομοίωση του Core i7 μπορεί να γίνει σε έναν υπολογιστή που χρησιμοποιεί άλλο μικροεπεξεργαστή, όπως ο SGI Altix. Σκοπός της εξομοίωσης είναι η δυνατότητα εκτέλεσης προγραμμάτων Core i7 σε υπολογιστή SGI Altix ο οποίος χρησιμοποιεί διαφορετικό μικροεπεξεργαστή. Η εξομοίωση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Ο απλούστερος είναι η ανάπτυξη λογισμικού εξομοίωσης, το οποίο αναλύει ένα πρόγραμμα γραμμένο σε κώδικα του Core i7 και μεταφράζει τις εντολές του σε κώδικα του μικροεπεξεργαστή Itanium 2 του SGI Altix, ώστε να μπορούν πλέον να εκτελεστούν από αυτόν. Με διάφορες τεχνικές συμπίεσης του κώδικα είναι δυνατό να επιτευχθεί λόγος εκτέλεσης 1:4, δηλαδή να απαιτείται η εκτέλεση τεσσάρων εντολών του Itanium 2 για την εκτέλεση μίας εντολής του Core i7.

Ο δεύτερος τρόπος εξομοίωσης ενός υπολογιστή που χρησιμοποιεί τον Core i7 με έναν SGI Altix είναι η κατασκευή μίας πλακέτας επέκτασης του υπολογιστή SGI Altix. η οποία να περιλαμβάνει έναν μικροεπεξεργαστή Core i7 και όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για τη λειτουργία του. Με τον τρόπο αυτό, προγράμματα γραμμένα για τον Core i7 μπορούν να εκτελεστούν απευθείας από τον μικροεπεξεργαστή της πλακέτας και μόνον οι λειτουργίες εισόδου/εξόδου, διαχείρισης πληκτρολογίου, οθόνης, ποντικιού, κλπ, να εκτελούνται από τον επεξεργαστή του SGI Altix.

Είναι προφανές ότι και με τις δύο μεθόδους εξομοίωσης ο πραγματικός σκοπός είναι η εκτέλεση προγραμμάτων του εξομοιωνόμενου μικροεπεξεργαστή στον υπολογιστή που περιέχει την εξομοίωση.

2.3. Η έννοια του Συστήματος

Στα προηγούμενα παραδείγματα αναφέρθηκε συχνά η έννοια του συστήματος και του μοντέλου. Επειδή η προσομοίωση χρησιμοποιείται για τη μελέτη συστημάτων μέσω των μοντέλων τους, είναι απαραίτητο να ορισθεί επακριβώς το σύστημα και τα

συστατικά του στοιχεία. Επίσης, είναι απαραίτητη η εξέταση των ιδιοτήτων ή χαρακτηριστικών των συστημάτων, τουλάχιστον εκείνων αυτών των ιδιοτήτων που αφορούν τη μελέτη τους (Gordon 1989, McDougal 1975). Συχνά, ένα σύστημα επηρεάζεται από αλλαγές οι οποίες λαμβάνουν χώρα έξω από αυτό. Αυτές οι αλλαγές ορίζουν το περιβάλλον του συστήματος. Όμως το περιβάλλον του συστήματος διαμορφώνεται από τις δραστηριότητες του. Επομένως, είναι χρήσιμο να μελετήσουμε τις διάφορες μορφές δραστηριοτήτων που μπορούν να λάβουν χώρα σε ένα σύστημα. Η μεταβολή της κατάστασης των συστημάτων και η σχέση τους με το περιβάλλον αποτελούν κριτήριο για την κατηγοριοποίησή τους.

2.3.1. Ορισμός του συστήματος

Εχει δοθεί ένα μεγάλο πλήθος ορισμών της έννοιας του συστήματος. Ένας τυπικός ορισμός της έννοιας του συστήματος, είναι ο ακόλουθος:

Ορισμός 2.3.

Σύστημα είναι ένα σύνολο αλληλεπιδρώντων στοιχείων τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους ή λειτουργούν συλλογικά για την επίτευξη κάποιου σκοπού.

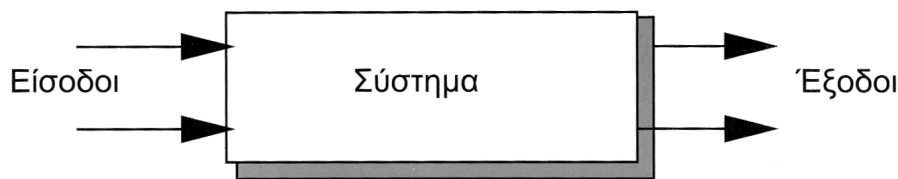
Για να γίνει πιο κατανοητός ο παραπάνω ορισμός, θεωρείστε το παράδειγμα ενός απλού υπολογιστή. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει κάποιο απλό, αυτόνομο τμήμα το οποίο να ονομάζεται 'υπολογιστής'. Αντίθετα, ο υπολογιστής είναι ένα σύστημα αποτελούμενο από στοιχεία τα οποία λειτουργούν συλλογικά. Τα στοιχεία αυτά είναι ο επεξεργαστής, η κύρια μνήμη, οι μονάδες εισόδου και εξόδου και η μονάδα ελέγχου.

Για πρακτικούς σκοπούς, κάθε σύστημα θεωρείται ως υποδιαίρεση της πραγματικότητας. Ένα σύστημα αποτελεί μία γενίκευση της πραγματικότητας. Για το λόγο αυτό, οτιδήποτε μπορεί να θεωρηθεί ως σύστημα. Ωστόσο, για όλα τα συστήματα ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Όλα τα συστήματα έχουν μία δομή, η οποία καθορίζεται από τα στοιχεία τους και τον μεταξύ τους τρόπο διασύνδεσης.
2. Κάθε σύστημα μπορεί να θεωρηθεί στοιχείο ενός άλλου, μεγαλύτερου συστήματος. Για παράδειγμα, το σύστημα της αριθμητικής και λογικής μονάδας είναι στοιχείο του συστήματος του επεξεργαστή, ο οποίος είναι στοιχείο του συστήματος του υπολογιστή. Με τη σειρά του, το σύστημα ενός

υπολογιστή μπορεί να αποτελεί στοιχείο ενός μεγαλύτερου συστήματος (π.χ. ενός δικτύου υπολογιστών), κ.ο.κ. Αυτό σημαίνει, ότι κάθε σύστημα υποδιαιρείται σε μικρότερα συστήματα.

3. Όλα τα συστήματα δέχονται εξωτερικές επιδράσεις. Επειδή όλα τα στοιχεία ενός συστήματος αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, δεν υπάρχει σύστημα απομονωμένο από επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος.
4. Μεταξύ των στοιχείων ενός συστήματος υπάρχουν λειτουργικές σχέσεις. Οι σχέσεις αυτές μπορούν να περιγραφούν με τη βοήθεια μαθηματικών, λογικών ή συμβολικών εκφράσεων.



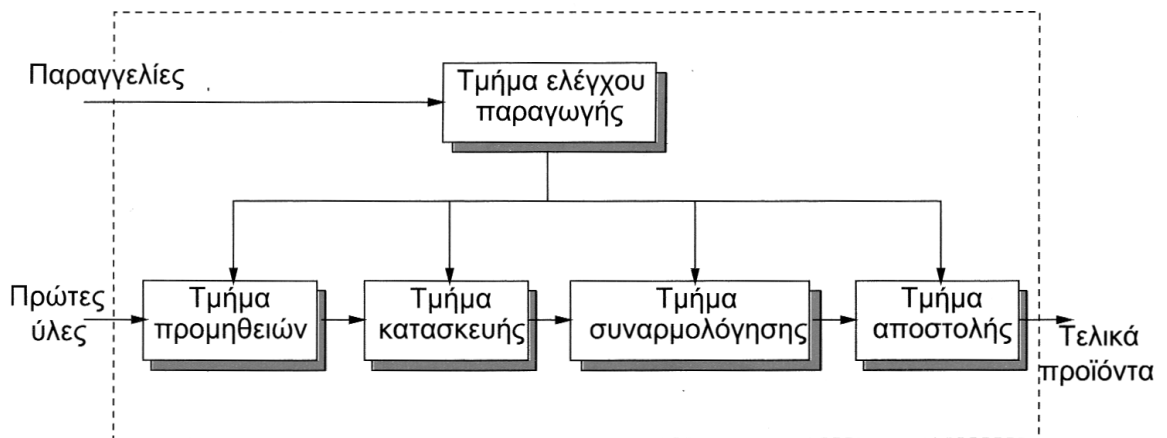
Σχήμα 2.3. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος

Η μελέτη συστημάτων αφορά τόσο την ανάλυσή τους, όταν πρόκειται για υπάρχοντα συστήματα, όσο και τη σύνθεσή τους όταν πρόκειται για συστήματα που βρίσκονται στο στάδιο της σχεδίασης. Η ανάλυση ορίζεται ως ο καθορισμός της εξόδου του συστήματος όταν δοθεί η είσοδος στο σύστημα. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται επομένως όταν είναι γνωστά τα στοιχεία του συστήματος και επιδιώκεται να διαπιστωθεί η λειτουργία του και να καθορισθεί η αξιοπιστία του, η ευαισθησία του, κλπ. Η σύνθεση ορίζεται ως ο καθορισμός των στοιχείων του συστήματος όταν δοθούν οι είσοδοι και οι έξοδοι που αντιστοιχούν σ' αυτές τις εισόδους. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται όταν σχεδιάζεται ένα σύστημα.

Στο παράδειγμα 2.3. δίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος παραγωγικής μονάδας το οποίο αποτελείται από ένα μπλοκ με εισόδους και εξόδους.

Παράδειγμα 2.3.

Μια παραγωγική μονάδα αποτελεί ένα σύστημα με πολλές οντότητες. Στο Σχήμα 2.4. εμφανίζονται μόνο ορισμένες από αυτές και οι αλληλεπιδράσεις τους. Με διακεκομμένη γραμμή ορίζονται τα όρια του συστήματος. Οι "Παραγγελίες" και οι "Πρώτες ύλες" αποτελούν τις εισόδους του συστήματος. Τα "Τελικά προϊόντα" αποτελούν τις εξόδους του συστήματος.



Σχήμα 2.4. Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος του παραδείγματος 2.3.

2.3.2. Στοιχεία ενός συστήματος

Προκειμένου να γίνει κατανοητό ένα σύστημα, πρέπει να δοθεί ένα πλήθος ορισμών. Ένα σύστημα αποτελείται από οντότητες, χαρακτηριστικά, και δραστηριότητες.

Με τον όρο οντότητα υποδηλώνεται κάθε αντικείμενο του συστήματος που ενδιαφέρει το μελετητή. Ανάλογα με την περίπτωση και τους σκοπούς της μελέτης, ακόμη και το ίδιο το σύστημα αποτελεί μία οντότητα.

Οι ιδιότητες των οντοτήτων ονομάζονται χαρακτηριστικά. Χαρακτηριστικά έχει και το ίδιο το σύστημα επειδή και αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί οντότητα.

Δραστηριότητα ονομάζεται οποιαδήποτε διεργασία προκαλεί αλλαγές στο σύστημα.

Στον Πίνακα 2.1. δίνονται διάφορα συστήματα, ορισμένες από τις οντότητες των συστημάτων, μερικά χαρακτηριστικά των οντοτήτων και τέλος, δραστηριότητες, που προκαλούν αλλαγές στο σύστημα.

Σύστημα	Οντότητες	Χαρακτηριστικά	Δραστηριότητες
Τράπεζα	Πελάτες	Υπόλοιπο	Κατάθεση
		Πίστωση	Ανάληψη
Παντοπωλείο	Πελάτες	Κατάλογος ψώνιων	Πληρωμή
Δίκτυο υπολογιστών	Πακέτα	Μέγεθος	Μετάδοση
Βενζινάδικο	Αυτοκίνητα	Τύπος βενζίνης	Πληρωμή
Ανελκυστήρας	Επιβάτες	Όροφος εισόδου	Είσοδος στον
		Όροφος εξόδου	ανελκυστήρα
Αποθήκη	Ανταλλακτικά	Κόστος	Προμήθεια
		Είδος	Πώληση
Πανεπιστήμιο	Φοιτητές	Έτος σπουδών	Εξετάσεις
		Βαθμολογία	

Πίνακας 2.1. Συστήματα και χαρακτηριστικά τους

Ένα πολύ σημαντικό δυναμικό στοιχείο που χαρακτηρίζει ένα σύστημα είναι η κατάσταση του συστήματος, που ορίζεται ως η συνολική περιγραφή των οντοτήτων, των χαρακτηριστικών τους και των δραστηριοτήτων, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Όπως θα γίνει αντιληπτό παρακάτω, η προσομοίωση ασχολείται ακριβώς με την παρακολούθηση της κατάστασης ενός συστήματος, όπως αυτή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Η κατάσταση ενός συστήματος όμως, μπορεί να εξαρτάται από δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα αλλά και από δραστηριότητες εκτός του συστήματος. Για το λόγο αυτό ορίζουμε ως περιβάλλον του συστήματος το σύνολο των μεταβολών που συμβαίνουν εκτός του συστήματος. Έτσι, το μοντέλο που θα δημιουργηθεί για το σύστημα είναι ενσωματωμένο στον περιβάλλοντα χώρο, ο οποίος είτε επηρεάζει είτε δεν επηρεάζει τις λειτουργίες του μοντέλου και κατ' επέκταση του συστήματος. Τα όρια του συστήματος διαχωρίζουν τις οντότητες που βρίσκονται μέσα στο σύστημα, από αυτές που βρίσκονται εκτός του συστήματος και αποτελούν το περιβάλλον του. Όπως είδαμε πιο πάνω, οι αλλαγές της κατάστασης του συστήματος προκαλούνται από δραστηριότητες. Ανάλογα με το χώρο όπου λαμβάνουν χώρα οι δραστηριότητες, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: ενδογενείς και εξωγενείς.

Ενδογενείς δραστηριότητες είναι αυτές οι οποίες λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα ή παράγονται μέσα στο σύστημα ή είναι αποτέλεσμα εσωτερικών αιτίων. Στον Πίνακα 2.1., παρατηρούμε ότι η "μετάδοση" ενός πακέτου στο σύστημα του "δικτύου

υπολογιστών" είναι ενδογενής δραστηριότητα, η οποία μεταφέρει ένα πακέτο από τον ένα υπολογιστή του συστήματος σε ένα άλλο.

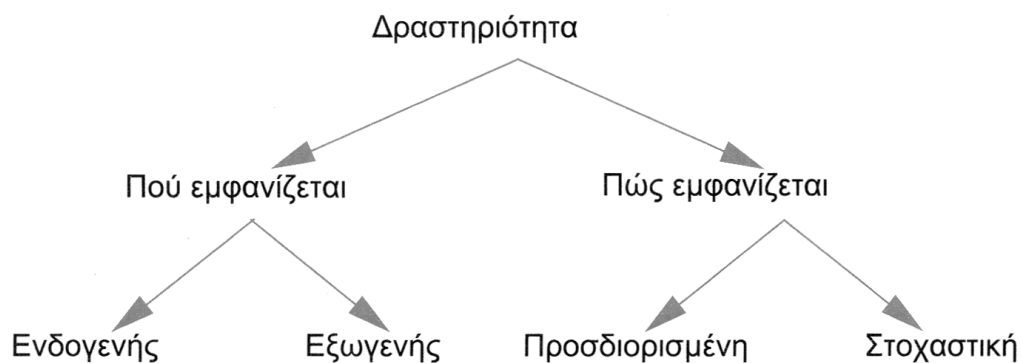
Εξωγενείς δραστηριότητες είναι αυτές οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον του συστήματος αλλά επηρεάζουν το σύστημα. Στον Πίνακα 2.1., παρατηρούμε ότι η "προμήθεια" ενός ανταλλακτικού στο σύστημα της "αποθήκης" είναι εξωγενής δραστηριότητα, γιατί το ανταλλακτικό προέρχεται από το περιβάλλον του συστήματος και εισέρχεται σ' αυτό.

Οι δραστηριότητες χωρίζονται επίσης σε αιτιοκρατικές και στοχαστικές, ανάλογα με τον τρόπο ορισμού των αποτελεσμάτων τους.

Σε μια αιτιοκρατική δραστηριότητα, τα αποτελέσματα μπορούν να περιγραφούν πλήρως από τις εισόδους. Δηλαδή, για κάθε σύνολο εισόδων, η έξοδος της δραστηριότητας είναι συγκεκριμένη και προσδιορισμένη. Στον Πίνακα 2.1., παρατηρούμε ότι η "μετάδοση" ενός πακέτου στο σύστημα του "δικτύου υπολογιστών" είναι αιτιοκρατική δραστηριότητα, γιατί η διάρκειά της εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος του μεταδιδόμενου πακέτου και την ταχύτητα της γραμμής μετάδοσης.

Σε μια στοχαστική δραστηριότητα τα αποτελέσματα δεν μπορούν να προσδιορισθούν πλήρως από τις εισόδους, αλλά μεταβάλλονται τυχαία μέσα σε ένα σύνολο δυνατών αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι για ένα δεδομένο σύνολο εισόδων υπάρχουν πολλαπλά σύνολα εξόδων, και αυτό που θα συμβεί κάθε φορά είναι αποτέλεσμα τυχαίων παραγόντων. Οι περισσότερες από τις δραστηριότητες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. είναι στοχαστικές δραστηριότητες. Για παράδειγμα, η δραστηριότητα "κατάθεση" στο σύστημα της "τράπεζας" είναι στοχαστική δραστηριότητα, γιατί ο χρόνος κατάθεσης εξαρτάται από τυχαίους παράγοντες.

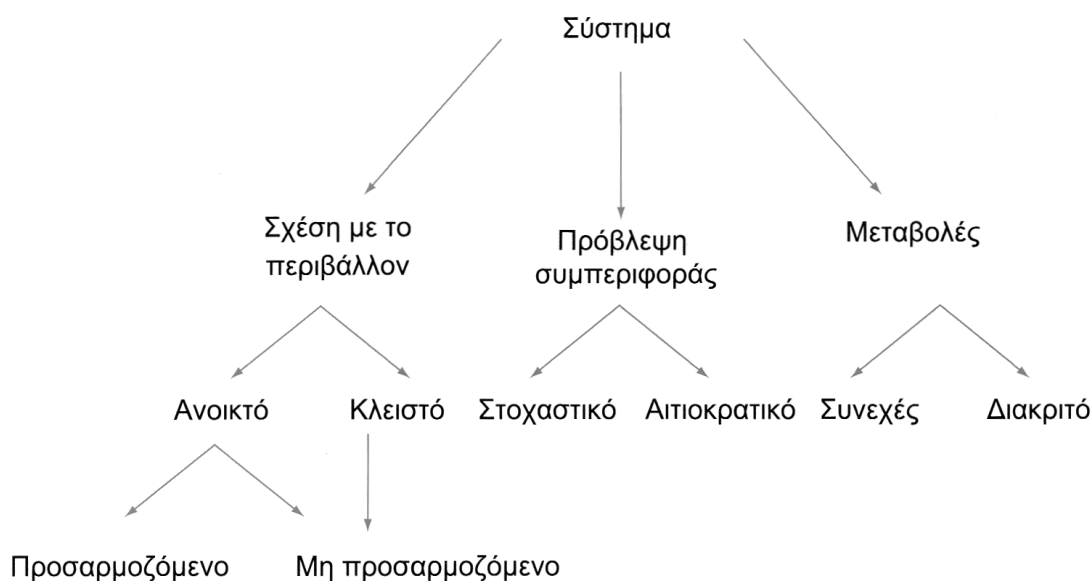
Στο Σχήμα 2.5. φαίνονται διαγραμματικά οι κατηγορίες των δραστηριοτήτων.



Σχήμα 2.5. Κατηγορίες δραστηριοτήτων

2.3.3. Κατηγορίες συστημάτων

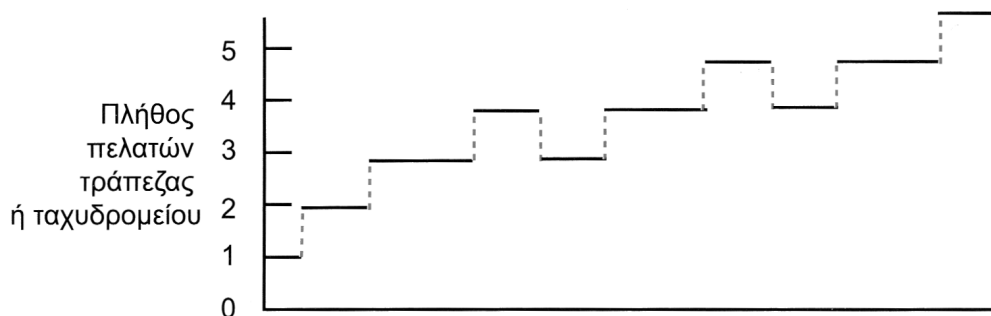
Τα συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τις μεταβολές της κατάστασής τους, τη σχέση τους με το περιβάλλον, και τον βαθμό στον οποίο είναι δυνατόν να προβλεφθεί η συμπεριφορά τους (Σχήμα 2.6.).



Σχήμα 2.6. Ταξινόμηση συστημάτων

Στα συνεχή συστήματα οι μεταβολές της κατάστασης είναι κατά κύριο λόγο ομαλές. Οι δραστηριότητες, δηλαδή, μεταβάλλουν συνεχώς την κατάσταση του συστήματος και όχι μόνον όταν τελειώσουν (Lackner 1962, Pidd 1992). Παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι ένα αυτοκίνητο, στο οποίο τα χαρακτηριστικά κατεύθυνση, ταχύτητα, και θέση του αυτοκινήτου λαμβάνουν συνεχείς τιμές. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί το ηλιακό σύστημα, όπου οι πλανήτες και τα άλλα σώματα κινούνται συνεχώς.

Στα διακριτά συστήματα οι μεταβολές είναι κυρίως ασυνεχείς, πράγμα που σημαίνει, ότι η κατάσταση του συστήματος αλλάζει μόλις τελειώσει μία δραστηριότητα. Παράδειγμα διακριτού συστήματος είναι η τράπεζα ή το ταχυδρομείο, όπου η κατάσταση περιγράφεται από το πλήθος των πελατών. Η τιμή της μεταβλητής, η οποία περιγράφει την κατάσταση, αλλάζει μόνον όταν ολοκληρωθεί η εξυπηρέτηση ενός πελάτη ή όταν εισέλθει ένας νέος πελάτης. Το Σχήμα 2.7. δείχνει αυτήν τη μεταβολή σε διακριτά χρονικά διαστήματα.



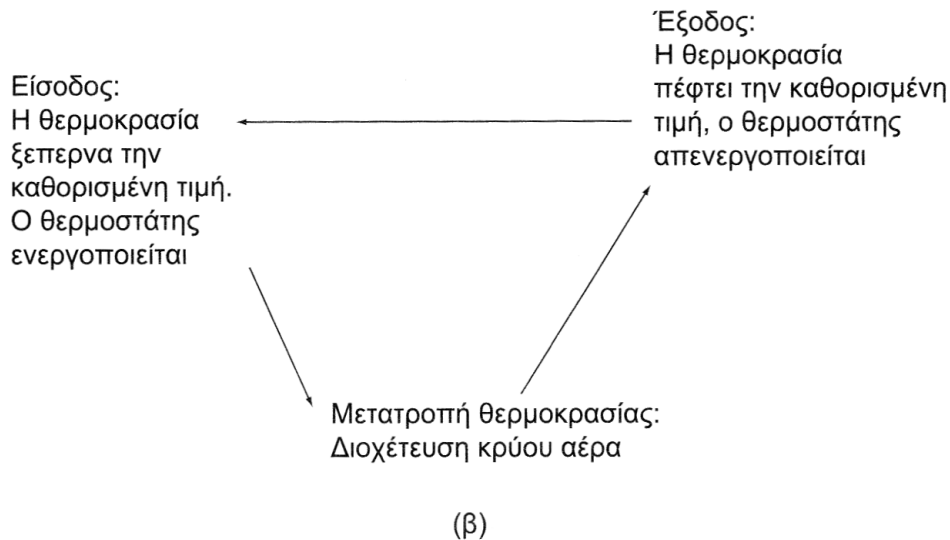
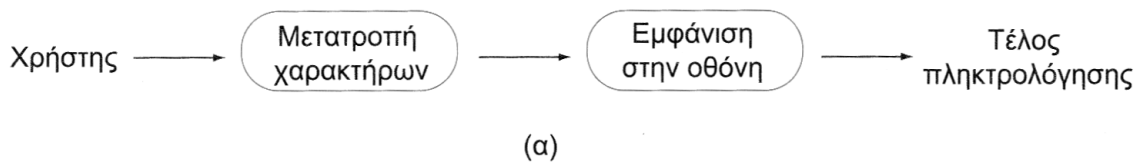
Σχήμα 2.7. Αλλαγή μίας μεταβλητής η οποία περιγράφει την κατάσταση ενός συστήματος σε διακριτά χρονικά διαστήματα

Στην πραγματικότητα όλα τα συστήματα είναι συνεχή στη φύση. Κατά τη μελέτη των συστημάτων όμως, πολλές φορές έχουν ενδιαφέρον οντότητες και χαρακτηριστικά που εμφανίζουν ασυνεχείς μεταβολές. Στο παράδειγμα της τράπεζας, ο χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην ουρά είναι μια συνεχώς μεταβαλλόμενη ποσότητα, η οποία όμως δεν μας ενδιαφέρει κατά τη μελέτη του συστήματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνολικός χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην ουρά. Το χαρακτηριστικό αυτό αποκτά τιμή μόνον όταν ο πελάτης βγει από την ουρά και αρχίσει να εξυπηρετείται. Επομένως, η κατάσταση του συστήματος μεταβάλλεται μόνον σε διακριτές χρονικές στιγμές, μία από τις οποίες είναι η έναρξη εξυπηρέτησης ενός πελάτη.

Ένα σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση τη σχέση ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδό του. Ένα σύστημα ονομάζεται αιτιοκρατικό αν η συμπεριφορά του μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα. Τα ψηφιακά συστήματα αποτελούν παράδειγμα αιτιοκρατικών συστημάτων. Ένα σύστημα είναι στοχαστικό όταν ένα ή περισσότερα από τα τμήματά του εμπεριέχει ένα στοιχείο τυχαιότητας. Σε αντίθεση με το

αιτιοκρατικό σύστημα, ένα στοχαστικό σύστημα δεν δίνει πάντοτε την ίδια έξοδο δοθείσης μίας δεδομένης εισόδου. Ένα παράδειγμα στοχαστικού συστήματος είναι η ρουλέτα. Στην πραγματικότητα, πολλά συστήματα διαθέτουν το στοιχείο της τυχαιότητας. Ο λόγος είναι ότι δεν είμαστε πάντοτε σε θέση να γνωρίζουμε ακριβώς όλες τις λεπτομέρειες του συστήματος. Ας δούμε το παράδειγμα της τράπεζας. Προσπαθώντας να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο, θα διαπιστώσουμε ότι δεν έχει κανένα νόημα να προσπαθήσουμε να γνωρίζουμε την ακριβή ώρα άφιξης κάθε πελάτη στο σύστημα, δεδομένου ότι αυτό προϋποθέτει να λάβουμε υπόψη παράγοντες όπως ο ακριβής χρόνος που θα ξεκινήσει, ο τρόπος μετακίνησής του, η κίνηση την οποία θα συναντήσει, κ.ο.κ. Πράγματι, αν είχαμε τη δυνατότητα να γνωρίζουμε αυτές τις παραμέτρους, τότε πιθανόν η έξοδος του συστήματος να ήταν μοναδική. Επειδή όμως κάτι τέτοιο, ακόμη και αν ήταν εφικτό, είναι εξαιρετικά χρονοβόρο και πολλές φορές ιδιαίτερα δαπανηρό, προτιμούμε να εισάγουμε στοιχεία τυχαιότητας όταν κατασκευάζουμε τα μοντέλα των συστημάτων. Έτσι, μία γεννήτρια παραγωγής τυχαίων αριθμών είναι αυτή η οποία προσδιορίζει τους χρόνους άφιξης των πελατών στην τράπεζα.

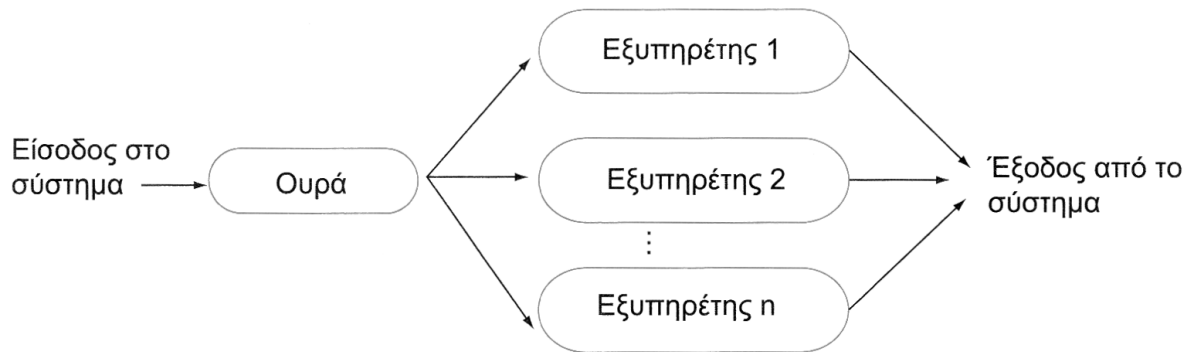
Όσον αφορά τη σχέση του συστήματος με το περιβάλλον, τα συστήματα διακρίνονται σε ανοικτά ή κλειστά. Ένα σύστημα ονομάζεται ανοικτό αν έχει εξωγενείς δραστηριότητες, ενώ αν δεν έχει εξωγενείς δραστηριότητες ονομάζεται κλειστό. Παράδειγμα ανοικτού συστήματος αποτελεί ένας επεξεργαστής κειμένου. Ένας χρήστης εισάγει κείμενο μέσω του πληκτρολογίου και ο επεξεργαστής κειμένου μέσω κάποιων εσωτερικών διαδικασιών μετατρέπει αυτές τις πληροφορίες και τις εμφανίζει στην οθόνη. Αν ο χρήστης σταματά να πληκτρολογεί, τότε δεν εμφανίζονται νέοι χαρακτήρες στην οθόνη (Σχήμα 2.8.α). Παράδειγμα κλειστού συστήματος είναι ο θερμοστάτης κλιματιστικού. Ο θερμοστάτης αυτορυθμίζεται χωρίς να παρεμβαίνει ο ανθρώπινος παράγοντας. Αρχικά, ο άνθρωπος ορίζει τη θερμοκρασία του θερμοστάτη. Αν η θερμοκρασία ξεπεράσει την τιμή αυτή, ο θερμοστάτης ενεργοποιείται και, διοχετεύοντας κρύο αέρα στο ελεγχόμενο περιβάλλον, μειώνει τη θερμοκρασία στην αρχικά καθορισμένη τιμή. Έπειτα ο θερμοστάτης απενεργοποιείται (Σχήμα 2.8.β).



Σχήμα 2.8. Παραδείγματα ανοικτών και κλειστών συστημάτων

Ένα ανοικτό σύστημα, αν και μπορεί να έχει εξωγενείς δραστηριότητες, υπάρχει περίπτωση να μην αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Έτσι, αν ένα σύστημα αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος ονομάζεται προσαρμοζόμενο, ενώ αντίθετα αν δεν αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος ονομάζεται μη προσαρμοζόμενο. Για να γίνουν πιο κατανοητοί οι παραπάνω ορισμοί, θεωρήστε το Σχήμα 2.9. Αν θεωρήσουμε ότι το Σχήμα 2.9. αναπαριστά την εξυπηρέτηση ενός πλήθους πελατών μίας τράπεζας, οι οποίοι δημιουργούν μία ουρά αναμονής μπροστά από τους εξυπηρέτες (ταμίες), τότε το σύστημα αυτό είναι μη προσαρμοζόμενο. Δηλαδή δεν θα αντιδράσει στο σύνολο των μεταβολών που συμβαίνουν εκτός του συστήματος (π.χ. πελάτες οι οποίοι εισέρχονται για να εξυπηρετηθούν σε άλλα τμήματα της τράπεζας). Έτσι, κάθε πελάτης περιμένει τη σειρά του και εξυπηρετείται αμέσως μόλις ελευθερωθεί ένα ταμείο. Για ένα άλλο παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι το Σχήμα 2.9. αναπαριστά τη δρομολόγηση ενός πλήθους πακέτων δικτύου, τα οποία δημιουργούν μία ουρά αναμονής μπροστά από τους εξυπηρέτες (δρομολογητές). Τα πακέτα αυτά οδηγούνται στους διάφορους εξυπηρέτες από όπου θα γίνει η μεταφορά τους προς τον προορισμό τους. Η διαδρομή, όμως, εντός του δικτύου, την οποία θα επιλέξει κάθε εξυπηρέτης για τα πακέτα του, εξαρτάται από την κυκλοφορία που υπάρχει

συνολικά στο δίκτυο. Έτσι, τα πακέτα του ίδιου μηνύματος μπορεί να μεταφερθούν στον τελικό προορισμό από διαφορετικές διαδρομές. Επειδή η συνολική κατάσταση του δικτύου επηρεάζει τις αποφάσεις δρομολόγησης, το σύστημα είναι προσαρμοζόμενο, δηλαδή αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.9. Παραδείγματα προσαρμοσμένων και μη προσαρμοσμένων συστημάτων

2.4. Μοντέλα Συστημάτων

Η μελέτη των συστημάτων είτε με μαθηματικές μεθόδους είτε με προσομοίωση δεν γίνεται με αυτό καθαυτό το σύστημα, αλλά με ένα μοντέλο του συστήματος. Παρακάτω, παραθέτουμε ορισμένους από τους λόγους κατασκευής ενός μοντέλου και στη συνέχεια παρουσιάζουμε τους βασικούς τύπους μοντέλων.

2.4.1. Λόγοι κατασκευής ενός μοντέλου

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την κατασκευή ενός μοντέλου:

1. Διευκόλυνση στην κατανόηση. Το μοντέλο είναι συχνά πολύ πιο απλό στην κατανόηση από το ίδιο το σύστημα, γιατί κατά την κατασκευή του μοντέλου διατηρούνται μόνο τα χαρακτηριστικά του συστήματος που ενδιαφέρουν στη συγκεκριμένη μελέτη. Με τον τρόπο αυτό ο μελετητής δεν χάνεται στις λεπτομέρειες του συστήματος, αλλά επικεντρώνεται μόνο στα σημαντικά στοιχεία.
2. Διευκόλυνση στην επικοινωνία. Με την κατασκευή ενός μοντέλου είναι πολύ πιο εύκολο να μεταδοθούν οι ιδέες για κάποιο σύστημα, απ' ό,τι με την περιγραφή του συστήματος. Για παράδειγμα, ένας αρχιτέκτονας κατασκευάζει μια μακέτα του κτιρίου που έχει σχεδιάσει και μ' αυτήν δίνει πολύ περισσότερες πληροφορίες στον πελάτη απ' ό,τι με λεκτική περιγραφή ή αρχιτεκτονικά σχέδια.

3. Το μοντέλο αποτελεί εργαλείο πρόβλεψης. Ορισμένα συστήματα παρουσιάζουν πολύ αργές μεταβολές της κατάστασής τους, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για ένα μακρύ χρονικό διάστημα. Κατασκευάζοντας ένα μοντέλο του συστήματος πετυχαίνουμε επιτάχυνση των χρονικών μεταβολών, ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε τη μελλοντική συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος.
4. Αδυναμία πρόσβασης. Μερικές φορές η πρόσβαση στο πραγματικό σύστημα είναι αδύνατη ή επικίνδυνη. Κατασκευάζοντας ένα μοντέλο, είναι δυνατόν να μελετήσουμε το σύστημα, χωρίς να κινδυνεύσει ο μελετητής ή το ίδιο το σύστημα.
5. Εκπαίδευση. Με την κατασκευή ενός μοντέλου είναι δυνατόν να εκπαιδευτούν χειριστές χωρίς τον κίνδυνο καταστροφών από λάθος των εκπαιδευομένων. Είναι επίσης δυνατόν να εκπαιδευτούν οι χειριστές ενός συστήματος, το οποίο δεν έχει κατασκευασθεί ακόμη.
6. Σχεδιασμός. Η κατασκευή ενός μοντέλου συμβάλλει πολύ στο σχεδιασμό ενός συστήματος, γιατί επιτρέπει τον εντοπισμό σχεδιαστικών σφαλμάτων και τη διόρθωσή τους πριν το σύστημα κατασκευασθεί.
7. Ανεύρεση εναλλακτικών λύσεων και βελτιστοποίηση. Ο λόγος αυτός, είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο. Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος είναι δυνατόν να κατασκευασθούν πολλά διαφορετικά μοντέλα και να επιλεγθεί το κατάλληλο προς υλοποίηση, με βάση κάποια συγκεκριμένα κριτήρια βελτιστοποίησης.
8. Βελτίωση της απόδοσης υπάρχοντος συστήματος. Με την κατασκευή ενός μοντέλου είναι δυνατό να ελεγχθεί η συμπεριφορά του συστήματος για διάφορες τιμές των παραμέτρων του. Από τη μελέτη του μοντέλου που έχει κατασκευασθεί, διαπιστώνεται ο αποδοτικότερος συνδυασμός παραμέτρων. Στη συνέχεια, οι παράμετροι αυτοί εφαρμόζονται στο πραγματικό σύστημα.

2.4.2. Τύποι μοντέλων

Με τις περιγραφές που έχουν δοθεί μέχρι τώρα είναι πλέον κατανοητή η έννοια του μοντέλου. Ωστόσο, πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των τύπων μοντέλων, θα δώσουμε έναν τυπικό ορισμό και ένα παράδειγμα μοντελοποίησης.

Ορισμός 2.4.

Μοντέλο είναι μία αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος ή οργανισμού ή φυσικού φαινομένου ή ακόμη και μίας ιδέας. Ως δεύτερος ορισμός: Μοντέλο είναι το σύνολο των πληροφοριών ενός συστήματος, που έχει συγκεντρωθεί με σκοπό τη μελέτη του συστήματος.

Το μοντέλο ενός συστήματος θα πρέπει να αντιπροσωπεύει το σύστημα όσο πιο πιστά γίνεται, ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από τη μελέτη του μοντέλου να αντιστοιχούν σε συμπεράσματα για το σύστημα.

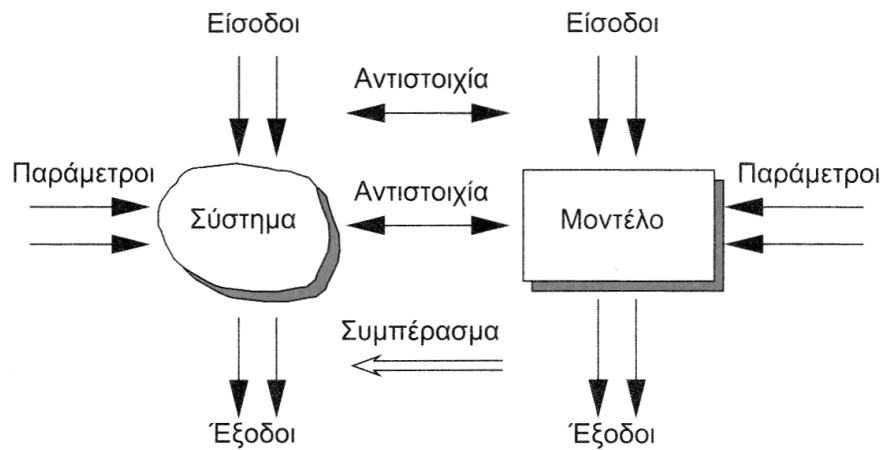
Σε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις εισόδους του συστήματος και του μοντέλου. Υπάρχει επίσης αντιστοιχία ανάμεσα στις εσωτερικές δομές του μοντέλου και του συστήματος. Η μελέτη κατόπιν συνάγει τις εξόδους του συστήματος από τις εξόδους του μοντέλου. Αυτό φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.10.α.

Σε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για τη σύνθεση του συστήματος, υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις εισόδους του συστήματος και του μοντέλου. Υπάρχει επίσης αντιστοιχία ανάμεσα στις εξόδους του μοντέλου και τις εξόδους του συστήματος. Η μελέτη κατόπιν συνάγει την εσωτερική δομή του συστήματος, δηλαδή τα συστατικά του στοιχεία από τη δομή του μοντέλου. Αυτό φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.10.β.

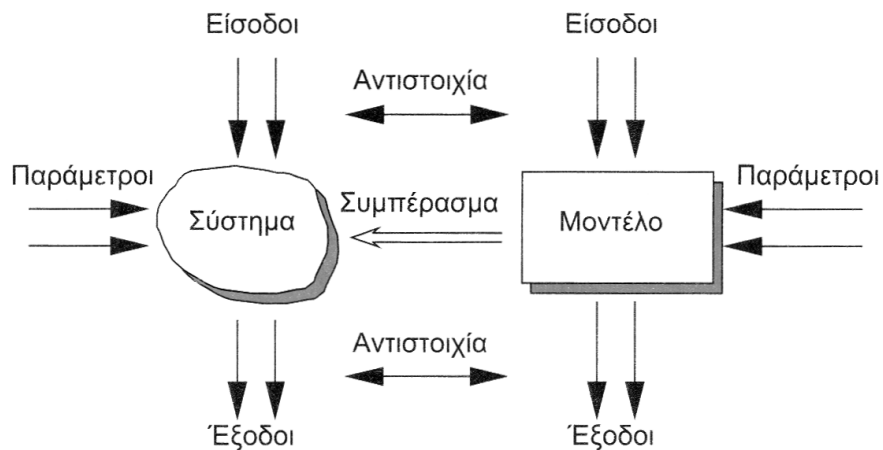
Οι παράμετροι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά ή τις ιδιότητες του μοντέλου και του συστήματος ταυτόχρονα. Επομένως, θα πρέπει να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία των παραμέτρων που είναι απαραίτητες για τη μελέτη του συστήματος.

Παράδειγμα 2.4. Μοντελοποίηση συστήματος συνεργείου αυτοκινήτων.

Σε ένα συνεργείο οι πελάτες έρχονται και παραδίδουν τα αυτοκίνητά τους για επισκευή. Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα ανταλλακτικά ο μηχανικός τα παραγγέλλει και μετά την παραλαβή τους, τα τοποθετεί στο αυτοκίνητο. Τέλος, ο πελάτης επιστρέφει στο συνεργείο, πληρώνει και φεύγει με το αυτοκίνητο. Τα στοιχεία του μοντέλου για το σύστημα αυτό δίνονται στον Πίνακα 2.2.



α) Ανάλυση Συστήματος



β) Σύνθεση Συστήματος

Σχήμα 2.10. Αντιστοιχία μοντέλου - συστήματος

Οντότητα	Χαρακτηριστικό	Δραστηριότητα
Πελάτης	Αριθμός αυτοκινήτου	Προσέλευση, Πληρωμή, Αποχώρηση
Αυτοκίνητο	Αριθμός αυτοκινήτου, Ζημία	Τοποθέτηση ανταλλακτικού
Ανταλλακτικό	Διαθεσιμότητα	Παραγγελία, Παραλαβή, Τοποθέτηση

Πίνακας 2.2. Οντότητες, χαρακτηριστικά και δραστηριότητες του συνεργείου

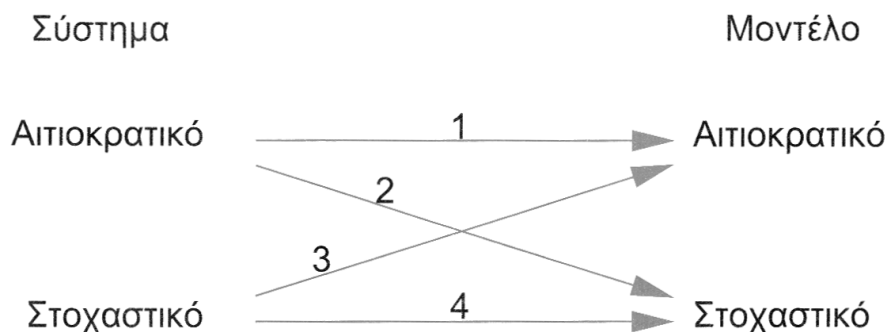
Γίνεται φανερό ότι οι δραστηριότητες δεν σχετίζονται αποκλειστικά με μια οντότητα, αλλά συνήθως με περισσότερες από μία. Για παράδειγμα, η δραστηριότητα "Τοποθέτηση ανταλλακτικού" σχετίζεται με τρεις οντότητες: το "Αυτοκίνητο" τον "Μηχανικό" και το "Ανταλλακτικό". Αντίστοιχα, η

δραστηριότητα "Προσέλευση" και "Αποχώρηση" σχετίζονται και με τον πελάτη και με το αυτοκίνητο του.

Επιπλέον, μία οντότητα πιθανόν να αντιστοιχεί ή να σχετίζεται άμεσα με κάποια άλλη οντότητα, όπως στο παράδειγμα αυτό το "Αυτοκίνητο" με τον "Πελάτη". Ο συσχετισμός αυτός γίνεται στο μοντέλο με την ιδιότητα "Αριθμός αυτοκινήτου" που είναι κοινή για το αυτοκίνητο και τον πελάτη.

Συστήματα των οποίων οι δραστηριότητες είναι κυρίως αιτιοκρατικές, δηλαδή μη εξαρτώμενες από τυχαίους παράγοντες, ονομάζονται αιτιοκρατικά. Αντίστοιχα, στοχαστικά ονομάζονται τα συστήματα των οποίων οι δραστηριότητες είναι κυρίως στοχαστικές. Τα αιτιοκρατικά και τα στοχαστικά συστήματα ορίστηκαν στην Παράγραφο 2.3.3. Ομοίως, και τα μοντέλα διακρίνονται σε αιτιοκρατικά και στοχαστικά σε αναλογία, όμως, με τις δραστηριότητες που περιλαμβάνουν και όχι με το σύστημα το οποίο αντιπροσωπεύουν.

Επομένως, είναι δυνατόν να υπάρξει οποιοσδήποτε συνδυασμός συστήματος-μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11.

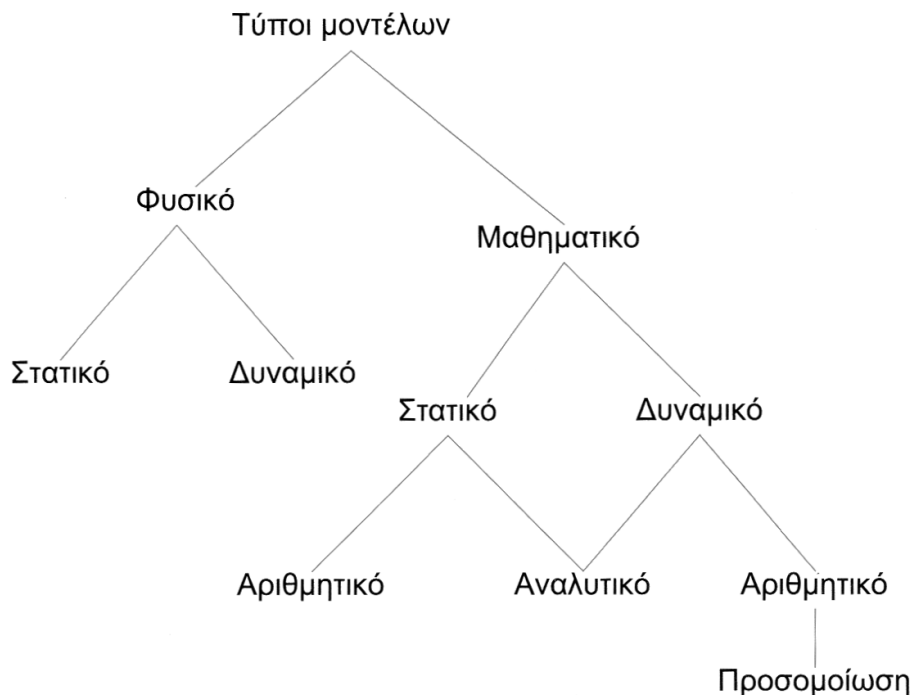


Σχήμα 2.11.: Συνδυασμοί συστημάτων - μοντέλων

1. Αιτιοκρατικό μοντέλο για αιτιοκρατικό σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί ο προσδιορισμός της κίνησης των πλανητών με μαθηματικές εξισώσεις. Το σύστημα (το πλανητικό σύστημα) είναι αιτιοκρατικό, γιατί οι κινήσεις των πλανητών δεν εξαρτώνται από τυχαίους παράγοντες. Το σύνολο των μαθηματικών εξισώσεων κίνησης, που αποτελεί το μοντέλο, είναι επίσης αιτιοκρατικό γιατί είναι δυνατό να λυθεί αναλυτικά και να προβλέψει τη συμπεριφορά του συστήματος.

2. Στοχαστικό μοντέλο για αιτιοκρατικό σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί ο υπολογισμός ενός ορισμένου ολοκληρώματος με τη μέθοδο Μόντε Κάρλο, που θα δούμε σε επόμενη ενότητα. Το ορισμένο ολοκλήρωμα (σύστημα) είναι αιτιοκρατικό γιατί έχει συγκεκριμένη τιμή. Η μέθοδος Μόντε Κάρλο (επίλυση μοντέλου) αποτελεί μια στοχαστική μέθοδο που βασίζεται στην παραγωγή και χρήση τυχαίων αριθμών.
3. Αιτιοκρατικό μοντέλο για στοχαστικό σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί η παραγωγή τυχαίων αριθμών με υπολογιστή. Το σύνολο των τυχαίων αριθμών (σύστημα) είναι στοχαστικό εξ ορισμού. Η μέθοδος παραγωγής των αριθμών με υπολογιστή (μοντέλο) είναι αιτιοκρατική, αφού βασίζεται, συνήθως, σε μια συγκεκριμένη επαναληπτική διαδικασία.
4. Στοχαστικό μοντέλο για στοχαστικό σύστημα. Στην περίπτωση κατά την οποία τόσο το σύστημα όσο και το μοντέλο του συστήματος, είναι στοχαστικά, χρησιμοποιείται κατά κανόνα η προσομοίωση. Παράδειγμα αποτελεί το σύστημα του συνεργείου αυτοκινήτων που είδαμε παραπάνω και η μελέτη του συστήματος με την προσομοίωση του μοντέλου του.

Η ταξινόμηση των μοντέλων μπορεί να γίνει με βάση διάφορα κριτήρια (Tocher 1963, Law 1991). Οι βασικοί τύποι μοντέλων δίνονται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12. Τύποι μοντέλων

Το φυσικό μοντέλο, που ονομάζεται επίσης και εικονικό, είναι μια φυσική αναπαράσταση του αντικειμένου που αντιπροσωπεύει και μοιάζει με αυτό. Μπορεί να είναι σε κλίμακα μικρότερη του αντικειμένου (το μοντέλο ενός αεροπλάνου), ή μεγαλύτερη του αντικειμένου (το μοντέλο ενός ατόμου). Τα φυσικά μοντέλα διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά. Το ξύλινο μοντέλο ενός αυτοκινήτου είναι στατικό μοντέλο, γιατί απλώς αναπαριστά το σχήμα του πραγματικού αντικειμένου. Αντίθετα, το μοντέλο ενός αυτοκινήτου σε μικρογραφία, που περιλαμβάνει κινητήρα βενζίνης, αναρτήσεις, φρένα, κ.α., σε μικρογραφία, είναι ένα δυναμικό μοντέλο γιατί εκτός από την αναπαράσταση του αντικειμένου, απεικονίζει και αντίγραφο της λειτουργίας του αυτοκινήτου.

Ο δεύτερος βασικός τύπος μοντέλου είναι το μαθηματικό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται μαθηματικές έννοιες, σύμβολα και σχέσεις για να περιγράψουν είτε τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος (σχήμα, μέγεθος, χρώμα, κ.α.) είτε τις λειτουργίες του (κίνηση, αλλαγή σχήματος, αλλαγές της κατάστασης, κ.α.), είτε ακόμη τις σχέσεις ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος. Η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου εμπεριέχει την αναπαράσταση των πραγματικών αντικειμένων και διεργασιών με μαθηματικά αντικείμενα και διεργασίες. Για να υλοποιηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο, θα πρέπει αρχικά να περάσουμε από ένα στάδιο απλούστευσης της πραγματικότητας, στο οποίο, ορισμένες πλευρές μπορούν να αγνοηθούν και άλλες να θεωρηθούν πιο απλές από ότι είναι στην πραγματικότητα. Με τον τρόπο αυτό, επικεντρωνόμαστε σε λιγότερα αντικείμενα και διεργασίες από όσα πραγματικά περιέχει το σύστημα.

Συνήθως, τα μαθηματικά μοντέλα εκφράζονται με τη βοήθεια μαθηματικών εξισώσεων. Αυτό όμως δεν πρέπει να προκαλεί σύγχυση. Ένα μαθηματικό μοντέλο δεν είναι απαραίτητο να εκφράζεται με τη βοήθεια εξισώσεων. Για παράδειγμα, ένα μαθηματικό μοντέλο λήψης αποφάσεων μπορεί να περιέχει διαγράμματα ροής ή πίνακες τιμών, αλλά όχι εξισώσεις.

Τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται επίσης σε στατικά και δυναμικά. Όταν ένα μοντέλο δεν μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο, είναι στατικό. Αντίθετα, όταν ένα μαθηματικό μοντέλο επηρεάζεται από έναν χρονικό παράγοντα, τότε είναι δυναμικό.

Για να γίνουν πιο κατανοητοί οι ορισμοί, θα παραθέσουμε δύο παραδείγματα από την επιστήμη των Οικονομικών.

Παράδειγμα 2.5. Ισορροπία προσφοράς/ζήτησης σε ένα οικονομικό σύστημα

Γενικά, κάθε προϊόν της αγοράς θα πρέπει να εμφανίζει ισορροπία ανάμεσα στην προσφορά και τη ζήτησή του. Η προσφορά αυξάνεται αν η τιμή είναι υψηλότερη. Από την άλλη, όταν η τιμή αυξάνεται, μειώνεται η ζήτηση. Ο στόχος είναι να βρεθεί μία τιμή στην οποία η προσφορά είναι ίση με τη ζήτηση. Για να κατασκευάσουμε ένα απλό μοντέλο, δηλώνουμε την τιμή πώλησης με P , την προσφορά με S και τη ζήτηση με D . Υποθέτοντας ότι το μοντέλο είναι γραμμικό, έχουμε το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$D = a - bP$$

$$S = c + dP$$

$$D = S$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, οι a , b , c , d είναι παράμετροι οι οποίες έχουν λάβει τιμή με βάση κάποια δεδομένα της αγοράς. Η τελευταία εξίσωση δηλώνει ότι πρέπει η προσφορά να ισούται με τη ζήτηση, ώστε να ρυθμιστεί ανάλογα και η τιμή. Για παράδειγμα, έστω ότι $a = 1000$, $b = 350$, $c = -200$, $d = 150$. Η τιμή του c λαμβάνεται αρνητική, γιατί δεν μπορούμε να έχουμε προσφορά αν η τιμή είναι αρνητική ή ίση με το μηδέν. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή ισορροπίας είναι:

$$P = \frac{1000+200}{350+150} = 2.4. \text{ Επίσης, } P = Q = 160.$$

Παράδειγμα 2.6. Δυναμικό μοντέλο εισροών εκροών με υστέρηση στην παραγωγή

Η ανάλυση εισροών-εκροών προσπαθεί να απαντήσει στο ερώτημα: "Πόσο θα πρέπει να παράγει κάθε βιομηχανία, ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες σε εισροές όλων των βιομηχανιών αλλά και η ζήτηση;"

Γενικά, σύμφωνα με την οικονομική θεωρία, το μοντέλο της ανάλυσης εισροών-εκροών είναι στατικό. Ωστόσο, μπορούμε να μετατρέψουμε αυτό το μοντέλο σε δυναμικό όταν προστεθούν σε αυτό ορισμένοι χρονικοί παράγοντες. Ένας τέτοιος παράγοντας είναι η υστέρηση στην παραγωγή.

Στη στατική του μορφή, η εκροή μίας βιομηχανίας A ορίζεται από τις σχέσεις:

$$x_1 = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + d_1$$

Η χρονική υστέρηση μίας περιόδου υποδηλώνει ότι η ποσότητα η οποία ζητείται κατά την περίοδο t προσδιορίζει την εκροή $t + 1$ και όχι την εκροή t . Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε δύο βιομηχανίες A και B, το δυναμικό μοντέλο εισροών εκροών δημιουργείται τροποποιώντας την παραπάνω εξίσωση ως ακολούθως:

$$x_{1,t+1} = \alpha_{11}x_{1,t} + \alpha_{12}x_{2,t} + d_{1,t}$$

$$x_{2,t+1} = \alpha_{21}x_{1,t} + \alpha_{22}x_{2,t} + d_{2,t}$$

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος ανάγεται τελικά στην επίλυση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων, από την οποία θα προκύψει η απάντηση στο αρχικό ερώτημα, δοθέντων των εκροών δύο (ή περισσότερων αν θέλουμε να επεκτείνουμε το πρόβλημα) βιομηχανιών σε μία χρονική περίοδο $t + 1$. Οι εκροές αυτές είναι συνάρτηση της ζήτησης κατά την περίοδο t .

Τέλος, τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε αναλυτικά και αριθμητικά. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ένα πλήρες σύνολο εξισώσεων που περιγράφει το σύστημα. Αντίθετα, όταν οι μαθηματικές εξισώσεις περιγραφής του συστήματος είναι αδύνατο να ευρεθούν ή δεν υπάρχουν, το σύστημα περιγράφεται από αριθμητικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί με εμπειρικό τρόπο. Το σύνολο των δεδομένων και οι συσχετίσεις τους αποτελούν το αριθμητικό μοντέλο του συστήματος.

Το μοντέλο ισορροπίας προσφοράς/ζήτησης σε ένα οικονομικό σύστημα αποτελεί ένα παράδειγμα αναλυτικού στατικού μοντέλου. Το μοντέλο περιγράφεται πλήρως από τις τρεις εξισώσεις, οι οποίες όμως δεν εμπεριέχουν χρονικό παράγοντα. Τα αριθμητικά στατικά μαθηματικά μοντέλα απαιτούν τα δεδομένα να μετρώνται με κάποια αριθμητική κλίμακα και η μέτρηση αυτή να μην επηρεάζεται από κάποιο χρονικό παράγοντα. Ως παράδειγμα, θεωρείστε ένα δίκτυο δεδομένων του οποίου η δρομολόγηση γίνεται στατικά, δηλαδή είναι προκαθορισμένη. Το μοντέλο του Πίνακα 2.3., παρουσιάζει το ποσοστό της κυκλοφορίας των πακέτων ανάμεσα σε τέσσερις δρομολογητές αυτού του δικτύου. Το μοντέλο είναι στατικό, δεδομένου ότι η κυκλοφορία είναι προκαθορισμένη, επομένως αμετάβλητη μέσα στο χρόνο, και αριθμητικό, επειδή η δρομολόγηση δεν περιγράφεται από κάποια εξίσωση.

Προς \ Από	A	B	Γ	Δ
A		30%	40%	30%
B	20%		40%	40%
Γ	25%	25%		50%
Δ	33%	33%	34%	

Πίνακας 2.3. Παράδειγμα αριθμητικού στατικού μαθηματικού μοντέλου

Το μοντέλο εισροών-εκροών αποτελεί ένα παράδειγμα αναλυτικού δυναμικού μαθηματικού μοντέλου, επειδή το μοντέλο περιγράφεται πλήρως από τις δύο εξισώσεις, οι οποίες εμπεριέχουν έναν χρονικό παράγοντα. Αντίθετα, τα μοντέλα μίας τράπεζας, ενός ταχυδρομείου, και γενικά των συστημάτων ουράς, ανήκουν στην κατηγορία των αριθμητικών δυναμικών μαθηματικών μοντέλων, επειδή τα μοντέλα αυτά επηρεάζονται από έναν χρονικό παράγοντα, αλλά δεν είναι δυνατόν να περιγραφούν με χρήση μαθηματικών εξισώσεων (π.χ. δεν υπάρχει εξίσωση η οποία να περιγράφει την άφιξη ή την αναχώρηση ενός πελάτη). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.12., η προσομοίωση χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη αυτών των μοντέλων.

Τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν καθορίζουν και την πολυπλοκότητα του μοντέλου (Gordon 1969). Τα απλά μοντέλα περιγράφονται συνήθως από μαθηματικές εξισώσεις και μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά. Αντίθετα, τα πολύπλοκα μοντέλα δεν είναι συνήθως δυνατό να περιγραφούν με μαθηματικές εξισώσεις και έτσι μελετώνται με προσομοίωση. Στον Πίνακα 2.4. δίνονται σε αντιδιαστολή τα χαρακτηριστικά των απλών και των πολύπλοκων μοντέλων.

Τα χαρακτηριστικά που δίνονται στον πίνακα αυτό είναι απλώς ενδεικτικά. Δεν προσδιορίζουν δηλαδή κατ' αποκλειστικότητα τα μοντέλα. Για παράδειγμα, ένα γραμμικό μοντέλο δεν είναι απαραίτητα απλό, όπως και ένα στοχαστικό μοντέλο δεν είναι απαραίτητα πολύπλοκο. Ο πίνακας αυτός δίνει απλώς τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά ενός απλού ή ενός πολύπλοκου μοντέλου. Έτσι, αν ένα μοντέλο είναι στοχαστικό, μη γραμμικό, διακριτό και δυναμικό, αναμένεται να είναι πολύπλοκο. Αντιστοίχως, ένα απλό μοντέλο αναμένεται να είναι στις περισσότερες περιπτώσεις στατικό, αντί δυναμικό, γραμμικό αντί μη γραμμικό, κ.ο.κ.

Μοντέλα	
Απλά	Πολύπλοκα
Στατικά	Δυναμικά
Γραμμικά	Μη γραμμικά
Αιτιοκρατικά	Στοχαστικά
Συνεχή	Διακριτά
Σταθερής κατάστασης	Μεταβατικά
Περιληπτικά	Λεπτομερή

Πίνακας 1.4: Απλά και πολύπλοκα μοντέλα

Μία ιδιαίτερη κατηγορία μοντέλων αποτελούν τα μηχανολογικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και το σχεδιασμό μηχανολογικών συστημάτων. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται από τρεις συγκεκριμένες ομάδες στοιχείων :

1. Παραμέτρους και μεταβλητές. Παράμετροι είναι οι γνωστές οντότητες του συστήματος ή χαρακτηριστικά οντοτήτων με προκαθορισμένες τιμές. Μεταβλητές είναι οι άγνωστες οντότητες του συστήματος ή τα χαρακτηριστικά οντοτήτων με άγνωστες τιμές.
2. Συσχετίσεις και περιοριστικές συνθήκες. Οι συσχετίσεις περιγράφουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης των οντοτήτων ή τις μαθηματικές σχέσεις που σχετίζουν μία μεταβλητή ή παράμετρο με μία άλλη μεταβλητή ή παράμετρο. Οι περιοριστικές συνθήκες προσδιορίζουν τις μέγιστες ή ελάχιστες τιμές, που μπορούν να λαμβάνουν οι άγνωστες μεταβλητές.
3. Κριτήρια. Τα κριτήρια, που εκφράζονται συνήθως με τη μορφή συνάρτησης, αποτελούν τους σκοπούς ή στόχους του συστήματος, καθώς επίσης και τον τρόπο εκτίμησής του.

Παράδειγμα 2.7. Μοντέλο ουράς σε τράπεζα

Μία τράπεζα με τρία ταμεία ανοίγει στις 8.00 π.μ και κλείνει στις 15.00 μ.μ, αλλά λειτουργεί έως ότου εξυπηρετηθούν όλοι οι πελάτες που βρίσκονται στην ουρά μέχρι την ώρα κλεισίματος. Κάθε ταμείο έχει ξεχωριστή ουρά και ο πελάτης που καταφθάνει στην τράπεζα εισέρχεται στην πιο μικρή ουρά. Αν δύο ουρές έχουν ίδιο μήκος, ο πελάτης θα εισέλθει σε εκείνη που βρίσκεται πιο κοντά στην πόρτα

εισόδου. Όταν ένας πελάτης που βρίσκεται στο τέλος μίας ουράς διεπιτωσει ότι η αναχώρηση ενός πελάτη από μία άλλη ουρά καθιστά εκείνη την ουρά μικρότερη, αλλάζει ουρά και μετακινείται στην μικρότερη.

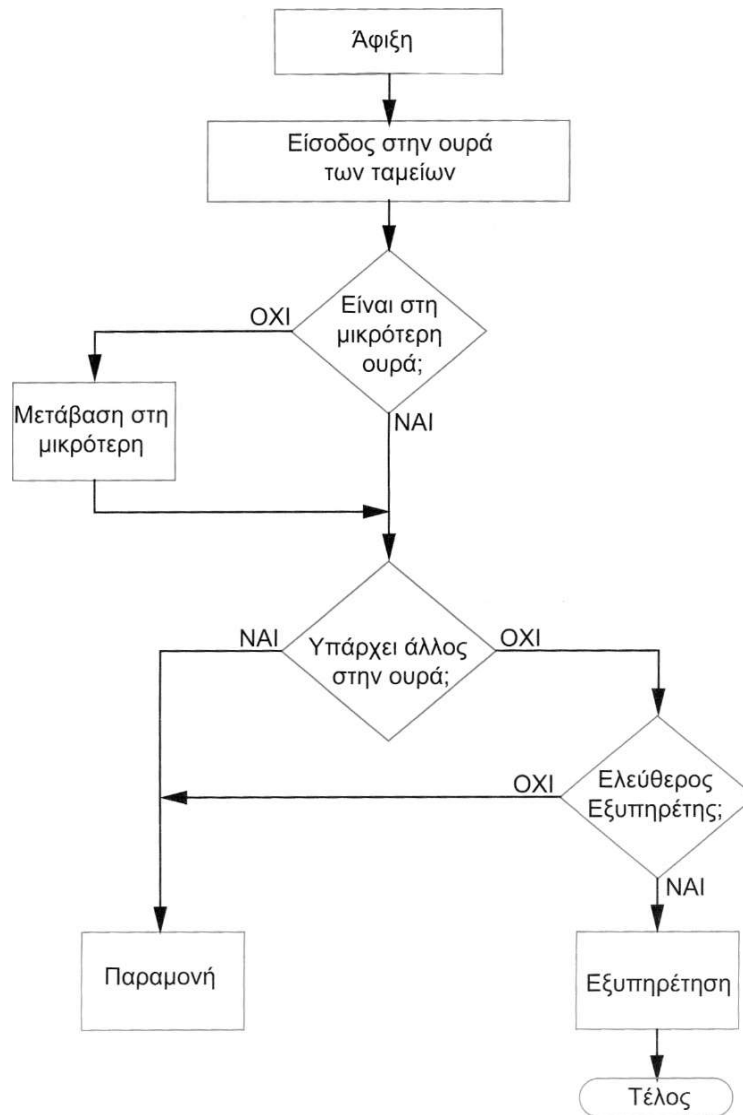
- a) Σχολιάστε το είδος του μοντέλου που θα ήταν το πιο κατάλληλο για την περίπτωση αυτή, δικαιολογώντας τις απαντήσεις σας.
- b) Δώστε τη λίστα χαρακτηριστικών: γεγονότα, οντότητες και δραστηριότητες του μοντέλου.
- c) Να σχεδιάσετε ένα διάγραμμα ροής για το γεγονός "Αφιξη στο σύστημα".

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ

- a) Το μοντέλο που είναι κατάλληλο για την περίπτωση αυτή θα πρέπει να είναι: μαθηματικό γιατί μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικές έννοιες, δυναμικό γιατί το μοντέλο μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο, και στοχαστικό γιατί οι δραστηριότητες εξαρτώνται από τυχαίους παράγοντες.
- b) Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η λίστα χαρακτηριστικών του συστήματος.

Οντότητες	Γεγονότα	Δραστηριότητες
Πελάτης	Αφιξη Αναχώρηση	Κατάθεση Ανάληψη
Προσωπικό	Εξυπηρέτηση πελατών Κλείσιμο θυρών	Έκδοση αποδείξεων (κατάθεσης, ανάληψης)

- c) Το διάγραμμα ροής απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13. Διάγραμμα ροής για το Παράδειγμα 2.7.

2.5. Δημιουργία Μοντέλων Προσομοίωσης

2.5.1. Γενικά

Η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης αποτελεί ένα υποκατάστατο του πειραματισμού με το πραγματικό σύστημα. Σε αρκετές περιπτώσεις, ο πειραματισμός με το πραγματικό σύστημα μπορεί να είναι επικίνδυνος, ιδιαίτερα δαπανηρός, ή ακόμη και αδύνατος. Επομένως, ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτει ένα μοντέλο, είναι η αξιοπιστία του: δηλαδή να αποτελεί όσο το δυνατόν πιο ικανοποιητική προσέγγιση του πραγματικού συστήματος, ώστε να περιοριστεί όσο το δυνατόν η πιθανότητα τα συμπεράσματα τα οποία θα εξαχθούν από το μοντέλο να είναι εσφαλμένα ή να οδηγήσουν σε δαπανηρές αποφάσεις. Η

δημιουργία μοντέλων για προσομοίωση είναι μια πειραματική μεθοδολογία, η οποία έχει ως σκοπούς:

- a) τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος,
- b) τον έλεγχο υποθέσεων ή θεωριών για την παρατηρούμενη συμπεριφορά ενός συστήματος, και
- c) την πρόβλεψη ή εκτίμηση της μελλοντικής συμπεριφοράς ενός συστήματος.

Η προσομοίωση, επομένως, δεν αποτελεί παρά ένα πειραματισμό με το μοντέλο, ο οποίος αντικαθιστά τον πειραματισμό με το σύστημα. Η προσομοίωση μέσω των πειραμάτων εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

- Εκτίμηση. Γίνεται προσπάθεια να προσδιορισθεί πόσο καλό είναι το προτεινόμενο σύστημα, δηλαδή, πόσο καλά ανταποκρίνεται στη σχεδίασή του, όταν κριθεί με βάση συγκεκριμένα και προκαθορισμένα κριτήρια.
- Σύγκριση. Συγκρίνονται διαφορετικές σχεδιάσεις του προτεινομένου συστήματος ως προς την επίτευξη συγκεκριμένης λειτουργίας. Μπορούν επίσης να συγκριθούν μεταξύ τους διαφορετικές προτεινόμενες λειτουργίες του συστήματος.
- Πρόβλεψη. Γίνεται μια εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος κάτω από τις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας.
- Ανάλυση ευαισθησίας. Συστήματα τα οποία εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες ή συνθήκες δεν αντιδρούν με την ίδια ευαισθησία σε μεταβολές αυτών των παραγόντων ή συνθηκών. Καθορίζονται έτσι οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τη λειτουργία του συστήματος.
- Βελτιστοποίηση. Καθορίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή απόκριση του συστήματος.
- Λειτουργικές σχέσεις. Προσδιορίζονται οι λειτουργικές σχέσεις ανάμεσα στους σημαντικότερους παράγοντες ή συνθήκες που επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος.

Σύμφωνα με την ταξινόμηση του Σχήματος 2.12., τα μοντέλα προσομοίωσης είναι συνήθως αριθμητικά δυναμικά μαθηματικά μοντέλα. Αυτό όμως που κυρίως χαρακτηρίζει τα μοντέλα προσομοίωσης είναι το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά δεν λύνονται, αλλά εκτελούνται, συνήθως σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Όλα τα μοντέλα προσομοίωσης είναι περιγραφικά μοντέλα, με την έννοια ότι χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι, υπολογιστικές μέθοδοι και διεργασίες για να περιγράψουν τη λειτουργία του συστήματος. Σχεδόν όλα τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούνται από κάποιο συνδυασμό των παρακάτω στοιχείων:

- Συστατικά
- Μεταβλητές
- Παραμέτρους
- Λειτουργικές σχέσεις
- Περιορισμούς
- Συναρτήσεις κριτηρίων

Κάθε μοντέλο προσομοίωσης έχει τη μορφή μιας ερώτησης αν... τότε... Δηλαδή, αν δοθεί μια συγκεκριμένη είσοδος με την ευρεία έννοια, που περιλαμβάνει και οποιαδήποτε στρατηγική, τότε η έξοδος μπορεί να καθορισθεί από το μοντέλο. Προκύπτει, οπότε, το συμπέρασμα ότι η προσομοίωση δεν είναι κάποια θεωρία, αλλά μια απλή μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων από τις πολλές που υπάρχουν.

2.5.2. Κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης

Η κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης είναι μια δύσκολη τεχνική γιατί πρέπει να εξισορροπήσει αντικρουόμενους παράγοντες. Αφενός το μοντέλο θα πρέπει να είναι αρκετά απλό, έτσι ώστε να μπορεί να κατασκευασθεί και να μελετηθεί, αφετέρου θα πρέπει να είναι αρκετά πολύπλοκο, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει όσο πιο πιστά γίνεται το σύστημα που πρόκειται να μελετηθεί.

Η ισορροπία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με προσεκτική ανάλυση του μοντέλου. Αν το μοντέλο που έχει κατασκευασθεί είναι απλό και κατανοητό, τότε μπορεί να εμπλουτισθεί. Αντίθετα, αν το μοντέλο είναι πολύπλοκο και δυσνόητο, μπορεί να απλοποιηθεί. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιούνται οι εξής πέντε κανόνες εμπλουτισμού ή απλοποίησης του μοντέλου :

- Αν το μοντέλο είναι απλό, ορισμένες σταθερές μετατρέπονται σε μεταβλητές ώστε να γίνει πολύπλοκο. Αντίθετα αν το μοντέλο είναι πολύπλοκο, ορισμένες μεταβλητές μετατρέπονται σε σταθερές.
- Η εξάλειψη ή συνένωση μεταβλητών απλοποιεί το μοντέλο, ενώ αντίθετα η προσθήκη μεταβλητών το εμπλουτίζει.

- Επειδή τα γραμμικά μοντέλα είναι γενικώς απλούστερα των μη γραμμικών, η παραδοχή γραμμικότητας του συστήματος απλοποιεί το μοντέλο, ενώ αντίθετα η παραδοχή μη γραμμικότητας το εμπλουτίζει.
- Η προσθήκη ισχυρότερων υποθέσεων και περιορισμών απλοποιεί το μοντέλο.
- Τέλος, ο περιορισμός των ορίων του συστήματος οδηγεί σε απλούστερο μοντέλο, ενώ η επέκτασή τους οδηγεί σε πιο πολύπλοκο μοντέλο.

Πριν τη δημιουργία ενός μοντέλου, θα πρέπει να ληφθεί μία απόφαση σχετικά με τα βασικά στοιχεία του μοντέλου. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τη φύση του συστήματος το οποίο θα προσομοιωθεί και τη φύση της μελέτης η οποία θα γίνει με τη βοήθεια του μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, το μοντέλο θα πρέπει να αποτελεί μία αξιόπιστη αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος. Από την άλλη πλευρά, η φύση της μελέτης (δηλαδή ποιος είναι ο στόχος της συγκεκριμένης προσομοίωσης και ποια είναι τα αναμενόμενα αποτελέσματα) καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και το επίπεδο λεπτομέρειας το οποίο απαιτείται, όσον αφορά την κατασκευή του μοντέλου. Για παράδειγμα, δεν είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός λεπτομερούς μοντέλου όταν αυτό που μας ενδιαφέρει είναι μία απλή εκτίμηση. Γενικά, υπάρχουν τρία σημαντικά ζητήματα για τα οποία πρέπει να λάβει υπόψη ο σχεδιαστής ενός μοντέλου:

1. Ροή χρόνου: Στην προσομοίωση, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας με την οποία προχωρά ο πειραματισμός πάνω στο σύστημα. Δεδομένου ότι η αλλαγή της κατάστασης ενός συστήματος μοντελοποιείται μέσα στο χρόνο, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τον τρόπο διαχείρισης της ροής του χρόνου. Οι δύο βασικοί μηχανισμοί διαχείρισης του χρόνου της προσομοίωσης, είναι ο μηχανισμός επόμενου γεγονότος και ο μηχανισμός σταθερού χρονικού διαστήματος.
2. Αιτιοκρατικό ή στοχαστικό μοντέλο: Όπως είδαμε παραπάνω, ένα μοντέλο είναι αιτιοκρατικό όταν οι δραστηριότητές του είναι πλήρως προβλέψιμες. Αντίθετα, είναι στοχαστικό, όταν οι δραστηριότητές του προσδιορίζονται από τυχαίους παράγοντες.
3. Συνεχείς ή διακριτές αλλαγές των μεταβλητών: Σε ένα μοντέλο προσομοίωσης, οι μεταβλητές είναι πιθανό να αλλάζουν είτε συνεχώς, είτε σε διακριτά χρονικά διαστήματα. Γενικά, ο σχεδιαστής του μοντέλου αποφασίζει σχετικά με τον τρόπο διαχείρισης αυτών των αλλαγών. Για παράδειγμα, αν το

μοντέλο αφορά ένα λεωφορείο το οποίο μετακινείται από στάση σε στάση μεταφέροντας ανθρώπους, τότε ορισμένα από τα γεγονότα του συστήματος είναι τα εξής:

- το λεωφορείο σταματά στη στάση
- ανοίγουν οι πόρτες
- ανεβαίνουν και κατεβαίνουν άνθρωποι
- κλείνουν οι πόρτες
- το λεωφορείο ξεκινά προς την επόμενη στάση

Αν το μοντέλο είναι διακριτό ως προς τις αλλαγές των μεταβλητών, οι χρόνοι μετάβασης από τον ένα σταθμό στον άλλο, ανοίγματος και κλεισίματος των θυρών, και εισόδου-εξόδου των ανθρώπων συνήθως λαμβάνονται μέσα από κάποια κατάλληλη κατανομή και θεωρούνται γνωστοί. Οι μεταβλητές του διακριτού μοντέλου παρουσιάζουν ενδιαφέρον όταν δείχνουν την αλλαγή της κατάστασης του συστήματος. Αν το μοντέλο είναι συνεχές (για παράδειγμα, αν ενδιαφερόμαστε για την κατάσταση του συστήματος σε σχέση με την αλλαγή της ταχύτητας του λεωφορείου, η οποία είναι συνεχής), τότε οι μεταβλητές πιθανόν να αναπαρίστανται από ένα σύνολο εξισώσεων και υπολογίζονται σε κάθε χρονική στιγμή.

Σε γενικές γραμμές, η πλειοψηφία των συστημάτων προσομοιώνεται με διακριτά μοντέλα. Ωστόσο, υπάρχουν πεδία στα οποία χρησιμοποιούνται συνεχή μοντέλα. Για παράδειγμα, στην οικονομική επιστήμη, οι οικονομολόγοι συχνά μελετούν τη συμπεριφορά ενός πλήθους συστημάτων με τη βοήθεια συνόλων διαφορικών εξισώσεων.

2.5.3. Κριτήρια καλού μοντέλου

- Ένα καλό μοντέλο όχι μόνο αντιπροσωπεύει πιστότερα το σύστημα από ένα κακό, αλλά βοηθά περισσότερο τόσο στην κατανόηση των λειτουργιών του συστήματος, όσο και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια που επιτρέπουν την αναγνώριση ενός καλού μοντέλου και τα οποία βοηθούν στην κατασκευή του:
- Γενικώς, τα καλά μοντέλα είναι εύκολα στην κατανόηση από τον χρήστη και προσανατολίζονται προς τους συγκεκριμένους σκοπούς ή στόχους που έχουν τεθεί. Επιπλέον, είναι ισχυρά με την έννοια ότι δεν δίνουν περίεργες και δυσνόητες απαντήσεις.

- Οι χρήστες ελέγχουν και μεταβάλλουν ευκολότερα ένα καλό μοντέλο παρά ένα κακό. Είναι δηλαδή πολύ πιο εύκολο για τους χρήστες να επικοινωνήσουν με ένα καλό μοντέλο. Επομένως, η προσαρμοστικότητα του μοντέλου είναι ένα σημαντικό στοιχείο της ποιότητάς του. Για τα καλά μοντέλα υπάρχουν εύκολες και ακριβείς διαδικασίες τροποποίησης ή ενημέρωσής τους.
- Ένα καλό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθούν αποφάσεις για το σύστημα, οι οποίες είναι παρόμοιες με εκείνες που θα είχαν ληφθεί αν ο πειραματισμός με το ίδιο το σύστημα ήταν αποτελεσματικός, εύκολος, και οικονομικός.
- Τέλος, χαρακτηριστικό των καλών μοντέλων είναι η δυνατότητα εξέλιξής τους. Ξεκινούν δηλαδή από μια απλή μορφή και εξελίσσονται σε μια πιο πολύπλοκη, ανάλογα με τη λεπτομέρεια που θέλει να μελετήσει ο χρήστης.

3. Μοντελοποίηση Διακριτών Συστημάτων

3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, η προσοχή μας θα στραφεί στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων. Τα διακριτά συστήματα μπορούν να οριστούν ως εξής:

Στα διακριτά συστήματα, η κατάσταση αλλάζει μόνο σε διακριτά χρονικά σημεία, που σηματοδοτούν την πραγματοποίηση ενός γεγονότος. Μεταξύ δυο τέτοιων διαδοχικών σημείων, θεωρούμε ότι η κατάσταση του συστήματος παραμένει σταθερή. (Seila et al., 2003)

Στην πραγματικότητα βέβαια, δεν υπάρχουν δυναμικά συστήματα στα οποία η κατάσταση να μη μεταβάλλεται συνεχώς. Αυτό που υπονοεί ο παραπάνω ορισμός είναι ότι μεταξύ δυο διαδοχικών γεγονότων που ενδιαφέρουν την προσομοίωση μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κατάσταση του συστήματος παραμένει σταθερή σε ό,τι αφορά την προσομοίωση.

Ας θεωρήσουμε ότι μας ενδιαφέρει να προσομοιώσουμε τη λειτουργία μιας (υποθετικής και πολύ απλής) τράπεζας, στην οποία εισέρχονται πελάτες, περιμένουν σε μια ουρά (αν χρειάζεται), εξυπηρετούνται από ένα μοναδικό ταμείο και στη συνέχεια εξέρχονται από την τράπεζα. Σκοπός της προσομοίωσης είναι να μελετήσουμε τις ουρές που τυχόν δημιουργούνται και το συνολικό χρόνο αναμονής και εξυπηρέτησης των πελατών. Σε αυτό το παράδειγμα, μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής γεγονότα που ενδιαφέρουν την προσομοίωση:

- Είσοδος Νέου Πελάτη
- Αρχή Εξυπηρέτησης Πελάτη
- Τέλος Εξυπηρέτησης Πελάτη
- Αποχώρηση Πελάτη

Είναι προφανές ότι στην τράπεζα μπορεί να συμβαίνουν και πολλά άλλα γεγονότα, όμως τα παραπάνω επαρκούν για το σκοπό μας (μη ξεχνάτε ότι η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης απαιτεί την απεικόνιση μόνο των σημαντικών παραμέτρων του πραγματικού συστήματος). Επίσης, παρατηρήστε ότι η αναμονή του πελάτη στην ουρά δεν αποτελεί γεγονός: ο χρόνος αναμονής προκύπτει αν από το χρόνο του γεγονότος «Αρχή Εξυπηρέτησης Πελάτη» αφαιρεθεί ο χρόνος του γεγονότος «Είσοδος Νέου Πελάτη» για τον πελάτη αυτό. Αυτό ισχύει πάντα στην προσομοίωση:

όπως θα δούμε και στη συνέχεια του κεφαλαίου, οι ουρές δεν αποτελούν ποτέ γεγονότα αφού είναι παθητικές και όχι ενεργητικές καταστάσεις (δηλαδή, ο πελάτης «αναγκάζεται» να περιμένει στην ουρά μέχρι να μπορεί να εκτελεστεί το γεγονός «Αρχή Εξυπηρέτησης Πελάτη» - δεν πηγαίνει στην τράπεζα με σκοπό να περιμένει στην ουρά!).

Ας γυρίσουμε όμως στη συζήτηση περί γεγονότων και διακριτών συστημάτων. Με την έναρξη της εξυπηρέτησης ενός πελάτη και με τη λήξη αυτής σηματοδοτούνται αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος (καθώς οι στιγμές αυτές σηματοδοτούν γεγονότα με ενδιαφέρον για την προσομοίωσή μας). Στον ενδιάμεσο χρόνο, δηλαδή κατά τη διάρκεια της εξυπηρέτησης, μπορούμε να θεωρήσουμε (και πάλι για τους σκοπούς της συγκεκριμένης προσομοίωσης και μόνο) πως η κατάσταση του συστήματος παραμένει σταθερή. Στην πραγματικότητα βέβαια, αυτή είναι μια απλούστευση, αφού κατά τη διάρκεια της εξυπηρέτησης μπορεί να συμβούν αρκετές αλλαγές στο σύστημα (π.χ. προσωρινή διακοπή του τραπεζικού δικτύου). Όμως αυτές οι αλλαγές είναι αδιάφορες για τους σκοπούς της προσομοίωσης, γι' αυτό και δε λαμβάνονται υπόψη, επιτρέποντας μας να θεωρούμε την κατάσταση του συστήματος σταθερή μεταξύ των δυο γεγονότων που μας ενδιαφέρουν. Έτσι, αν το δίκτυο της τράπεζας καταστεί όντως μη διαθέσιμο για κάποιο χρόνο, αυτός θα απεικονιστεί στον αυξημένο χρόνο εξυπηρέτησης για τον τρέχοντα πελάτη (και, αντίστοιχα, στους αυξημένους χρόνους αναμονής στην ουρά για τους επόμενους πελάτες) και δε χρειάζεται να μοντελοποιηθεί ως ξεχωριστό γεγονός.

3.2. Συστήματα και Μοντέλα

3.2.1. Συστήματα

Σύστημα είναι ένα σύνολο από διακριτά στοιχεία, τα οποία δέχονται μια σειρά από εισόδους και συνεργάζονται αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους προκειμένου να τις μετασχηματίσουν σε εξόδους με κάποιο συγκεκριμένο σκοπό.

Στον παραπάνω ορισμό, είναι χρήσιμο να τονιστεί ότι:

- Τα συστήματα έχουν πάντα ένα συγκεκριμένο σκοπό, δεν αποτελούν δηλαδή τυχαίες ομαδοποιήσεις στοιχείων.
- Τα συστήματα δέχονται εισόδους και τις μετασχηματίζουν σε εξόδους.
- Τα συστήματα διαθέτουν στοιχεία που αναλαμβάνουν τη διεκπεραίωση των παραπάνω μετασχηματισμών.

Για παράδειγμα, ένα κατάστημα τράπεζας, όπου υπάλληλοι εξυπηρετούν πελάτες, αποτελεί ένα σύστημα, το οποίο για τους σκοπούς μιας προσομοίωσης, μπορεί να οριστεί ως εξής:

- Σκοπός του συστήματος είναι η εξυπηρέτηση των πελατών.
- Είσοδοι στο σύστημα είναι οι πελάτες προς εξυπηρέτηση, ενώ έξοδοι είναι οι εξυπηρετηθέντες πελάτες.
- Στοιχεία του συστήματος είναι οι υπάλληλοι, καθώς και οποιαδήποτε άλλη υποδομή είναι απαραίτητη για τη διεκπεραίωση των μετασχηματισμών του συστήματος (π.χ. ταμεία, υπολογιστές, κτλ). Προσοχή: δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στο μοντέλο όλα τα στοιχεία, παρά μόνο αυτά που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου σκοπού και επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του συστήματος.

3.2.2. Είδη συστημάτων

Τα συστήματα, ως προς την προσομοίωση, κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις μεταβολές της κατάστασής τους και το βαθμό εξάρτησής τους από την τυχαιότητα.

Συνεχή και διακριτά συστήματα

Στα συνεχή συστήματα, η κατάσταση του συστήματος υπόκειται σε διαρκείς μεταβολές στο χρόνο. Για παράδειγμα, ένας δρόμος αποτελεί ένα σύστημα, η κατάσταση του οποίου μεταβάλλεται διαρκώς, καθώς οχήματα κινούνται κατά μήκος του.

Στα διακριτά συστήματα η κατάσταση του συστήματος αλλάζει μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, οι οποίες σηματοδοτούν την εκτέλεση κάποιου γεγονότος. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μια τράπεζα ή ένα κέντρο τηλεφωνικής εξυπηρέτησης αποτελούν παραδείγματα διακριτών συστημάτων, αφού η κατάσταση τους αλλάζει μόνο με την άφιξη ή την αποχώρηση ενός πελάτη (για την τράπεζα) ή μιας κλήσης (για το τηλεφωνικό κέντρο). Από την άλλη μπορεί να θεωρηθεί, κι ας μην είναι απολύτως αληθές, ότι μεταξύ των γεγονότων η κατάσταση των συστημάτων αυτών παραμένει σταθερή.

Θα πρέπει εδώ να επισημάνουμε ότι στην πραγματικότητα τα περισσότερα συστήματα μπορούν να μελετηθούν είτε ως συνεχή είτε ως διακριτά, ανάλογα με το σκοπό της προσομοίωσης και το βαθμό λεπτομέρειας της μελέτης. Για

παράδειγμα, σε ένα δίκτυο υπολογιστών θα χρησιμοποιούσαμε διακριτό μοντέλο αν μας ενδιέφερε η διακίνηση κάθε πακέτου πληροφορίας χωριστά, ενώ ένα συνεχές μοντέλο θα ήταν καταλληλότερο για τη μελέτη της συνολικής ροής των πακέτων μέσα στο δίκτυο.

Στοχαστικά και ντετερμινιστικά συστήματα

Τα προσδιορισμένα (ντετερμινιστικά) συστήματα χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι οι έξοδοι τους μπορούν να προβλεφθούν πλήρως και με ακρίβεια αν είναι γνωστές οι εισόδους τους. Για παράδειγμα, δεδομένης της σημερινής θέσης των πλανητών στο ηλιακό σύστημα, είναι δυνατό να υπολογίσουμε με ακρίβεια τη θέση οποιουδήποτε πλανήτη, σε οποιαδήποτε μελλοντική χρονική στιγμή.

Αντίθετα, τα στοχαστικά συστήματα εξαρτώνται από την τυχαιότητα. Επομένως, αν γνωρίζουμε τις εισόδους τους, μπορούμε να προβλέψουμε τις αντίστοιχες εξόδους μόνο με κάποια πιθανότητα μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών. Για παράδειγμα, δοθέντος του χρόνου άφιξης μιας παραγγελίας σε μια επιχείρηση, μπορούμε μόνο να πιθανολογήσουμε σχετικά με τον αναμενόμενο χρόνο εκτέλεσής της. Έτσι, στα στοχαστικά συστήματα, η χρήση στατιστικών κατανομών και μεθόδων ανάλυσης αποτελεί αναγκαιότητα. Όλα τα συστήματα στα οποία υπεισέρχεται ο ανθρώπινος παράγοντας είναι από τη φύση τους στοχαστικά.

3.2.3. Μοντέλα

Μοντέλο είναι η φυσική ή αφαιρετική αναπαράσταση ενός συστήματος με σκοπό τη μελέτη του και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το πραγματικό σύστημα.

Τα μοντέλα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η απευθείας μελέτη του πραγματικού συστήματος είναι ασύμφορη ή αδύνατη. Ένα μοντέλο διευκολύνει την κατανόηση της δομής και τη λειτουργίας του συστήματος και αποτελεί μέσο επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων εμπλεκόμενων. Για παράδειγμα, η επικοινωνία των σχεδιαστών και κατασκευαστών ενός κτηρίου (αρχιτέκτονες και μηχανικοί) μεταξύ τους και με τους πελάτες γίνεται ευκολότερα αν δημιουργηθεί ένα μοντέλο (σχέδιο ή μακέτα) του υπό ανάπτυξη κτηρίου. Ακόμα, ένα μοντέλο αποτελεί εργαλείο με το οποίο αξιολογούνται πιθανές συνέπειες από διάφορους χειρισμούς στο πραγματικό σύστημα.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή κατασκευή του μοντέλου είναι η κατανόηση του σκοπού που θα εξυπηρετήσει το μοντέλο, καθώς ο σκοπός θα καθορίσει τα όρια του συστήματος προς μοντελοποίηση καθώς και το επίπεδο λεπτομέρειας που θα παρέχει το μοντέλο. Ακόμα, το μοντέλο ενός συστήματος θα πρέπει να αποτελεί πιστή αναπαράσταση της πραγματικότητας, ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από τη μελέτη του μοντέλου να ισχύουν και για το σύστημα. Ταυτόχρονα όμως, θα πρέπει το μοντέλο να είναι λιτό, ώστε η ανάπτυξή του να είναι ευκολότερη και η ανάλυση να μην αποπροσανατολίζεται από περιττές λεπτομέρειες.

Οι δυο παραπάνω προϋποθέσεις ενός καλού μοντέλου (πιστότητα και λιτότητα) έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους, αφού η μια ωθεί τον αναλυτή να συμπεριλάβει όσο το δυνατό περισσότερα στοιχεία του συστήματος στο μοντέλο (για να αυξήσει την πιστότητα) ενώ η άλλη προωθεί την αυστηρή επιλογή στοιχείων (για να αυξηθεί η λιτότητα). Δεν υπάρχουν αυστηροί κανόνες για την επιλογή στοιχείων που θα πρέπει να συμπεριληφθούν σε ένα μοντέλο, εκτός από το ότι θα πρέπει να συμπεριληφθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία του συστήματος και μόνο αυτά. Για το λόγο αυτό άλλωστε έχει πολλές φορές ειπωθεί ότι η μοντελοποίηση συστημάτων, ειδικά σε ότι αφορά την προσομοίωση, είναι ίσως περισσότερο τέχνη παρά επιστήμη!

3.2.4. Είδη μοντέλων

Τα μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε φυσικά (εικονική αναπαράσταση) και σε αφαιρετικά μοντέλα (μαθηματικές ή λογικές έννοιες που περιγράφουν τις ιδιότητες και λειτουργίας του συστήματος).

Τα φυσικά μοντέλα, όπως οι χάρτες και οι μακέτες, χρησιμοποιούνται ευρέως σαν εργαλεία κατανόησης και επικοινωνίας αλλά μειονεκτούν σαν εργαλεία ανάλυσης, καθώς είναι στατικά και για το λόγο αυτό δεν είναι σε θέση να δείξουν πως το σύστημα συμπεριφέρεται στο χρόνο ή πως τα συστατικά του στοιχεία αλληλεπιδρούν δυναμικά μεταξύ τους.

Από την άλλη, τα αφαιρετικά μοντέλα μπορεί να είναι διαφόρων μορφών:

- Τα μαθηματικά μοντέλα απεικονίζουν με μαθηματικές εξισώσεις το σύστημα και τους παράγοντες επιρροής του. Οι σχέσεις, δηλαδή, μεταξύ των μεταβλητών είναι αλγεβρικές, διαφορικές εξισώσεις, εξισώσεις διαφορών κ.ά. Είναι χρήσιμα καθώς είναι αυστηρά μοντέλα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιλύσουν συγκεκριμένα προβλήματα, εντοπίζοντας τη βέλτιστη εφικτή

λύση τους. Όμως μειονεκτούν στο ότι δεν έχουν εφαρμογή όταν η πολυπλοκότητα των συστημάτων αυξάνεται σημαντικά, ειδικά σε περίπτωση ισχυρής στοχαστικότητας στο υπό μελέτη σύστημα.

- Τα λογικά μοντέλα, όπως τα διαγράμματα ροής (flowchart), απεικονίζουν ένα σύστημα με μία λογική ακολουθία, όπου οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος προσδιορίζονται με συγκεκριμένες λογικές συνθήκες. Αποτελούν πολύ ισχυρά εργαλεία κατανόησης και επικοινωνίας αλλά μειονεκτούν σαν εργαλεία ανάλυσης, καθώς είναι στατικά.
- Τα μοντέλα προσομοίωσης που μιμούνται τη δυναμική συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις των συστατικών στοιχείων ενός συστήματος στο χρόνο, πλεονεκτούν ως προς τη δυνατότητα τους να αναπαραστήσουν πολύπλοκα συστήματα και μάλιστα να απεικονίσουν δυναμικές παραμέτρους της συμπεριφοράς τους, αλλά μειονεκτούν ως προς το χρόνο και το κόστος ανάπτυξης του μοντέλου.

3.3. Ανάλυση Συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την πρώτη φάση της προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα με το τμήμα που περιλαμβάνει την παρατήρηση και ανάλυση του συστήματος έως και τη σύλληψη του μοντέλου. Η αντιμετώπιση ενός προβλήματος μέσω της προσομοίωσης, ξεκινά με την εξοικείωση του αναλυτή με το υπό μελέτη σύστημα. Η ανάλυση αυτή έχει δύο μέρη:

- Ποιοτική ανάλυση. Αναλύονται οι επιμέρους διαδικασίες και δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα και επιλέγονται αυτές που αφορούν τους σκοπούς της συγκεκριμένης προσομοίωσης και επομένως θα αποτελέσουν τμήμα του υπό ανάπτυξη μοντέλου. Αποτέλεσμα της ποιοτικής ανάλυσης είναι μια αναφορά που περιγράφει το σύστημα (όρια, λειτουργίες, σκοπός της προσομοίωσης), καθώς και μια διαγραμματική παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος, για παράδειγμα μέσω ενός διαγράμματος ροής (flowchart).
- Ποσοτική ανάλυση. Το μοντέλο της προσομοίωσης απαιτεί τη συλλογή και ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων πρωτογενών στοιχείων που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του μοντέλου. Τέτοια στοιχεία μπορεί να είναι: ρυθμός εισόδου οντοτήτων στο σύστημα (για παράδειγμα, πελατών ή παραγγελιών), χρονικές διάρκειες όλων των πράξεων, προτεραιότητες πράξεων, πιθανότητες

εκτέλεσης εναλλακτικών διαδρομών κλπ. Δεδομένα σαν τα παραπάνω αποτελούν εισόδους στο μοντέλο της προσομοίωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, κατά τη φάση της ποσοτικής ανάλυσης, συλλέγονται και επιπλέον δεδομένα, όπως μέσα μήκη ουρών, βαθμοί χρησιμοποίησης των πόρων του συστήματος (για παράδειγμα, εξυπηρετητών), και άλλα. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν εξόδους του μοντέλου της προσομοίωσης και επομένως η συλλογή τους δε γίνεται για να τροφοδοτηθεί το μοντέλο με αυτά, αλλά για να ελεγχθεί η πιστότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τη σύγκριση τους με τα αντίστοιχα στοιχεία του πραγματικού κόσμου (διαδικασία που, όπως είπαμε, είναι γνωστή ως επικύρωση του μοντέλου προσομοίωσης).

Η συλλογή ποιοτικών και ποσοτικών στοιχείων σχετικά με τη δομή και τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, όπως συνεντεύξεις με τους εμπλεκόμενους του συστήματος (χειριστές και διοικητικά στελέχη), επιτόπια παρατήρηση για κάποιο χρονικό διάστημα σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και καταγραφή μετρήσεων για τα ζητούμενα ποσοτικά στοιχεία. Επίσης, οι αναλυτές μπορεί να ελέγξουν και αναφορές ή άλλα σχετικά με το σύστημα έγγραφα και στοιχεία, εάν αυτά υπάρχουν.

Στο στάδιο αυτό, θα πρέπει επίσης να οριοθετηθεί το σύστημα σε σχέση με το περιβάλλον του και να επιλεγούν ποια χαρακτηριστικά του θα αποτελέσουν αντικείμενο της προσομοίωσης και επομένως μέρος του μοντέλου που θα αναπτυχθεί. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η επιλογή των ορίων του συστήματος που θα προσομοιωθεί αλλά και των χαρακτηριστικών του συστήματος που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο, εξαρτάται κυρίως από το σκοπό της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, οι ουρές που δημιουργούνται στα ταμεία ενός fast food αποτελούν σίγουρα σημαντικό τμήμα του συστήματος αν μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών στους πελάτες, αλλά ίσως να είναι εκτός των ορίων του συστήματος αν μας ενδιαφέρει ο σχεδιασμός των πολιτικών ανεφοδιασμού του καταστήματος με πρώτες ύλες.

Είναι σημαντικό να επισημάνουμε εδώ ότι πολλές φορές, μετά την ανάλυση του συστήματος, ακόμα και κατά την μοντελοποίησή του (βλ. επόμενη ενότητα), μπορεί ο αναλυτής να αντιληφθεί ότι δεν έχει επαρκείς ή ξεκάθαρες πληροφορίες για να

προχωρήσει στη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αν είναι αδύνατη η λήψη πραγματικών στοιχείων με άλλο τρόπο, επιστρατεύεται η εμπειρία και η προσωπική κρίση του αναλυτή για τη δημιουργία υποθέσεων ή αλλιώς παραδοχών, σχετικά με τις πτυχές που δεν καλύπτονται πλήρως από τα διαθέσιμα στοιχεία. Οι υποθέσεις είναι πολλές φορές απαραίτητες για τη μοντελοποίηση. Πρέπει κανείς να είναι σε θέση να αναγνωρίζει αφενός την έλλειψη κάποιας πληροφορίας και αφετέρου τη βαρύτητά της, το κατά πόσο δηλαδή επηρεάζει τη διαδικασία της προσομοίωσης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου και συγκεκριμένα στα παραδείγματα μοντελοποίησης, θα τεθεί και πρακτικά το ζήτημα ελλιπών στοιχείων και θα γίνουν παραδοχές ώστε να ξεπεραστούν. Σε κάθε περίπτωση όμως, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, όταν γίνονται υποθέσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος, αυτές αναμφίβολα επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αποτελεί επομένως υποχρέωση του αναλυτή να τεκμηριώνει όλες τις υποθέσεις που έχουν γίνει και να συμπεριλαμβάνει στα αποτελέσματα της μελέτης του τις υποθέσεις καθώς και μια ανάλυση του πως αυτές μπορεί να περιορίζουν την αξιοπιστία ή την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

3.4. Μοντελοποίηση Συστήματος

Έχοντας αποκτήσει μια ικανοποιητική εικόνα του συστήματος από την ποιοτική και ποσοτική ανάλυσή του, μπορεί να αρχίσει η διαδικασία μοντελοποίησής του, δηλαδή δημιουργίας του μοντέλου προσομοίωσης. Η μοντελοποίηση έχει δύο κυρίως στάδια:

- Δημιουργία του ιδεατού μοντέλου, δηλαδή ενός μοντέλου προσομοίωσης σε περιγραφική μορφή (η οποία μπορεί να είναι λεκτική ή/και διαγραμματική).
- Δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου, δηλαδή μεταφορά του ιδεατού μοντέλου στον υπολογιστή, συνήθως με χρήση κάποιου ειδικού λογισμικού προσομοίωσης.

Βασική προϋπόθεση για τη μετάβαση από την ανάλυση του συστήματος στο ιδεατό μοντέλο προσομοίωσης είναι η ικανότητα διάκρισης και αναγνώρισης των διαφόρων συστατικών του συστήματος. Τα στοιχεία αυτά είναι:

- Οι οντότητες του συστήματος, τα χαρακτηριστικά που αυτές έχουν και οι πορείες που ακολουθούν.
- Τα γεγονότα που συμβαίνουν και οι δραστηριότητες που αυτά ορίζουν.

3.5. Στοιχεία ενός Συστήματος

3.5.1. Οντότητες

Όπως αναφέραμε, κάθε σύστημα αποτελείται από διακριτά στοιχεία που συνεργάζονται και αλληλεπιδρούν για την επίτευξη των σκοπών του συστήματος (μετασχηματισμό εισόδων σε εξόδους). Στην προσομοίωση, τα στοιχεία αυτά, μαζί με τις εισόδους και εξόδους του συστήματος, ονομάζονται οντότητες του συστήματος.

Οντότητα είναι κάθε διακριτό στοιχείο που απαντάται σε ένα σύστημα, είτε είναι μόνιμο (πόρος του συστήματος) είτε προσωρινό (είσοδος/έξοδος).

Η κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης, αρχίζει πάντα με τον εντοπισμό των οντοτήτων που πρέπει να συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Ο μελετητής εντοπίζει τα διακριτά στοιχεία του συστήματος που έχουν ενδιαφέρον ανάλογα με το σκοπό της προσομοίωσης. Τα αντικείμενα αυτά μπορεί να είναι φυσικά (π.χ. υπολογιστής, θέση εργασίας, πελάτης) ή όχι (π.χ. πληροφορίες, παραγγελίες). Οι οντότητες κινούνται (πραγματικά ή αφαιρετικά) μέσα στο σύστημα και με τη συμπεριφορά τους προκαλούν αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος.

Μάλιστα, όλα τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα απαιτούν την παρουσία μιας ή περισσότερων οντοτήτων. Για παράδειγμα, στην τράπεζα, το γεγονός «Έναρξη Εξυπηρέτησης» απαιτεί τη συμμετοχή μιας οντότητας «Πελάτης» και μιας οντότητας «Ταμίας», ενώ το γεγονός «Άφιξη Πελάτη» απαιτεί μόνο τη συμμετοχή της οντότητας «Πελάτης». Είναι χαρακτηριστικό ότι όταν οντότητες απαιτείται να περιμένουν σε ουρές αναμονής, αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχουν διαθέσιμες άλλες οντότητες που θα έπρεπε να συνεργαστούν για την πραγμάτωση κάποιου γεγονότος. Έτσι, για παράδειγμα, στην ίδια τράπεζα, μια οντότητα «Πελάτης» θα πρέπει να περιμένει στην ουρά αν δεν υπάρχει διαθέσιμη καμία οντότητα «Ταμίας» (γιατί όλες οι οντότητες αυτής της κατηγορίας είναι απασχολημένες σε άλλες δραστηριότητες). Μόλις απελευθερωθεί μια οντότητα «Ταμίας» μπορεί να δεσμευτεί με την πρώτη οντότητα «Πελάτης» στην ουρά προκειμένου να πραγματοποιηθεί το γεγονός «Έναρξη Εξυπηρέτησης Πελάτη».

Η επιλογή των οντοτήτων στο σχεδιασμό ενός μοντέλου προσομοίωσης χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Ο αναλυτής πρέπει να συλλάβει όλες τις οντότητες που έχουν παρουσία στο υπό μελέτη σύστημα και να αποφασίσει ποιες από αυτές θα χρειαστεί

να συμπεριλάβει στο μοντέλο. Αυτό, όπως είπαμε, εξαρτάται από το σκοπό της προσομοίωσης.

Για παράδειγμα, στην προσομοίωση ενός εστιατορίου για τον υπολογισμό του χρόνου εξυπηρέτησης των πελατών και του μέσου χρόνου παραμονής τους σε αυτό, ο «Υπεύθυνος Καθαριότητας», αν και πιθανά σημαντική οντότητα για το σύστημα γενικά, δεν χρησιμεύει στη συγκεκριμένη ανάλυση, οπότε δε θα συμπεριληφθεί στο μοντέλο.

Όλες οι οντότητες μιας κατηγορίας συνήθως ομαδοποιούνται και αντιμετωπίζονται ως ένα σύνολο. Η ομαδοποίηση βοηθάει πολύ στη διαδικασία της προσομοίωσης με το να επιτρέπει στον αναλυτή να εντάσσει σε κατηγορίες τις οντότητες του συστήματος και να ακολουθεί συγκεκριμένη μέθοδο αντιμετώπισης για κάθε κατηγορία. Η ομαδοποίηση επίσης εξυπηρετεί στην απλούστευση του μοντέλου, χρειάζεται όμως προσοχή προκειμένου το μοντέλο να διαθέτει τον απαιτούμενο βαθμό λεπτομέρειας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός τηλεφωνικού κέντρου εξυπηρέτησης βλαβών, στο οποίο εισέρχονται κλήσεις για διάφορα είδη βλαβών, ένας αναλυτής θα μπορούσε είτε να συμπεριλάβει υπό την οντότητα «Βλάβη» όλα τα πιθανά προβλήματα (γενική ομαδοποίηση) είτε να χωρίσει τις βλάβες σε επιμέρους κατηγορίες, π.χ. «Βλάβες Τηλεφωνικής Συσκευής», «Βλάβες Καλωδίωσης», «Βλάβες Δικτύου» και να χειριστεί κάθε κατηγορία ως χωριστή οντότητα. Η απάντηση για το τι πρέπει να κάνει εξαρτάται και πάλι από το σκοπό της προσομοίωσης. Για παράδειγμα:

- Αν κάθε διαφορετικό είδος βλάβης απαιτεί χειρισμό από διαφορετικό τεχνικό ή χρειάζεται τελείως διαφορετικό χρόνο επισκευής ή τρόπο αντιμετώπισης, τότε οι βλάβες δεν αποτελούν όλες μια οντότητα, αλλά πρέπει να διαφοροποιηθούν σε κατηγορίες. Αντίθετα, αν οι διαδικασίες αντιμετώπισης των βλαβών είναι κοινές, τότε όλες οι βλάβες μπορεί να θεωρηθούν ότι ανήκουν στην ίδια κατηγορία για τους σκοπούς της προσομοίωσης κι αν είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους σε επιχειρησιακούς όρους.
- Ακόμα, η σημαντικότητα μιας βλάβης, το κατά πόσο δηλαδή επείγει η διόρθωσή της, μπορεί να αποτελέσει κριτήριο ομαδοποίησής της σε χωριστές οντότητες (για παράδειγμα, «Απλές Βλάβες» και «Κρίσιμες Βλάβες») αφού οι

επείγουσες δρομολογούνται άμεσα, σε αντίθεση με δευτερεύουσες οι οποίες μπορούν να περιμένουν.

- Τέλος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορεί να απαιτούν βαθμό λεπτομέρειας που να απαιτεί το διαχωρισμό των βλαβών σε επιμέρους οντότητες. Στο παραπάνω παράδειγμα, θα μπορούσε κανείς να υπολογίσει τους μέσους χρόνους άρσης μεμονωμένα για κρίσιμες βλάβες ή βλάβες δευτερεύουσας προτεραιότητας. Ακόμα θα ήταν δυνατό, το κέντρο εξυπηρέτησης, ανακαλύπτοντας ότι ένα μεγάλο ποσοστό κλήσεων αφορά συγκεκριμένες βλάβες που χρειάζονται σημαντικές εργατώρες για να διορθωθούν, να προβεί σε πιο αποφασιστικά μέτρα αντιμετώπισής τους.

Η ομαδοποίηση οντοτήτων μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να αποφευχθεί, θεωρώντας μεν όλες τις σχετικές οντότητες σαν μια κατηγορία, αλλά προσδίδοντας σε κάθε μια από αυτές διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως θα δούμε παρακάτω. Στο παραπάνω παράδειγμα, θα μπορούσαμε να υιοθετήσουμε τη σχεδιαστική λύση να θεωρήσουμε όλες τις βλάβες σαν μια μεγάλη οντότητα «Βλάβες», αλλά προσδίδοντάς τους το χαρακτηριστικό «Κρισιμότητα» (με τιμές, για παράδειγμα, «Απλή» ή «Κρίσιμη»), το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αντιμετωπίζονται οι βλάβες της δεύτερης κατηγορίας διαφορετικά σε ότι αφορά το χειρισμό τους σε ουρές (μεγαλύτερη προτεραιότητα από τις απλές βλάβες) αλλά το ίδιο σε ότι αφορά τη διαδικασία αντιμετώπισης. Γενικά, όταν σε μια οντότητα πρέπει να προσδώσουμε πολλά χαρακτηριστικά, αυτό μάλλον υπονοεί ότι είναι καλύτερα να τη διαχωρίσουμε σε επιμέρους οντότητες.

Η ομαδοποίηση μπορεί να περιλαμβάνει και την περίπτωση της συγχώνευσης οντοτήτων. Η ιδιαιτερότητα αυτής της περίπτωσης είναι ότι ένα σύνολο οντοτήτων δρουν ως μία μεγαλύτερη και χάνουν την ατομικότητά τους. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός βενζινάδικου, μπορεί να συγχωνευτεί ο οδηγός με το αυτοκίνητό του και να μοντελοποιηθούν από κοινού σαν μια οντότητα «Αυτοκίνητο», όταν δε μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων της. Αυτό όμως δε θα ήταν σωστό αν, για παράδειγμα, την ίδια στιγμή που το αυτοκίνητο πλένεται, ο οδηγός πληρώνει, οπότε ακολουθούν διαφορετικές πορείες στο σύστημα και θα πρέπει να μοντελοποιηθούν χωριστά (αν υποθέσουμε ότι το πλύσιμο και η πληρωμή είναι δραστηριότητες που μας ενδιαφέρουν). Άλλο παράδειγμα συγχώνευσης αποτελούν οι παρέες σε μια αίθουσα μπόουλινγκ. Κάθε παρέα μπορεί να θεωρηθεί είτε ως μία

οντότητα «Παρέα» είτε ως μικρότερες και ανεξάρτητες οντότητες «Παίκτες». Τι είναι σωστότερο εξαρτάται και πάλι από το σκοπό και το επίπεδο λεπτομέρειας της προσομοίωσης.

3.5.2. Είδη οντοτήτων

Οι οντότητες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την παρουσία τους μέσα στο σύστημα σε προσωρινές οντότητες, που απλά διέρχονται από το σύστημα και σε μόνιμες οντότητες, οι οποίες παραμένουν στο σύστημα συνεχώς:

- Προσωρινές οντότητες. Κάθε μια τους «δημιουργείται» με την είσοδό της στο σύστημα και «χάνεται» με την έξοδό της από αυτό. Για παράδειγμα, οι ασθενείς αποτελούν προσωρινές οντότητες σε ένα νοσοκομείο, όπως και οι κλήσεις που περνούν από ένα κέντρο εξυπηρέτησης βλαβών. Γενικά, οι πελάτες ενός συστήματος αποτελούν προσωρινές οντότητες.
- Μόνιμες οντότητες. Παραμένουν συνεχώς στο σύστημα καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του. Αναφέρονται και ως πόροι ή εξυπηρετητές του συστήματος. Παράδειγμα τέτοιων οντοτήτων αποτελούν οι σερβιτόροι σε ένα εστιατόριο, τα μηχανήματα ATM στο δίκτυο μιας τράπεζας ή οι μηχανές σε μια γραμμή παραγωγής. Βέβαια είναι δυνατό κάποιες μόνιμες οντότητες να υποστούν βλάβη και να σταματήσουν να λειτουργούν ή εσκεμμένα να καταργήσουμε κάποιες κατά τον πειραματισμό με το μοντέλο, αυτό όμως δεν ακυρώνει τη γενική περίπτωση κατά την οποία οι οντότητες αυτές δεν εισέρχονται ή εξέρχονται από το σύστημα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

Ακόμα, ανάλογα με την κατάσταση τους κάθε στιγμή, οι οντότητες μπορούν να ταξινομηθούν σε ανενεργές ή ενεργές:

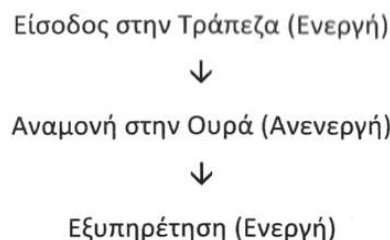
- Ανενεργές οντότητες. Περιμένουν σε πραγματικές ή νοητικές ουρές για την εκπλήρωση των συνθηκών που θα τους επιτρέψουν να συνεχίσουν την πορεία τους μέσα στο σύστημα. Η διάρκεια της αναμονής τους δεν μπορεί γενικά να προβλεφθεί γιατί εξαρτάται από την κατάσταση του υπόλοιπου συστήματος. Για παράδειγμα, ο χρόνος αναμονής ενός επιβάτη σε μια στάση λεωφορείου δεν μπορεί να προσδιοριστεί εκ των προτέρων γιατί εξαρτάται κατά πολύ από παράγοντες όπως κίνηση συγκεκριμένων δρόμων, ενδιάμεσες στάσεις και χρόνοι αποβίβασης, οι οποίοι δεν μπορούν να προκαθοριστούν πλήρως. Τέτοιες καταστάσεις είναι στοχαστικές, γιατί διαδοχικές επαναλήψεις

τους θα οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα, ακόμα και υπό ίδιες αρχικές συνθήκες.

- Ενεργές οντότητες. Κατά την διάρκεια των ενεργών καταστάσεων, οι οντότητες μπορεί να αλληλεπιδρούν με τις υπόλοιπες και να συμμετέχουν σε δραστηριότητες. Η διάρκεια ενεργούς κατάστασης μιας οντότητας μπορεί να προβλεφθεί πλήρως (σε μια ντετερμινιστική διαδικασία, π.χ. τη διάρκεια μιας χρηματιστηριακής συνεδρίασης) ή προσεγγιστικά σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών (σε μια στοχαστική διαδικασία, π.χ. το χρόνο διάρκειας μιας τηλεφωνικής κλήσης). Στη δεύτερη περίπτωση, ο χρόνος διάρκειας της δραστηριότητας προκύπτει από δειγματοληψία σε κάποια στατιστική κατανομή.

3.5.3. Κύκλοι ζωής και πορείες οντοτήτων

Όλες οι οντότητες, μόνιμες και προσωρινές, συμμετέχουν στις λειτουργίες του συστήματος, περνώντας διαδοχικά και εναλλάξ από ενεργές και ανενεργές καταστάσεις. Η διαδοχή των καταστάσεων αυτών σχηματίζει τον κύκλο ζωής της οντότητας στο σύστημα. Για παράδειγμα, στην τράπεζα, ο κύκλος ζωής της οντότητας «Πελάτης» ακολουθεί τις εξής καταστάσεις (εναλλάξ ενεργές και ανενεργές):



Μετά το τέλος της εξυπηρέτησής του, ο «Πελάτης» αποχωρεί από το σύστημα και μεταβαίνει στον εκτός του συστήματος κόσμο, από όπου μπορεί κάποια μελλοντική στιγμή να ξαναμπεί στο σύστημα της τράπεζας. Με άλλα λόγια, αυτός ο «Έξω Κόσμος» μπορεί να θεωρηθεί, για την προσομοίωση της τράπεζας, ως μια τεράστια ουρά στην οποία υπάρχουν άπειρες οντότητες «Πελάτης», κάποιες εκ των οποίων κάποια στιγμή μπορεί να μπουν μέσα στο σύστημα που μελετάμε. Έτσι, αν εισάγουμε και τον «Έξω Κόσμο» στο σχήμα μας, έχουμε τον εξής κύκλο ζωής για την οντότητα «Πελάτης»:



Με άλλα λόγια, οι κύκλοι ζωής όλων των οντοτήτων στην προσομοίωση, όσο πολύπλοκοι και να είναι, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν δύο βασικά κοινά χαρακτηριστικά:

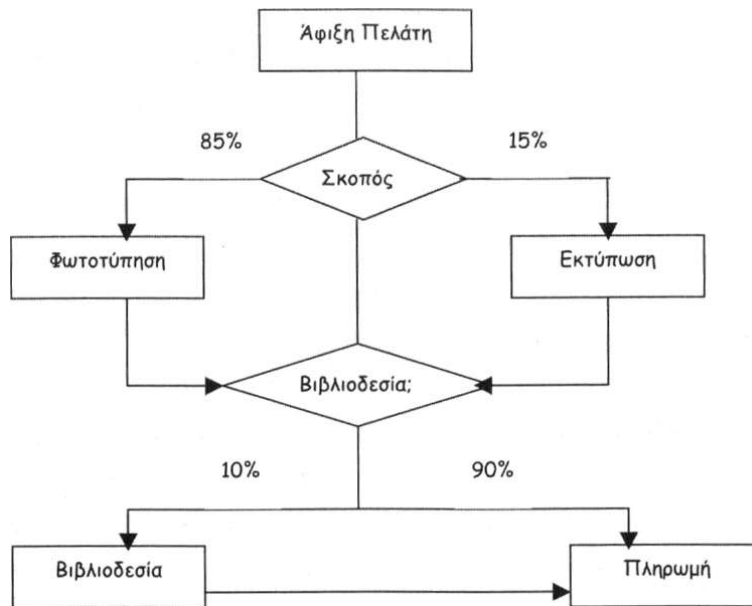
- Υπάρχει αυστηρή εναλλαγή ενεργών και ανενεργών καταστάσεων. Στην πραγματικότητα, μπορεί σε μερικά σημεία να χρειαστεί να εισάγουμε τεχνητές εικονικές ουρές για να ικανοποιείται αυτός ο περιορισμός.
- Οι πορείες των οντοτήτων είναι κλειστές (από όπου και ο όρος κύκλος ζωής), τόσο για τις προσωρινές όσο και για τις μόνιμες οντότητες. Για να ικανοποιηθεί αυτός ο περιορισμός σε ότι αφορά τις προσωρινές οντότητες, μπορούμε να εισάγουμε μια τεχνητή ουρά που αναπαριστά τον κόσμο εκτός του συστήματος.

Ακόμα, στον κύκλο ζωής των οντοτήτων μπορούμε να διακρίνουμε πορείες. Ενώ οι κύκλοι ζωής αναπαριστούν όλες τις πιθανές πορείες που μπορεί να ακολουθήσει μια οντότητα στο σύστημα, μια πορεία είναι ένα υποσύνολο του κύκλου ζωής που αφορά μια συγκεκριμένη περίπτωση οντότητας (π.χ. ένας συγκεκριμένος πελάτης, αντί για την οντότητα «Πελάτης» γενικά). Με άλλα λόγια, πορεία είναι μια σειρά γεγονότων με χρονολογική προτεραιότητα για μια συγκεκριμένη οντότητα που αναπαριστά όλο ή μέρος του κύκλου ζωής της. Η επιλογή της πορείας που θα ακολουθήσει μια συγκεκριμένη οντότητα από τις εναλλακτικές που της προσφέρει ο κύκλος ζωής της, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της οντότητας που θα δούμε στην επόμενη ενότητα.

Ας δούμε τα παραπάνω με ένα παράδειγμα όπου θα απεικονίσουμε τον κύκλο ζωής και τις πιθανές πορείες μιας οντότητας με διαγράμματα ροής. Έστω ότι θέλουμε να προσομοιώσουμε τη λειτουργία ενός φωτοτυπικού κέντρου. Στο κέντρο έρχονται πελάτες με σκοπό να κάνουν είτε εκτύπωση είτε φωτοτύπηση με ποσοστά 15% και

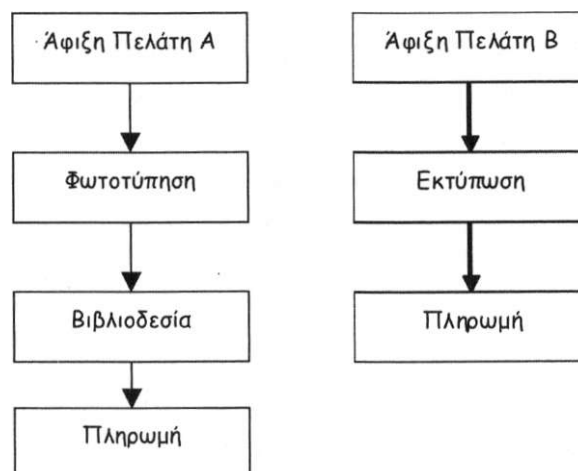
85% αντίστοιχα. Μετά από την ολοκλήρωση των εργασιών αυτών, το 10% των πελατών επιλέγουν να κάνουν και βιβλιοδεσία αυτών που εκτύπωσαν ή φωτοτύπησαν αντίστοιχα. Τελικά όλοι περνάνε από το ταμείο για να πληρώσουν για τις υπηρεσίες που τους προσφέρθηκαν.

Με βάση την παραπάνω περιγραφή, ο κύκλος ζωής της οντότητας πελάτη απεικονίζεται με το παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.1.).



Σχήμα 3.1. Κύκλος Ζωής της οντότητας «Πελάτη»

Αντίθετα, στο Σχήμα 3.2. φαίνεται η πορεία ενός συγκεκριμένου πελάτη Α, ο οποίος έχει ως σκοπό τη φωτοτύπηση και τη βιβλιοδεσία, και ενός πελάτη Β που επιθυμεί μόνο την εκτύπωση ενός αρχείου.



Σχήμα 3.2. Πιθανές πορείες πελατών του φωτοτυπικού κέντρου

Είναι φανερό ότι ο κύκλος ζωής αφορά όλες τις πιθανές πορείες που μπορεί να ακολουθήσει μια κατηγορία οντότητας, ενώ η πορεία αφορά το μονοπάτι που θα ακολουθήσει μια συγκεκριμένη οντότητα μέσα στο μοντέλο, με βάση τα χαρακτηριστικά της (στο παράδειγμά μας, το «Σκοπό Επίσκεψης» της κάθε οντότητας «Πελάτη»).

3.5.4. Χαρακτηριστικά οντοτήτων

Κάθε συγκεκριμένη οντότητα μιας κατηγορίας μπορεί να περιγράφεται από διάφορες ιδιότητες, οι οποίες παρέχουν επιπλέον πληροφορίες για τη μοντελοποίηση της πορείας και συμπεριφοράς της μέσα στο σύστημα. Αυτές οι ιδιότητες ονομάζονται χαρακτηριστικά των οντοτήτων.

Χαρακτηριστικό είναι μια πληροφορία που περιγράφει συγκεκριμένες οντότητες και επιτρέπει να διακρίνουμε μεταξύ οντοτήτων του ίδιου τύπου που διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν με το σύστημα

Όπως είδαμε στις προηγούμενες ενότητες, τα χαρακτηριστικά των οντοτήτων είναι χρήσιμα σε ζητήματα όπως:

- Ομαδοποίηση οντοτήτων. Ο αναλυτής αποφασίζει εάν πρέπει οντότητες να συγχωνευτούν, ομαδοποιηθούν ή τυχόν διαφορετικής μεταχείρισης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Για παράδειγμα, σε ένα κομμωτήριο μια οντότητα «Κομμώτρια» μπορεί να έχει το χαρακτηριστικό «Εμπειρία», με πιθανές τιμές «Νέα» ή «Έμπειρη», αν αυτό είναι κάτι που καθορίζει κατά πόσο είναι αποδοτική στην εργασία της (για παράδειγμα, επηρεάζει το χρόνο εξυπηρέτησης μιας οντότητας «Πελάτη») - αν όχι, αυτό το χαρακτηριστικό είναι περιττό για την προσομοίωση.
- Έλεγχος και πρόβλεψη της συμπεριφοράς της οντότητας. Τα χαρακτηριστικά μιας οντότητας καθορίζουν πως θα κινηθεί η οντότητα μέσα στο σύστημα. Στο παραπάνω παράδειγμα του κομμωτηρίου, οι πελάτισσες μπορούν να χαρακτηριστούν από την υπηρεσία που επιθυμούν (π.χ. χτένισμα, κούρεμα ή βαφή) γιατί με βάση το χαρακτηριστικό αυτό («Σκοπός Επίσκεψης») θα ακολουθήσουν διαφορετική πορεία μέσα στο σύστημα.
- Έλεγχος της συμπεριφοράς της οντότητας σε ουρές. Τα χαρακτηριστικά μιας οντότητας μπορούν επίσης να καθορίζουν τη συμπεριφορά της σε ουρές αναμονής, για παράδειγμα καθορίζοντας παραμέτρους όπως την ανεκτικότητα

της οντότητας και την προτεραιότητά της. Για παράδειγμα, στην αίθουσα αναμονής ενός νοσοκομείου, κάποια περιστατικά έχουν προτεραιότητα και επομένως οι οντότητες «Ασθενής» πρέπει να χαρακτηρίζονται από το πόσο επείγον είναι το περιστατικό τους ώστε να τύχουν ανάλογης μεταχείρισης στο μοντέλο της προσομοίωσης. Επίσης, αναμονή πάνω από κάποια λεπτά σε μια στάση λεωφορείου ίσως να κάνει κάποιους επιβάτες να χρησιμοποιήσουν άλλο μέσο και έτσι να εξέλθουν από το σύστημα της στάσης χωρίς να εξυπηρετηθούν.

Τέλος, πρέπει να επισημάνουμε ότι η απόδοση συγκεκριμένων τιμών στα χαρακτηριστικά κάθε συγκεκριμένης οντότητας γίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις με δειγματοληψία τιμής από κάποια στατιστική κατανομή. Για παράδειγμα, στο σύστημα του φωτοτυπείου που είδαμε νωρίτερα και στο οποίο οι οντότητες «Πελάτης» έχουν σκοπό την εκτύπωση με πιθανότητα 15% και σκοπό τη φωτοτύπηση με πιθανότητα 85%, το χαρακτηριστικό «Σκοπός Επίσκεψης» για κάθε συγκεκριμένο πελάτη που μπαίνει στο σύστημα κατά την προσομοίωση του θα παίρνει τιμή «Εκτύπωση» ή «Φωτοτύπηση» από δειγματοληψία σε μια ομοιόμορφη κατανομή με πιθανότητες 0,15 και 0,85 αντίστοιχα.

3.6. Λειτουργίες ενός Συστήματος

3.6.1. Η κατάσταση του συστήματος

Η μοντελοποίηση ενός συστήματος έχει σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του και τον πειραματισμό. Πρέπει όμως η παρατήρηση να βασίζεται σε ένα κοινώς αποδεκτό και σταθερό τρόπο ελέγχου της κατάστασης ανά πάσα στιγμή.

Η κατάσταση του συστήματος είναι ένα στιγμιότυπό του, το οποίο περιγράφει πλήρως το σύστημα σε κάθε χρονική στιγμή, καταγράφοντας την κατάσταση όλων των οντοτήτων του (τις θέσεις τους στο σύστημα, την τρέχουσα δραστηριότητά τους και τις τιμές που έχουν τα χαρακτηριστικά τους), καθώς και τις τιμές που παίρνουν οι γενικές παράμετροι του συστήματος (για παράδειγμα, ο τρέχων χρόνος της προσομοίωσης).

Σε κάθε χρονική στιγμή, ένα σύστημα μπορεί να βρίσκεται είτε σε σταθερή είτε σε μεταβατική κατάσταση. Παρόλο που ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο καταστάσεων είναι μάλλον ποιοτικός και υποκειμενικός, παραμένει πολύ σημαντικός για τη σωστή μοντελοποίηση συστημάτων:

- Στην περίοδο κατά την οποία ένα σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση συμβαίνουν μεν αλλαγές στο σύστημα, όμως αυτές δε μεταβάλλουν τη συνολική εικόνα του, εκτός ενός σταθερού και συγκεκριμένου εύρους. Σταθερή μπορεί, για παράδειγμα, να θεωρηθεί η κατάσταση ενός αεροσκάφους, κατά την πτήση του πάνω από τον Ατλαντικό. Το αεροσκάφος έχει αποκτήσει το συνιστώμενο ύψος, την κατάλληλη ταχύτητα και διεύθυνση, και οι αλλαγές που συμβαίνουν είναι περιορισμένες και δεν προκαλούν σημαντικές μεταβολές. Αντίστοιχα, σε μια τράπεζα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι μετά την πρώτη μισή ώρα λειτουργίας της ο αριθμός των πελατών που περιμένουν στην ουρά κυμαίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ 5 και 15, χωρίς να παρατηρείται συνεχής αύξηση του μέσου μήκους ουράς κατά το διάστημα της ημέρας. Πρέπει να τονιστεί ότι η σταθερή κατάσταση δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν μεταβολές στο σύστημα. Απλά, οι μεταβολές που συμβαίνουν είναι προβλέψιμες και μπορούν να ενταχθούν σε ένα σχετικά περιορισμένο φάσμα τιμών. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι η κατάσταση αυτή αντιπροσωπεύει καλύτερα το σύστημα, δηλαδή αντιστοιχεί στη συνηθισμένη ή τυπική λειτουργία του.
- Στην περίοδο που το σύστημα δε βρίσκεται στην τυπική του κατάσταση, θεωρείται ότι διέρχεται από μεταβατικές καταστάσεις. Μεταβατική κατάσταση παρατηρείται συνήθως σε ένα σύστημα στην εκκίνηση ή στο τέλος της λειτουργίας του ή σε σημεία μετάβασης από μια τυπική λειτουργία σε μια άλλη. Στην παραπάνω περίπτωση του αεροπλάνου, μεταβατική κατάσταση αποτελεί η απογείωση και η προσγείωση. Στην περίπτωση μιας τράπεζας, μεταβατική κατάσταση μπορεί να είναι τα πρώτα λεπτά μετά το άνοιγμα της, όταν ακόμα δεν έχει προλάβει να εισέλθει στο σύστημα ο τυπικός μέσος αριθμός πελατών και έτσι η τράπεζα είναι σχετικά πιο άδεια από ότι συνήθως.

Στην προσομοίωση, είναι σημαντικό να αναγνωρίζουμε πότε ένα σύστημα είναι σε μεταβατική κατάσταση γιατί μπορεί να θέλουμε είτε να μην μελετήσουμε την κατάσταση αυτή καθόλου, είτε να τη μελετήσουμε ξεχωριστά. Για παράδειγμα, στη μοντελοποίηση πτήσεων, η ανάλυση του τι συμβαίνει κατά τις διαδικασίες της απογείωσης και προσγείωσης είναι απολύτως απαραίτητη και πρέπει να γίνει ξεχωριστά από τη μοντελοποίηση της κύριας πτήσης. Αντίθετα, στην τράπεζα μπορεί να θέλουμε να υπολογίσουμε το μέσο μήκος ουράς στα ταμεία μόνο για το χρονικό

διάστημα στο οποίο το σύστημα είναι σε σταθερή κατάσταση, γιατί αλλιώς μπορεί να υπο-εκτιμούμε συστηματικά το πραγματικό μέγεθος (εισάγοντας στο δείγμα μας και μετρήσεις την ώρα που η τράπεζα είναι σχετικά άδεια). Αντίστοιχα, σε ένα εστιατόριο ίσως δε χρειάζεται να μοντελοποιηθεί καθόλου η λειτουργία του σε ώρες μη αιχμής (μεταβατική κατάσταση, όπου το εστιατόριο έχει λίγους πελάτες) αν αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να δούμε τη δυνατότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται στο φόρτο πελατών που έχει τις ώρες αιχμής του μεσημεριανού και του βραδινού φαγητού (σταθερή κατάσταση, όπου το εστιατόριο λειτουργεί κανονικά και εκεί μπορεί να εντοπίζονται προβλήματα εξυπηρέτησης πελατών).

3.6.2. Γεγονότα και δραστηριότητες

- Δραστηριότητα είναι οποιαδήποτε ενέργεια έχει χρονική διάρκεια και προκαλεί αλλαγές στο σύστημα.
- Γεγονός είναι οποιαδήποτε ενέργεια προκαλεί αλλαγές στο σύστημα αλλά δεν έχει χρονική διάρκεια.
- Μια δραστηριότητα οριοθετείται από δυο γεγονότα: το γεγονός έναρξής της και το γεγονός τέλους της.

Σε κάθε δραστηριότητα εμπλέκονται μια ή περισσότερες οντότητες ίδιου ή διαφορετικού τύπου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός μπαρ και ειδικότερα στη δραστηριότητα «Σερβίρισμα Ποτού» εμπλέκονται η οντότητα «Σερβιτόρος» και η οντότητα «Πελάτης» (καθώς και πιθανά άλλες οντότητες, όπως «Ποτήρι», «Μπουκάλι» κλπ, αν στην προσομοίωση μας έχουμε συμπεριλάβει τέτοιο επίπεδο λεπτομέρειας).

Εάν λείπει (δεν είναι διαθέσιμη) έστω και μία από τις οντότητες που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση μιας δραστηριότητας, τότε η δραστηριότητα δεν μπορεί να ξεκινήσει και οι υπόλοιπες οντότητες πρέπει να περιμένουν σε κάποια ουρά αναμονής.

Η διάρκεια μιας δραστηριότητας είναι προβλέψιμη, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις στοχαστική και συνήθως παίρνει τιμές από δειγματοληψία σε κάποια στατιστική κατανομή. Έτσι, για παράδειγμα, η δραστηριότητα «Σερβίρισμα Ποτού» μπορεί να διαρκεί από 1 έως 3 λεπτά ομοιόμορφα ή κανονικά κατανεμημένα.

Τα γεγονότα που καθορίζουν την αρχή και το τέλος δραστηριοτήτων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (ανεξάρτητα και εξαρτημένα):

- Με τον όρο ανεξάρτητο γεγονός εννοούμε ένα γεγονός του οποίου η πραγμάτωση δεν εξαρτάται από άλλα γεγονότα, παρά μόνο από το χρόνο. Τα γεγονότα τέλους μιας δραστηριότητας είναι ανεξάρτητα για την προσομοίωση: από τη στιγμή που θα ξεκινήσει μια δραστηριότητα είναι μόνο θέμα χρόνου να τελειώσει.
- Με τον όρο εξαρτημένο γεγονός εννοούμε ένα γεγονός που για να συμβεί προϋποθέτει την εμφάνιση άλλου (ή άλλων) γεγονότων. Τα γεγονότα έναρξης μιας δραστηριότητας είναι εξαρτημένα για την προσομοίωση: για να ξεκινήσει μια δραστηριότητα πρέπει γενικά να τελειώσουν πρώτα κάποιες άλλες και επομένως δεν μπορεί να προβλεφθεί ο χρόνος έναρξης άμεσα (για παράδειγμα, για να ξεκινήσει το σερβίρισμα ενός ποτού στο μπαρ πρέπει να έρθει πελάτης για να παραγγείλει και να είναι διαθέσιμος ο μπάρμαν για να πάρει την παραγγελία).

3.7. Ουρές

Όπως έχουμε πει, η προσομοίωση ασχολείται κατά κύριο λόγο με τη μοντελοποίηση και την ανάλυση συστημάτων που παρουσιάζουν συμπεριφορές και χαρακτηριστικά ουρών. Οι ουρές αποτελούν σημεία συσσώρευσης οντοτήτων σε ένα σύστημα. Για παράδειγμα σε ένα fast food οι πελάτες συσσωρεύονται στις ουρές των ταμείων για να δώσουν και να παραλάβουν την παραγγελία τους, αυτοκίνητα συσσωρεύονται σε ένα κόκκινο φανάρι, αρχεία προς εκτύπωση από ένα δίκτυο χρηστών συσσωρεύονται σε έναν κοινό εκτυπωτή, κλπ.

Τα κύρια στοιχεία μιας ουράς είναι οι πελάτες και οι εξυπηρετητές. Ως πελάτες μπορούν να θεωρηθούν άνθρωποι, πληροφορίες, οχήματα και γενικότερα οτιδήποτε φθάνει σε ένα σημείο εργασίας και προσδοκά να εξυπηρετηθεί. Ως εξυπηρετητές μπορούν να θεωρηθούν υπάλληλοι, διάδρομοι προσγείωσης, υπολογιστές και εκτυπωτές και γενικά όποιες οντότητες εξυπηρετούν τις οντότητες-πελάτες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν έρχεται πάντα ο πελάτης στον εξυπηρετητή. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι εξυπηρετητές είναι αυτοί που προσεγγίζουν πρακτικά τους πελάτες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της οδικής βοήθειας, οι τεχνικοί είναι αυτοί που θα προσεγγίσουν το χαλασμένο αυτοκίνητο (η ουρά σε αυτή την περίπτωση είναι η λίστα χαλασμένων αυτοκινήτων που βρίσκεται στη διάθεση των τεχνικών και περιμένει - αν και όχι στο ίδιο μέρος - να εξυπηρετηθεί).

Η μοντελοποίηση ουρών, αποτελεί ένα ισχυρό μέσο σχεδιασμού και αξιολόγησης της απόδοσης συστημάτων, ιδιαίτερα σε προβλήματα διοικητικής επιστήμης. Πιο συγκεκριμένα, μετρούνται τιμές όπως ο βαθμός χρήσης των εξυπηρετητών, το μέσο μήκος των ουρών, ο μέσος χρόνος αναμονής των πελατών, κλπ.

Το φαινόμενο των ουρών, σε ότι αφορά την προσομοίωση, παρατηρείται σε ένα σύστημα όταν οι οντότητες απαιτούν εγκαταστάσεις ή εξυπηρετητές που χρησιμοποιούνται προς το παρόν από άλλες οντότητες, ή δεν υπάρχει διαθεσιμότητα των πόρων που χρειάζονται για τη λειτουργία τους. Παράδειγμα αποτελεί το τρενάκι του λούνα παρκ, όπου το παιχνίδι δεν ξεκινά αν δεν έχουν συμπληρωθεί αρκετές θέσεις (ή, αντίθετα, όπου πελάτες πρέπει να περιμένουν αν το τρενάκι γεμίσει). Σε άλλες περιπτώσεις, οι οντότητες για να συνεχίσουν την πορεία τους, πρέπει να περιμένουν την άδεια από άλλο στοιχείο του συστήματος. Καθημερινό παράδειγμα αποτελεί ο σχηματισμός ουρών στους δρόμους. Οι οντότητες «αυτοκίνητα» περιμένουν, δημιουργώντας ουρές, την άδεια από τα φανάρια για να συνεχίσουν την πορεία τους.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό μιας ουράς που έχει σημασία κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης είναι η πειθαρχία της ουράς. Η πειθαρχία μιας ουράς καθορίζει την προτεραιότητα που έχουν οι οντότητες-πελάτες για εξυπηρέτηση σε σχέση με άλλες οντότητες. Οι περισσότερες ουρές ακολουθούν προτεραιότητα First-In-First-Out (FIFO): η σειρά εισόδου στην ουρά καθορίζει και τη σειρά εξυπηρέτησης. Άλλη σχετικά συνηθισμένη πειθαρχία είναι η Last-In-First-Out (LIFO), στην οποία ο τελευταίος πελάτης που εισέρχεται στην ουρά εξυπηρετείται πρώτος (για παράδειγμα, χώρος στάθμευσης αυτοκινήτων σε ένα ferry-boat όπου τα αυτοκίνητα που εισάγονται τελευταία, θα είναι τα πρώτα που θα εξέλθουν). Άλλες πειθαρχίες είναι η Service-In-Random-Order (SIRO), στην οποία οι πελάτες εξυπηρετούνται με τυχαία σειρά (π.χ. σε επιλογή επόμενου ασθενή προς εξέταση από γιατρό), η Shortest-Processing-Time-First (SPTF) όπου προτιμάται πρώτα ο πελάτης που εκτιμάται ότι θα χρειαστεί το λιγότερο χρόνο εξυπηρέτησης (για παράδειγμα, στα ταμεία του σουπερ μάρκετ προηγούνται οι πελάτες με λίγα προϊόντα στο καλάθι αγορών) και η πειθαρχία Service-According-To-Priority (PR) στην οποία αποφασίζεται τι θα προηγηθεί με βάση ένα προκαθορισμένο χαρακτηριστικό ανάλογα με το σύστημα (π.χ. σπουδαιότητα μιας βλάβης, κρισιμότητα κατάστασης ασθενούς, κτλ). Πολλές ουρές λειτουργούν στην πράξη με συνδυασμό των

παραπάνω πρακτικών πειθαρχίας. Για παράδειγμα, η ουρά στα ταμεία ενός σούπερ μάρκετ ακολουθεί βασικά την πειθαρχία FIFO, ενώ μπορεί να υπάρχει SPTF πειθαρχία σε μερικά μόνο ταμεία ή PR πειθαρχία για μερικές κατηγορίες πελατών (π.χ. ηλικιωμένα άτομα, έγκυες).

Σε πολλές περιπτώσεις ουρών υπάρχει όριο στον αριθμό των πελατών-οντοτήτων που μπορούν να περιμένουν για εξυπηρέτηση. Σημαντική ιδιότητα είναι, λοιπόν, η χωρητικότητα μιας ουράς. Αυτή μπορεί να είναι απεριόριστη ή περιορισμένη. Στη δεύτερη περίπτωση, το πλήθος των οντοτήτων που μπορούν να περιμένουν ταυτόχρονα εξαρτάται συνήθως από το διαθέσιμο χώρο, είτε φυσικός είτε νοητικός είναι αυτός. Για παράδειγμα, στη μνήμη ενός εκτυπωτή μπορούν να συνυπάρξουν περιορισμένα αρχεία ανάλογα με το μέγεθος του buffer του εκτυπωτή.

Παράλληλα, οι πελάτες της ουράς μπορεί να έχουν δικά τους κριτήρια που καθορίζουν τη στάση τους κατά την αναμονή, οπότε πρόκειται για ουρές με αποθάρρυνση. Συνήθως, η αποθάρρυνση αφορά το μέγιστο αποδεκτό χρόνο αναμονής σε μια ουρά. Για παράδειγμα, στο ταχυδρομείο, κάποιος πελάτης που δεν επείγεται, είναι πιθανό να αποχωρήσει από την ουρά σε περίπτωση που υπολογίζει ότι θα περιμένει πάνω από κάποια λεπτά ή αν αντιληφθεί ότι η ουρά κινείται με πολύ αργό ρυθμό.

Τέλος, είναι σημαντικό να προσδιορίζονται οι αρχικές συνθήκες της ουράς. Με τον όρο αρχικές συνθήκες εννοείται ο αρχικός αριθμός πελατών στην ουρά, η διαθεσιμότητα των εξυπηρετητών, η απόδοσή τους, κτλ. Οι αρχικές συνθήκες της ουράς καθορίζουν και τις αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, ενώ είναι λογικό να υποτεθεί ότι όλες οι ουρές είναι αρχικά άδειες το πρωί όταν ανοίγει μια τράπεζα, δεν ισχύει το ίδιο σε ένα συνεργείο αυτοκινήτων, όπου υπάρχει πιθανότητα να είναι ήδη συσσωρευμένα αυτοκίνητα σε αναμονή από τις προηγούμενες ημέρες. Επίσης υπάρχει περίπτωση οι μηχανικοί να είναι δεσμευμένοι σε κάποια προηγούμενη εργασία ή να είναι ελεύθεροι για τις νέες που θα προκύψουν.

Η μοντελοποίηση ουρών μέσω προσομοίωσης είναι σε θέση να απαντήσει γρήγορα και εύκολα σε ζητήματα Διοικητικής Επιστήμης, τα οποία αν αντιμετωπίζονταν με μαθηματικές μεθόδους θα αποδεικνύονταν χρονοβόρα και επίπονα. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων των συστημάτων που μελετώνται, μας απασχολεί η ελαχιστοποίηση του μέσου χρόνου παραμονής στις ουρές και η μελέτη διάφορων

εναλλακτικών για την επίτευξή της. Επίσης, αποτελεί σημαντική ευκαιρία για κάθε επιχείρηση να γνωρίζει τις συνέπειες στην εξυπηρέτηση πελατών της από την αυξομείωση των πόρων και υπαλλήλων της, οπότε να επιλέγει τη βέλτιστη επένδυση σε αυτά σύμφωνα με το κόστος και την ωφέλεια που θα της προσφέρει.

Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι για τη μελέτη και βελτίωση συστημάτων που περιέχουν ουρές αναπτύχθηκε η μαθηματική θεωρία ουρών. Η θεωρία στηρίζεται σε μοντέλα που υπολογίζουν το μέσο χρόνο αναμονής στη ουρά, την αναλογία χρόνου κατά την οποία ο εξυπηρετητής είναι απασχολημένος και άλλες παραμέτρους. Στόχος της θεωρίας είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν τα συστήματα ουρών αναμονής, έτσι ώστε να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα που θα συμβάλλουν στη βελτίωσή τους. Η θεωρία ουρών μπορεί να δώσει αναλυτικές και ακριβείς προβλέψεις για τη συμπεριφορά μιας ουράς, αν είναι γνωστός ο ρυθμός εισόδου πελατών σε αυτή και ο ρυθμός εξυπηρέτησής τους. Δυστυχώς όμως έχει εφαρμογή μόνο σε απλές ουρές, ενώ σε πιο σύνθετα συστήματα όπου δημιουργούνται πολλαπλές αλληλοσυσχετιζόμενες ουρές η μελέτη μπορεί να γίνει μόνο με τη βοήθεια προσομοίωσης.

3.8. Παραδείγματα Μοντελοποίησης

Στην παρακάτω ενότητα θα εξετάσουμε ένα πλήθος συστημάτων και τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να προσεγγιστεί η μοντελοποίησή τους έτσι ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα τις έννοιες που αναλύθηκαν στα προηγούμενα.

3.8.1. Κομμωτήριο

Το σύστημα

Ένα κομμωτήριο έχει πελάτισσες που θέλουν κούρεμα (με πιθανότητα 30%), βαφή (50%) ή χτένισμα (20%). Όσες θέλουν κούρεμα ή βαφή, στη συνέχεια χρειάζονται και χτένισμα. Οι κομμώτριες είναι εξειδικευμένες σε μια μόνο δουλειά. Μετά το χτένισμα, 20% των πελατισσών θέλουν και περιποίηση νυχιών και εξυπηρετούνται από τη μανικιουρίστα. Πριν φύγουν, οι πελάτισσες πληρώνουν στο ταμείο.

1. Δώστε τη λίστα περιγραφής (οντότητες-χαρακτηριστικά, δραστηριότητες) του συστήματος.
2. Σχεδιάστε το διάγραμμα ροής του συστήματος.

Μοντελοποίηση

Στο σύστημα «Κομμωτήριο» οντότητες αποτελούν οι «πελάτισσες» και οι «κομμώτριες» με τις αντίστοιχες ειδικεύσεις τους, η «μανικιουρίστα» και το «ταμείο». Οι κομμώτριες ειδικεύονται σε μία μόνο δουλειά που μπορεί να είναι είτε το κούρεμα, είτε το χτένισμα είτε η βαφή. Το γεγονός αυτό επηρεάζει το σύστημα, οπότε είναι ανάγκη οι κομμώτριες να χωριστούν σε τρεις επιμέρους διαφορετικές οντότητες, μια για κάθε ειδικευση. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι κάποιες δραστηριότητες είναι κοινές για διαφορετικές οντότητες. Πιο συγκεκριμένα, οι δραστηριότητες «χτένισμα», «κούρεμα» και «βαφή» εμπλέκουν τόσο την πελάτισσα, όσο και τις αντίστοιχες κομμώτριες. Η οντότητα «πελάτισσα» εμπλέκεται σε όλες τις δραστηριότητες ενώ κάθε μία από τις άλλες οντότητες εμπλέκεται (μαζί με την πελάτισσα) σε μία μόνο δραστηριότητα.

Από την εκφώνηση είναι δεδομένο ότι οι πελάτισσες πληρώνουν στο ταμείο πριν την αποχώρησή τους από το κομμωτήριο. Δεν ξεκαθαρίζεται όμως εάν υπάρχει ταμίας για τη δραστηριότητα «πληρωμή» ή αν οι υπάλληλοι του κομμωτηρίου αναλαμβάνουν πέρα από τα εξειδικευμένα τους καθήκοντα και αυτό της πληρωμής. Έτσι λοιπόν γίνονται οι εξής δύο υποθέσεις:

- a) Αρχικά γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχει ταμίας στο κομμωτήριο, ο οποίος αναλαμβάνει τις πληρωμές. Ο Πίνακας επίλυσης 3.1. σε αυτή την περίπτωση φαίνεται παρακάτω:

Οντότητες	Χαρακτηριστικά	Δραστηριότητες
Πελάτισσα	Σκοπός επίσκεψης (χτένισμα/ κούρεμα/ βαφή/ μανικιούρ)	<ul style="list-style-type: none"> • Άφιξη • Χτένισμα • Βαφή • Κούρεμα • Μανικιούρ • Πληρωμή
Κομμώτρια (χτένισμα)	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	Χτένισμα
Κομμώτρια (βαφή)	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	Βαφή
Κομμώτρια (κούρεμα)	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	Κούρεμα
Μανικιουρίστα	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	Μανικιούρ
Ταμίας		Πληρωμή

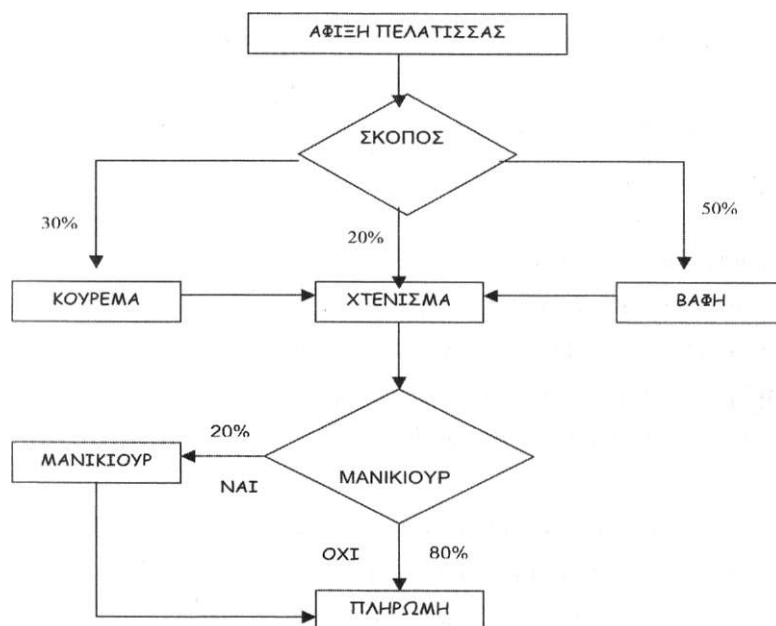
Πίνακας 3.1. Λίστα περιγραφής συστήματος «Κομμωτήριο» (1η περίπτωση)

- b) Σε αυτή την περίπτωση γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει ταμίας, αλλά η κομμώτρια του χτενίσματος και η μανικιουρίστα (που είναι οι οντότητες που έχουν την τελευταία επαφή με τις πελάτισσες) αναλαμβάνουν την πληρωμή από τις πελάτισσες. Ο Πίνακας επίλυσης 3.2. είναι ο εξής:

Οντότητες	Χαρακτηριστικά	Δραστηριότητες
Πελάτισσα	Σκοπός επίσκεψης (χτένισμα/ κούρεμα/ βαφή/ μανικιούρ)	<ul style="list-style-type: none"> Αφιξη Χτένισμα Βαφή Κούρεμα Μανικιούρ Πληρωμή
Κομμώτρια (χτένισμα)	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	<ul style="list-style-type: none"> Χτένισμα Πληρωμή
Κομμώτρια (βαφή)	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	Βαφή
Κομμώτρια (κούρεμα)	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	Κούρεμα
Μανικουρίστα	Εμπειρία (νέα/ έμπειρη)	<ul style="list-style-type: none"> Μανικιούρ Πληρωμή
Ταμείο		Πληρωμή

Πίνακας 3.2. Λίστα περιγραφής συστήματος «Κομμωτήριο» (2η περίπτωση)

Πρέπει να σημειωθεί ότι και σε αυτή την περίπτωση έχουμε συμπεριλάβει μια οντότητα «Ταμείο» προκειμένου να εξασφαλίσουμε το γεγονός ότι, εφόσον το κομμωτήριο διαθέτει π.χ. μια μόνο ταμειακή μηχανή, δεν μπορεί να εξυπηρετείται σε πληρωμή πάνω από μια πελάτισσα κάθε χρονική στιγμή. Το διάγραμμα ροής του συστήματος «Κομμωτήριο» φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής στην περίπτωση «Κομμωτήριο»

3.8.2. Στάση λεωφορείου Το σύστημα

Επιβάτες έρχονται και περιμένουν σε μια στάση λεωφορείου, εκτός αν το μήκος της ουράς υπερβαίνει ένα ορισμένο μέγεθος. Όταν φτάνει το λεωφορείο, οι επιβάτες ανεβαίνουν ένας-ένας σε αυτό. Δώστε τη λίστα περιγραφής (οντότητες, χαρακτηριστικά, δραστηριότητες) του συστήματος.

Μοντελοποίηση

Στο συγκεκριμένο σύστημα οντότητες είναι οι «επιβάτες» και το «λεωφορείο». Η ουρά στη στάση όπως και καμία ουρά γενικότερα δεν μοντελοποιείται ως οντότητα, καθώς λειτουργεί ως σημείο συσσώρευσης, ως ένας αποθηκευτικός χώρος δηλαδή για τη μέτρηση του χρόνου αναμονής λόγω έλλειψης του πόρου (λεωφορείο).

Από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται παραπάνω, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το εάν τελικά εξυπηρετήθηκε ο επιβάτης. Το χαρακτηριστικό αυτό εισάγεται επειδή έχουμε ως δεδομένο ότι οι επιβάτες αποφασίζουν να μείνουν και να περιμένουν στην ουρά, μόνο αν η ουρά δεν ξεπερνά κάποιο μέγιστο ανεκτό μέγεθος. Το μέγιστο ανεκτό μέγεθος ουράς είναι ο μέγιστος αριθμός ατόμων στην ουρά που ανέχεται ο επιβάτης για να δεχτεί να περιμένει στην ουρά. Σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα άτομα από το «όριο» αυτό, ο επιβάτης φεύγει χωρίς να περιμένει. Με την παραπάνω λογική ερώτηση εννοούμε εάν τελικά ο πιθανός επιβάτης περίμενε στην ουρά ή έφυγε προτού έρθει το λεωφορείο.

Τέλος, θεωρούμε ότι η αποβίβαση και επιβίβαση των επιβατών έχει διάρκεια, γι' αυτό και τις μοντελοποιούμε ως δραστηριότητες. Μάλιστα, οριοθετούνται από την έναρξη και λήξη τους που θεωρούνται ως γεγονότα.

Είναι σημαντικό να κατανοήσει κανείς τι εννοούμε με τον όρο «επιβίβαση επιβάτη» και τι με τον όρο «αποβίβαση επιβατών» και επιπλέον, γιατί στην μία περίπτωση χρησιμοποιούμε πληθυντικό, ενώ στην άλλη ενικό αριθμό. Αναφέρουμε, λοιπόν, ότι σκοπός της προσομοίωσης είναι η μελέτη των επιβατών που βρίσκονται στην ουρά πριν καταφέρουν να μπουν στο λεωφορείο. Αυτοί οι επιβάτες αποτελούν οντότητες του συστήματος. Άρα μας ενδιαφέρει η επιβίβαση κάθε επιβάτη ξεχωριστά (ως οντότητα), ενώ αντιθέτως η αποβίβαση επιβατών δε μας ενδιαφέρει με αυτόν τον τρόπο. Θεωρούμε όλους τους επιβάτες που βρίσκονται ήδη στο λεωφορείο και αποβιβάζονται ως ένα ενιαίο σύνολο και όχι ως οντότητες. Έτσι, θεωρούμε την αποβίβαση ως δραστηριότητα με διάρκεια που πρέπει να μοντελοποιηθεί (αφού

η αποβίβαση των προηγούμενων επιβατών θα καθυστερήσει την επιβίβαση στο λεωφορείο των επιβατών που μας ενδιαφέρουν) χωρίς όμως να μας ενδιαφέρει να τη μελετήσουμε αναλυτικά. Τελικά ο Πίνακας 3.3. περιγράφει το πώς διαμορφώνεται το σύστημα.

Οντότητες	Χαρακτηριστικά	Δραστηριότητες
Επιβάτης	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Μέγιστο ανεκτό μέγεθος ουράς ▪ Τελικά εξυπηρετήθηκε; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Άφιξη επιβάτη ▪ Επιβίβαση επιβάτη
Λεωφορείο	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Κενές θέσεις 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Άφιξη λεωφορείου ▪ Αποβίβαση επιβατών ▪ Επιβίβαση επιβάτη

Πίνακας 3.3. Λίστα περιγραφής συστήματος «Στάση λεωφορείου»

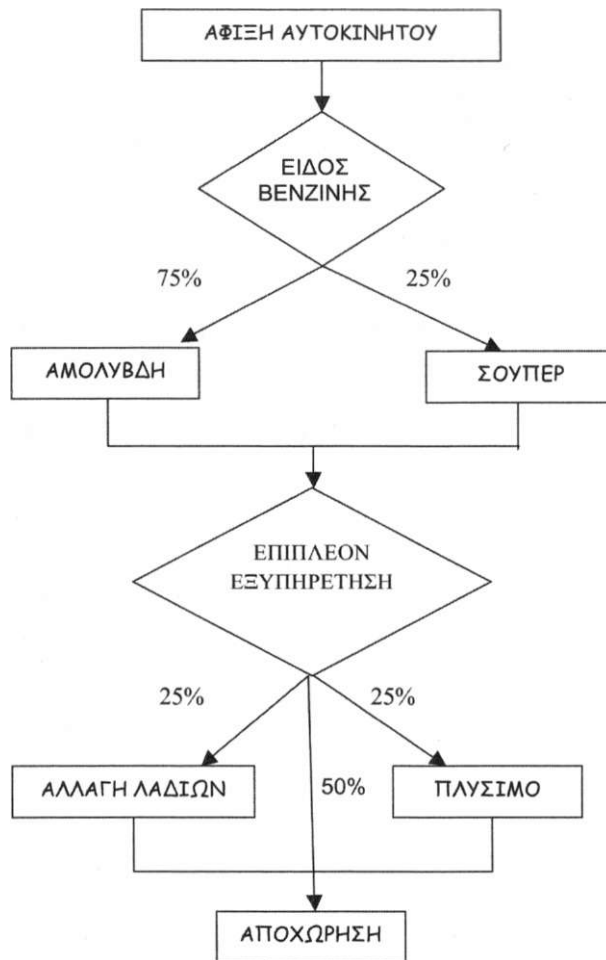
3.8.3. Βενζινάδικο

Το σύστημα

Αυτοκίνητα έρχονται σε ένα βενζινάδικο για βενζίνη, αλλαγή λαδιών, πλύσιμο. Υπάρχουν δυο τύποι βενζίνης: αμόλυβδη και σούπερ. Τα αυτοκίνητα έρχονται ανά 5 λεπτά κατά μέσο όρο. Το 75% θέλει αμόλυβδη βενζίνη. Μετά το γέμισμα, 25% των αυτοκινήτων αλλάζουν λάδια, 25% πλένονται, ενώ 50% απλώς φεύγουν. Μέσοι χρόνοι: 5 λεπτά για γέμισμα, 10 λεπτά για πλύσιμο, 15 λεπτά για λάδια. Δώστε τη λίστα περιγραφής (οντότητες, χαρακτηριστικά, δραστηριότητες) του συστήματος. Τι άλλα στοιχεία θα θέλατε προκειμένου να προσομοιώσετε το σύστημα;

Μοντελοποίηση

Το διάγραμμα ροής του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα ροής στην περίπτωση «Βενζινάδικο»

Στο σύστημα αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι, αν και υπάρχει η οντότητα «οδηγός» μέσα στο σύστημα, κατά την μοντελοποίηση θεωρούμε ότι αυτός μαζί το αυτοκίνητο αποτελούν μία οντότητα. Αυτό συμβαίνει για λόγους απλοποίησης, αφού ο οδηγός δεν παίζει ξεχωριστό ρόλο στο σύστημα. Θεωρούμε ότι το αυτοκίνητο καθορίζει τι τύπο βενζίνης δέχεται (κινητήρας) και εάν χρειάζεται πλύσιμο ή αλλαγή λαδιών.

Σχετικά με τους υπαλλήλους δε διευκρινίζεται εάν απασχολούνται σε μία συγκεκριμένη εργασία. Θεωρούμε λοιπόν ότι όλοι μπορούν να αποπερατώσουν όλες τις εργασίες. Όμως σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να θέσουμε κάποιες προτεραιότητες. Θα πρέπει να αποφασίσουμε εάν το «γέμισμα» θα εξυπηρετείται αμεσότερα σε σχέση με το πλύσιμο και την αλλαγή λαδιών ή θα ακολουθείται άλλη προτεραιότητα.

Σχετικά με το είδος της βενζίνης, παρατηρούμε ότι δε διευκρινίζεται εάν υπάρχουν διαφορετικές ουρές για κάθε αντλία.

Έτσι λοιπόν γίνονται οι εξής δύο υποθέσεις:

- a) Εάν γινόταν η παραδοχή ότι για κάθε είδος βενζίνης υπάρχει διαφορετική ουρά, θα χωρίζαμε και τη δραστηριότητα «γέμισμα» σε «γέμισμα με αμόλυβδη», «γέμισμα με super», κλπ. Τότε ο Πίνακας επίλυσης 3.4. θα είχε την εξής μορφή:

Οντότητες	Χαρακτηριστικά	Δραστηριότητες
Αυτοκίνητο	<ul style="list-style-type: none"> ■ Τύπος βενζίνης (super, αμόλυβδη) ■ Ανάγκη για πλύσιμο ■ Ανάγκη για αλλαγή λαδιών 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Άφιξη ■ Γέμισμα super ■ Γέμισμα αμόλυβδης ■ Πλύσιμο ■ Αλλαγή λαδιών
Αντλία super		Γέμισμα super
Αντλία αμόλυβδης		Γέμισμα αμόλυβδης
Υπάλληλος		<ul style="list-style-type: none"> ■ Γέμισμα super ■ Γέμισμα αμόλυβδης ■ Πλύσιμο ■ Αλλαγή λαδιών
Πλυντήριο		Πλύσιμο
Συνεργείο		Αλλαγή λαδιών

Πίνακας 3.4. Λίστα περιγραφής συστήματος «Βενζινάδικο» (1η περίπτωση)

- b) Με την παραδοχή ότι η αντλία παρέχει όλα τα είδη βενζίνης και τα αυτοκίνητα περιμένουν σε μία ουρά, ο Πίνακας επίλυσης 3.5. είναι ο παρακάτω:

Οντότητες	Χαρακτηριστικά	Δραστηριότητες
Αυτοκίνητο	<ul style="list-style-type: none"> ■ Τύπος βενζίνης (super, αμόλυβδη) ■ Ανάγκη για πλύσιμο ■ Ανάγκη για αλλαγή λαδιών 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Άφιξη ■ Γέμισμα ■ Πλύσιμο ■ Αλλαγή λαδιών
Αντλία	■ Είδος βενζίνης	Γέμισμα
Υπάλληλος		<ul style="list-style-type: none"> ■ Γέμισμα ■ Πλύσιμο ■ Αλλαγή λαδιών
Πλυντήριο		Πλύσιμο
Συνεργείο		Αλλαγή λαδιών

Πίνακας 3.5. Λίστα περιγραφής συστήματος «Βενζινάδικο» (2η περίπτωση)

3.9. Εμπειρικοί Κανόνες Μοντελοποίησης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η μοντελοποίηση είναι μια υποκειμενική δραστηριότητα, με την έννοια ότι δεν υπάρχει ένα μοναδικό μοντέλο για την απεικόνιση κάθε συστήματος. Πολλαπλές αναπαραστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το ίδιο σύστημα. Η άποψη, λοιπόν, ότι η μοντελοποίηση αποτελεί περισσότερο τέχνη παρά επιστήμη είναι σωστή και δικαιολογημένη. Γενικά πάντως, κατά τη μοντελοποίηση διακριτών δυναμικών συστημάτων είναι αναγκαίο να καθοριστούν:

- Ποιες οντότητες και ποια χαρακτηριστικά τους χρειάζονται για να αναπαραστήσουμε επαρκώς το σύστημα.
- Ποιες δραστηριότητες είναι αναγκαίες για να αναπαραστήσουν τις αλλαγές του συστήματος.

Η υποκειμενικότητα της μοντελοποίησης δε σημαίνει όμως ότι κάθε μοντέλο που μπορούμε να φτιάξουμε είναι και σωστό ή κατάλληλο για προσομοίωση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι κανόνες μοντελοποίησης διακριτών συστημάτων που είναι καλό να τηρούνται:

1. Ο αριθμός των εξυπηρετητών και των πόρων του συστήματος δεν αποτελεί χαρακτηριστικό της κάθε οντότητας, αλλά γενικό χαρακτηριστικό του συστήματος.
2. Η διαφοροποίηση υπαλλήλων και πόρων πρέπει να ελέγχεται. Εάν υπάρχουν ξεχωριστές ουρές για κάθε πόρο ή εξειδικευμένο προσωπικό, πρέπει να διαχωριστούν και οι αντίστοιχες δραστηριότητες, για παράδειγμα κούρεμα, χτένισμα, γέμισμα με αμόλυβδη, γέμισμα με super, κτλ.
3. Σε περίπτωση που κάποιοι εξυπηρετητές εμπλέκονται σε πολλές δραστηριότητες, τότε πρέπει να οριστούν προτεραιότητες εργασιών.
4. Συχνά, για λόγους απλούστευσης του μοντέλου, ενδείκνυται η συγχώνευση οντοτήτων, όπως για παράδειγμα οδηγός και αυτοκίνητο θεωρούνται ως μία οντότητα.
5. Οι ουρές σε καμία περίπτωση δε μοντελοποιούνται ως οντότητες.

3.10. Περίληψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν βασικές έννοιες για τη μοντελοποίηση διακριτών συστημάτων και σχετικά παραδείγματα. Αρχικά ορίσαμε τι είναι διακριτό σύστημα και ποια τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο αναλυτής για την

ανάλυση και τη μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων. Στη συνέχεια ορίστηκαν τα θεμελιώδη στοιχεία ενός συστήματος, δηλαδή οι οντότητες, τα χαρακτηριστικά τους, τα γεγονότα και οι δραστηριότητες. Στη συνέχεια παρουσιάσαμε τις ουρές και αναφέραμε τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Τέλος, παρατέθηκαν ορισμένα παραδείγματα μοντελοποίησης συστημάτων από όπου και προέκυψαν ορισμένοι εμπειρικοί κανόνες προσομοίωσης.

4. Ανάπτυξη Μοντέλων Διακριτών Συστημάτων

4.1. Εισαγωγή

Γενικά, σε ένα διακριτό μοντέλο, ένα ή περισσότερα από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, αλλάζουν τιμή ή κατάσταση σε διακριτές χρονικές στιγμές. Πρέπει να γίνει σαφές ότι τα περισσότερα συστήματα (αν όχι όλα), εμπεριέχουν και χαρακτηριστικά των οποίων η φύση είναι συνεχής. Για παράδειγμα, ένα σύστημα σιδηροδρομικών μεταφορών μπορεί να περιλαμβάνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Πλήθος ανθρώπων που βρίσκονται σε κάθε τρένο
- Πλήθος ανθρώπων που βρίσκονται στις στάσεις
- Θέση κάθε τρένου

Τα δύο πρώτα χαρακτηριστικά είναι εγγενώς διακριτά, δεδομένου ότι η τιμή τους μεταβάλλεται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (όταν καταφθάνουν τα τρένα στις στάσεις). Αντίθετα, η θέση των τρένων είναι ένα χαρακτηριστικό που μεταβάλλεται διαρκώς, δεδομένου ότι τα τρένα βρίσκονται σε συνεχή κίνηση (με εξαίρεση τις στάσεις). Ωστόσο, παρατηρείστε ότι τα δύο πρώτα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται μόνον όταν η θέση ενός οποιουδήποτε τρένου είναι σε κάποιο σημείο στάσης ή όταν ένας άνθρωπος αφίχθει σε κάποια στάση. Με άλλα λόγια, μας ενδιαφέρει η τιμή του εγγενώς συνεχούς χαρακτηριστικού, αλλά μόνο σε διακριτές χρονικές στιγμές.

Πολλές από τις εφαρμογές των διακριτών συστημάτων εμπεριέχουν μία ή περισσότερες ουρές. Μία δομή ουράς μπορεί να είναι εμφανής, όπως για παράδειγμα σε ένα σύστημα εξυπηρέτησης πελατών (τράπεζα, ταχυδρομείο, κλπ) ή όχι και τόσο εμφανής, όπως στο παράδειγμα του συστήματος σιδηροδρομικών μεταφορών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μπορεί να θεωρηθεί (αν και οπτικά δεν είναι τόσο εμφανές, αν επισκευθεί κανείς ένα σιδηροδρομικό σταθμό) ότι οι άνθρωποι που περιμένουν το τρένο δημιουργούν ένα πλήθος από ουρές, μία για κάθε βαγόκι επιβίβασης.

Γενικά τα διακριτά μοντέλα χαρακτηρίζονται από ένα πεπερασμένο πλήθος γεγονότων τα οποία μπορεί να συμβούν. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα εξυπηρέτησης πελατών, τα γεγονότα είναι τα εξής:

1. Άφιξη ενός πελάτη

2. Έναρξη/λήξη εξυπηρέτησης
3. Άνοιγμα/Κλείσιμο των θυρών (π.χ. τράπεζας) σε συγκεκριμένες ώρες

Για κάθε καθορισμένο γεγονός, θα πρέπει να καταγράφεται τι ακριβώς είναι πιθανό να συμβεί και ποιες θα είναι οι αντίστοιχες μεταβολές της κατάστασης του συστήματος. Για παράδειγμα, όταν ένας πελάτης εισέλθει στο σύστημα, είναι πιθανό:

1. Να βρει άδειο κάποιον εξυπηρέτη και να προχωρήσει για να εξυπηρετηθεί. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα αλλάζει κατάσταση, καθώς μειώνεται το πλήθος των διαθέσιμων εξυπηρετών κατά 1.
2. Να βρει όλες τις ουρές υπερβολικά γεμάτες και να αποχωρήσει αμέσως. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα δεν αλλάζει κατάσταση.
3. Να μην βρει διαθέσιμο εξυπηρέτη, οπότε να εισέλθει σε μία ουρά αναμονής, αλλάζοντας την κατάσταση του συστήματος (το μήκος της συγκεκριμένης ουράς αυξάνεται κατά 1).

Επίσης, για κάθε γεγονός, υπάρχουν ορισμένα στοιχεία τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Στην παραπάνω περίπτωση, η είσοδος του πελάτη για εξυπηρέτηση συνοδεύεται από έναν τυχαίο αριθμό, ο οποίος δείχνει το χρονικό διάστημα που διαρκεί αυτή η εξυπηρέτηση. Επίσης, η είσοδος του πελάτη σε μία ουρά αλλάζει το μέσο μήκος ουράς και το μέσο χρόνο καθυστέρησης του συστήματος, στοιχεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη μελέτη μας. Τέλος, ακόμη και η άμεση αποχώρηση ενός πελάτη παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί πιθανόν να μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε το πλήθος των πελατών που χάνονται. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε προσομοιώσεις συστημάτων δικτύων υπολογιστών, όπου παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ο υπολογισμός των πακέτων που απορρίπτονται επειδή δεν βρίσκουν διαθέσιμο χώρο ενδιάμεσης μνήμης για να αποθηκευτούν πριν μεταδοθούν. Όλα τα παραπάνω πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός διακριτού μοντέλου.

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για να προσομοιωθεί ένα σύστημα έχει άμεση σχέση με το μοντέλο που δημιουργήθηκε για το σύστημα. Αυτό ισχύει και αντιστρόφως: η μεθοδολογία προσομοίωσης, πολλές φορές, υπαγορεύει το είδος του μοντέλου που θα αναπτυχθεί. Στα διακριτά συστήματα, οι αλλαγές της κατάστασής τους συμβαίνουν μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, όταν δηλαδή συμβεί κάποιο γεγονός. Τα γεγονότα αυτά και η αλληλεπίδρασή τους, μπορούν να

προσομοιωθούν με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τον τρόπο αντιμετώπισης του μοντέλου.

Στην Ενότητα 4.2. παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία και ορισμοί των μεθοδολογιών προσομοίωσης, αλλά και η ιεραρχική δομή των μοντέλων προσομοίωσης, ώστε να καθορίσουμε ένα περίγραμμα εργασίας πάνω στην υλοποίηση διακριτών μοντέλων. Στο τέλος της ενότητας υπάρχει ένα διακριτό μοντέλο αύξησης του πληθυσμού. Στο τελευταίο μέρος αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες ανάπτυξης μοντέλων διακριτών συστημάτων. Ο στόχος του είναι να περιγράψει τις τρεις απόψεις του κόσμου με τις οποίες προσομοιώνονται τα μοντέλα ανάλογα με τις απαιτήσεις τους. Ειδικότερα, στην Ενότητα 4.3. περιγράφεται αναλυτικά η προσομοίωση γεγονότων καθώς και τα μοντέλα που αντιστοιχούν σ' αυτήν. Στην Ενότητα 4.4. παρουσιάζεται η προσομοίωση δραστηριοτήτων με τα αντίστοιχα μοντέλα. Ένας συνδυασμός των παραπάνω μεθοδολογιών, που ονομάζεται μέθοδος των τριών φάσεων, περιγράφεται στο τελευταίο μέρος αυτής της ενότητας. Η Ενότητα 4.5. περιγράφει την προσομοίωση διεργασιών.

Οι μεθοδολογίες αυτές βασίζονται κυρίως στον τρόπο επεξεργασίας των ουρών, επειδή η ουρά είναι η, κατά κύριο λόγο, κινητήρια δύναμη στα περισσότερα διακριτά συστήματα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ακόμη και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υπάρχουν εμφανείς ουρές στο σύστημα, μπορούν να δημιουργηθούν ιδεατές ουρές για τη μοντελοποίηση του συστήματος. Ωστόσο, επειδή υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες, είτε δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ιδεατές ουρές, είτε η μοντελοποίηση με ουρές δεν εξυπηρετεί το σκοπό της προσομοίωσης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα χωρίς καθόλου ουρές.

4.2. Βασικά Στοιχεία Ανάπτυξης Διακριτών Μοντέλων – Ορισμοί

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα σύστημα αποτελείται από οντότητες και χαρακτηριστικά. Με τον όρο οντότητα χαρακτηρίζουμε τα στοιχεία του συστήματος που προσομοιώνονται. Παραδείγματα οντοτήτων αποτελούν τα πακέτα ενός συστήματος δικτύων, οι διεργασίες ενός λειτουργικού συστήματος, οι πελάτες ενός κουρείου, κλπ. Κάθε οντότητα έχει την ιδιότητα ότι προσδιορίζεται με μοναδικό τρόπο μέσα σε ένα μοντέλο και υφίσταται επεξεργασία ξεχωριστά από τις υπόλοιπες οντότητες του συστήματος κατά την εκτέλεση ενός προγράμματος προσομοίωσης.

Ωστόσο, είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ένα πρόγραμμα προσομοίωσης αποτελούν προϊόν της αλληλεπίδρασης ενός πλήθους οντοτήτων (π.χ. πακέτο-δρομολογητής, πελάτης- κουρέας, κ.ο.κ). Με άλλα λόγια, η κατάσταση ενός συστήματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ενός πλήθους οντοτήτων. Με τον όρο χαρακτηριστικό περιγράφουμε κάθε γνώρισμα το οποίο μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με την οντότητα (π.χ. ταχύτητα αυτοκινήτου).

Καθώς προχωρά η προσομοίωση, οι οντότητες αλληλεπιδρούν, τα χαρακτηριστικά τους αλλάζουν τιμές και το σύστημα αλλάζει κατάσταση. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να δοθούν κάποιοι ορισμοί, που περιγράφουν αυτές τις λειτουργίες των οντοτήτων, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο προχωρά ο χρόνος της προσομοίωσης. Στο σημείο αυτό, θυμίζουμε τον ορισμό που δόθηκε στην Ενότητα 2.1.: Η μεταβλητή η οποία δίνει την τρέχουσα τιμή του χρόνου ονομάζεται ρολόι της προσομοίωσης και η μονάδα μέτρησης την οποία χρησιμοποιεί δεν είναι καθορισμένη αυστηρά, αλλά εξαρτάται από τη μονάδα μέτρησης την οποία χρησιμοποιούν οι είσοδοι. Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί αύξησης του ρολογιού της προσομοίωσης, ο μηχανισμός επόμενου γεγονότος και ο μηχανισμός σταθερού χρονικού διαστήματος. Οι ορισμοί των μηχανισμών αυτών, συμπίπτουν με τους ορισμούς του McDougall (1975), ο οποίος όμως τους επεκτείνει ως μεθοδολογίες προσομοίωσης από την άποψη του χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, ορίζονται τρεις μεθοδολογίες προσομοίωσης:

1. *Προσομοίωση Γεγονότων*: Με τον όρο γεγονός, εννοούμε τη χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει μία αλλαγή στο σύστημα (π.χ. άφιξη ενός πελάτη). Η προσομοίωση γεγονότων εκτιμά το μοντέλο μόνον όταν αλλάξει η τιμή κάποιας παραμέτρου του μοντέλου. Το προφανές πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, σε σχέση με την προσομοίωση δραστηριοτήτων, είναι η αποφυγή άσκοπων εκτιμήσεων του μοντέλου.
2. *Προσομοίωση Δραστηριοτήτων*: Με τον όρο δραστηριότητα εννοούμε μία λειτουργία η οποία μεταβάλλει την κατάσταση μίας οντότητας. Για παράδειγμα, ο πελάτης ενός εστιατορίου μπορεί να περάσει από την κατάσταση “Αναμονή” στην κατάσταση “Κατανάλωση” μέσα από μία δραστηριότητα “Σερβίρισμα”.
3. *Προσομοίωση Διεργασιών*: Με τον όρο διεργασία εννοούμε μία σειρά από γεγονότα τα οποία συμβαίνουν με κάποια χρονική σειρά. Μία διεργασία περιγράφει ένα επί μέρους τμήμα του μοντέλου. Η προσομοίωση διεργασιών προσφέρει ένα υψηλότερο επίπεδο άποψης του συστήματος, επιτρέποντας

στον σχεδιαστή να μοντελοποιεί κάθε επί μέρους τμήμα του μοντέλου, ανεξάρτητα από τα άλλα. Τα γεγονότα που είναι εσωτερικά σε κάθε τμήμα απομονώνονται από τα γεγονότα που συμβαίνουν σε άλλα τμήματα του μοντέλου. Η προσομοίωση διεργασιών είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μελέτη των ψηφιακών συστημάτων. Από τον ορισμό της είναι φανερό ότι η προσομοίωση διεργασιών δεν είναι στην πραγματικότητα ένας μηχανισμός αύξησης του χρόνου προσομοίωσης. Πράγματι, ήδη από το 1962, διάφοροι ερευνητές όπως ο Lackner και ο Kiviat. περιγράφουν τις μεθοδολογίες αυτές ως "απόψεις του κόσμου" (world views) που σχετίζονται περισσότερο με τον τρόπο μοντελοποίησης του συστήματος παρά με τον τρόπο με τον οποίο αυξάνεται το ρολόι της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται με περισσότερη λεπτομέρεια οι τρεις αυτές μεθοδολογίες από την άποψη του προσομοιωτή. Το κοινό χαρακτηριστικό των τριών αυτών μεθοδολογιών είναι ότι δημιουργούν προγράμματα προσομοίωσης τα οποία έχουν μια ιεραρχική δομή τριών επιπέδων [Fishman 1973]:

1. Διαχειριστής (πρόγραμμα ελέγχου)
2. Ρουτίνες υλοποίησης
3. Λεπτομερείς ρουτίνες

Στο ανώτερο επίπεδο βρίσκεται ο διαχειριστής, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη σωστή αλληλουχία των λειτουργιών του επιπέδου 2. Μία από τις κύριες λειτουργίες του προγράμματος ελέγχου είναι η διαχείριση του χρόνου, δηλαδή του ρολογιού της προσομοίωσης. Βάσει του ρολογιού αυτού, ο διαχειριστής μπορεί να προσδιορίσει ποιο γεγονός πρέπει να συμβεί και να καλέσει τις κατάλληλες ρουτίνες που θα επεξεργαστούν το γεγονός αυτό.

Στο δεύτερο επίπεδο του προγράμματος προσομοίωσης ανήκουν οι ρουτίνες υλοποίησης του μοντέλου. Οι ρουτίνες αυτές αποτελούν την προγραμματιστική έκφραση των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στις οντότητες. Επομένως, ο αναλυτής ή σχεδιαστής του μοντέλου ασχολείται κυρίως με την ανάπτυξη αυτών των ρουτινών. Οι τρεις μεθοδολογίες προσομοίωσης διαφέρουν κυρίως σ' αυτό το επίπεδο. Η προσομοίωση γεγονότων χρησιμοποιεί ρουτίνες που υλοποιούν την εκτέλεση γεγονότων, η προσομοίωση δραστηριοτήτων χρησιμοποιεί ρουτίνες που υλοποιούν

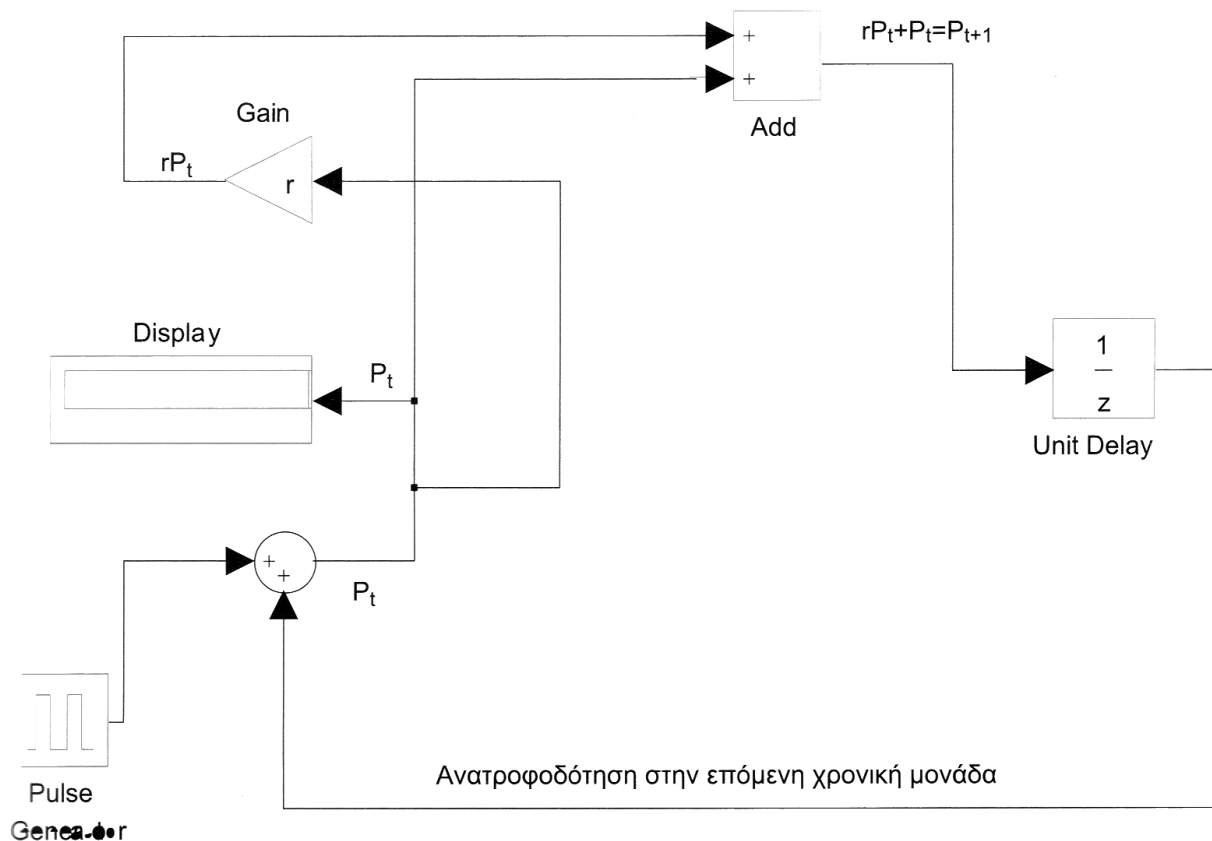
δραστηριότητες, ενώ, τέλος, η προσομοίωση διεργασιών χρησιμοποιεί ρουτίνες που υλοποιούν τις διεργασίες που εκτελούνται κατά την επεξεργασία του μοντέλου.

Το τρίτο επίπεδο αποτελείται από τις ρουτίνες που χρησιμοποιούνται από το δεύτερο επίπεδο για την υλοποίηση των λεπτομερειών του συστήματος που μοντελοποιείται. Στο επίπεδο αυτό ανήκουν οι γεννήτριες τυχαίων αριθμών και δειγμάτων, οι ρουτίνες συλλογής και παρουσίασης των αποτελεσμάτων κ.λ.π. Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των μεθοδολογιών προσομοίωσης, θα δώσουμε ένα παράδειγμα διακριτού μοντέλου, σχεδιασμένο με το εργαλείο SIMULINK του πακέτου MATLAB. Το μοντέλο αυτό αφορά το πρόβλημα της αύξησης του πληθυσμού. Έχοντας συλλέξει τα δεδομένα, θα υποθέσουμε, ότι ενδιαφερόμαστε να μελετήσουμε ομοιογενή πληθυσμό. Αυτή τη φορά θεωρούμε ότι ο πληθυσμός μεταβάλλεται μέσα στην πορεία του χρόνου σε διακριτά χρονικά διαστήματα, με άλλα λόγια, η χρονική παράμετρος t του μοντέλου μπορεί να λαμβάνει διακριτές τιμές μέσα από μία ακολουθία τιμών $\{t_0, t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1}, \dots\}$. Ο πληθυσμός P προσδιορίζεται πλήρως, αν γνωρίζουμε μία αρχική τιμή του πληθυσμού και τον τρόπο μεταβολής (αιτιοκρατικό μοντέλο).

Για να προσδιορίσουμε τις μεταβλητές του μοντέλου, θα θεωρήσουμε ότι υπάρχει μία αρχική τιμή του πληθυσμού, έστω P_0 , ενώ ο πληθυσμός μετά από t χρονικές μονάδες (τη χρονική στιγμή t) δηλώνεται ως P_t . Ο τρόπος μεταβολής (αύξησης ή μείωσης) του πληθυσμού σε κάθε διακριτό χρονικό διάστημα (π.χ. από t_0 σε t_1), εκφράζεται ως σταθερό ποσοστό της τιμής του στην αρχή του διαστήματος. Επομένως, η σχέση μεταξύ των μεταβλητών είναι:

$$P_{t+1} = P_t + rP_t \text{ ή } P_{t+1} - P_t = rP_t, t = 0, 1, 2, \dots \quad (4.1)$$

Η μεταβλητή r είναι η διαφορά ανάμεσα στο ρυθμό γεννήσεων και το ρυθμό θανάτων. Επομένως, αν το r είναι θετικό ο πληθυσμός αυξάνεται, αν το r είναι αρνητικό ο πληθυσμός μειώνεται, ενώ αν $r = 0$ ο πληθυσμός παραμένει σταθερός μέσα στο χρονικό διάστημα το οποίο εξετάζουμε. Το μοντέλο δεν έχει κάποιο σημαντικό περιορισμό ως προς τις μεταβλητές του. Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε την υλοποίηση του μοντέλου με χρήση του SIMULINK. Το διάγραμμα του μοντέλου δίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Μοντέλο αύξησης πληθυσμού με χρήση του SIMULINK

Τα μοντέλα που αναπτύσσονται με το εργαλείο SIMULINK βασίζονται στη ροή δεδομένων ανάμεσα σε τμήματα τα οποία εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες. Η ροή υλοποιείται με τη βοήθεια καλωδίων μεταφοράς της πληροφορίας. Η βιβλιοθήκη του SIMULINK περιέχει ένα πλήθος τμημάτων οργανωμένα σε κατηγορίες. Τα τμήματα από τα οποία απαρτίζεται το μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

1. Gain: Η απολαβή (gain) χρησιμοποιείται ως παράγοντας με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η τιμή ενός σήματος. Στο Σχήμα 4.1. το σήμα με την ονομασία P πολλαπλασιάζεται με μία τιμή απολαβής r , όπως απαιτεί η Εξίσωση 4.1. Πιο συγκεκριμένα, το σήμα P από την έξοδο του τμήματος άθροισης στο κάτω αριστερό μέρος του Σχήματος 4.1., τροφοδοτείται ως είσοδος στο τμήμα απολαβής. Το τμήμα αυτό δίνει ως έξοδο $rP(t)$. Το τμήμα Gain βρίσκεται στην κατηγορία Math Operations της βιβλιοθήκης τμημάτων του SIMULINK.
2. Add: Υπάρχουν δύο τμήματα που εκτελούν προσθέσεις. Το τμήμα που βρίσκεται στο αριστερό κάτω μέρος εκτελεί αρχικά την πρόσθεση, $P_0 + 0$, δηλαδή τροφοδοτεί το σύστημα με την αρχική τιμή του πληθυσμού και στη

συνέχεια εκτελεί διαδοχικά την πράξη P_t+0 , τροφοδοτώντας το σύστημα με την τρέχουσα τιμή P_t . Οι παραπάνω ενέργειες γίνονται σε συνεργασία με τα τμήματα Pulse Generator και Unit Delay και θα γίνουν πιο κατανοητές όταν περιγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η προσομοίωση. Το δεύτερο τμήμα στο πάνω δεξιά μέρος του σχήματος εκτελεί την πρόσθεση $P_t + rP_t$. Τα τμήμα Add βρίσκεται στην κατηγορία Math Operations της βιβλιοθήκης τμημάτων του SIMULINK.

3. Unit Delay: Διατηρεί μία τιμή για το χρονικό διάστημα το οποίο ορίζεται από την παράμετρο Sample time που ορίζει ο χρήστης. Έστω ότι η τιμή αυτή είναι ίση με μία χρονική μονάδα. Το τμήμα Unit Delay βρίσκεται στην κατηγορία Discrete της βιβλιοθήκης τμημάτων του SIMULINK.
4. Pulse Generator: Το τμήμα γεννήτριας παλμών παράγει παλμούς ανά σταθερά διαστήματα. Η λειτουργία του στο μοντέλο είναι ειδική: Τροφοδοτεί στην αρχή της προσομοίωσης το σύστημα με μία αρχική τιμή του πληθυσμού ίση με P_0 . Στη συνέχεια, η τιμή αυτή πρέπει να μηδενιστεί, ώστε το P_0 να προστεθεί μία μόνον φορά στην τιμή του πληθυσμού και να μην προστίθεται σε κάθε επανάληψη. Για να το επιτύχουμε αυτό, εκμεταλλευόμαστε τη λογική λειτουργία του τμήματος. Πιο συγκεκριμένα:

```
if (t >= Phase Delay) AND Pulse is on
```

```
Y (t) = Amplitude
```

```
else
```

```
Y(t) = 0
```

```
end
```

όπου Phase Delay είναι η καθυστέρηση πριν την παραγωγή του παλμού και Amplitude είναι η τιμή του παλμού. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι οποιοσδήποτε βαθμωτός τύπος δεδομένων. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να ορίσει την τιμή των παρακάτω μεταβλητών:

- a) Pulse Width: Το ποσοστό της περιόδου του παλμού που το σήμα είναι ενεργό (on).

b) Period: Η περίοδος του παλμού μετρημένη σε δευτερόλεπτα.

Με βάση τον τρόπο λειτουργίας και τις παραμέτρους του τμήματος παλμών, αν ορίσουμε την τιμή Period μεγαλύτερη σε διάρκεια από το χρόνο της προσομοίωσης, την τιμή Pulse Width πολύ μικρή (π.χ. 0.1%), και την τιμή Phase Delay ίση με 0, τότε για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα η συνθήκη if ($t \geq \text{Phase Delay}$) AND Pulse is on θα είναι αληθής και η τιμή του παλμού θα είναι ίση με Amplitude. Στο παράδειγμα, Amplitude= P_0 . Στη συνέχεια, ο παλμός γίνεται ανενεργός (μηδενίζεται) και παραμένει σε αυτήν την κατάσταση μέχρι το πέρας του χρόνου της προσομοίωσης (η περίοδος του παλμού είναι μεγαλύτερη από το χρόνο της προσομοίωσης). Επομένως, η τιμή P_0 προστίθεται μία φορά στο συνολικό πληθυσμό. Το τμήμα Pulse Generator βρίσκεται στην κατηγορία Sources της βιβλιοθήκης τμημάτων του SIMULINK.

5. Display: Δείχνει την τιμή του αποτελέσματος. Από τη σύνδεση του Σχήματος 4.1., πρόκειται για την τρέχουσα τιμή P_t , P_{t+1} κατά την προηγούμενη χρονική μονάδα. Το τμήμα Display βρίσκεται στην κατηγορία Sinks της βιβλιοθήκης τμημάτων του SIMULINK.

Στο σημείο αυτό θα εξηγήσουμε τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η προσομοίωση. Έστω ότι επιθυμούμε να υπολογίσουμε την τιμή P_4 και ότι $r = 2$. Τη χρονική στιγμή $t = 0$, η τιμή Amplitude της γεννήτριας παλμών (αντιστοιχεί στην αρχική τιμή του πληθυσμού P_0) προστίθεται στην τιμή εξόδου του τμήματος Unit Delay η οποία είναι ίση με 0. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τιμή αθροίσματος 5. Η τιμή αυτή, $P_t = P_0 = 5$ οδηγείται στην είσοδο του δεύτερου αθροιστή (τετραγωνικό σχήμα), μαζί με την τιμή $r \times P_0 = 2 \times 5 = 10$. Άρα, η έξοδος του αθροιστή θα είναι $5 + 10 = 15$. Η τιμή αυτή θα παραμείνει στη μονάδα Unit Delay, έως ότου προχωρήσει το ρολόι της προσομοίωσης, δηλαδή μέχρι να γίνει $t = 1$. Αυτήν τη χρονική στιγμή, βάσει όσων περιγράψαμε αναφορικά με το τμήμα Pulse Generator, η τιμή του παλμού έχει μηδενιστεί, επειδή δεν ισχύει πλέον η συνθήκη if ($t \geq \text{Phase Delay}$) AND Pulse is on (ο παλμός είναι ανενεργός). Επομένως, ο αθροιστής δέχεται ως εισόδους το 0 και την τιμή $P_1 = 15$. Άρα, η έξοδος του θα ισούται με 15. Η τιμή αυτή τροφοδοτείται ως είσοδος στο δεύτερο αθροιστή, μαζί με το γινόμενο $P_1 \times r = 30$. Άρα, ο δεύτερος αθροιστής θα δώσει άθροισμα $30 + 15 = 45 = P_2$. Ομοίως, $P_3 = 135$ και τελικά $P_4 =$

405. Ο Πίνακας 4.1. συνοψίζει τους υπολογισμούς σε κάθε διακριτή χρονική μονάδα $t = 0, 1, 2, 3$, και 4.

t	P_t	rP_t	P_{t+1}
0	5	10	15
1	15	30	45
2	45	90	135
3	135	270	405

Πίνακας 3.1. Υπολογισμοί των P_t , rP_t , P_{t+1}

4.3. Προσομοίωση Γεγονότων

Στην Ενότητα αυτή περιγράφεται η πρώτη από τις τρεις μεθοδολογίες προσομοίωσης, η προσομοίωση γεγονότων. Αρχικά, γίνεται μία διάκριση ανάμεσα στα εξαρτημένα και τα ανεξάρτητα γεγονότα. Στη συνέχεια εξετάζονται τα δύο από τα τρία επίπεδα της ιεραρχικής δομής που δημιουργεί κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης, δηλαδή ο διαχειριστής και οι ρουτίνες υλοποίησης. Το τρίτο επίπεδο, οι ρουτίνες λεπτομερειών συμπεριλαμβάνουν στοιχεία όπως οι γεννήτριες τυχαίων αριθμών και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, που θα μας απασχολήσουν στα επόμενα κεφάλαια. Για να εξυπηρετηθεί η καλύτερη κατανόηση των θεμάτων της ενότητας, στην τελευταία παράγραφο παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μοντέλου απλής ουράς, υλοποιημένο με το εργαλείο SIMULINK.

4.3.1. Εξαρτημένα και ανεξάρτητα γεγονότα

Η μεθοδολογία αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Markowitz το 1962 κατά την ανάπτυξη της γλώσσας προσομοίωσης SIMSCRIPT. Η προσομοίωση γεγονότων είναι η πλέον διαδομένη μεθοδολογία στις Ηνωμένες Πολιτείες σε αντίθεση με την Ευρώπη, όπου οι πλέον διαδεδομένες μεθοδολογίες είναι η προσομοίωση δραστηριοτήτων και η προσομοίωση διεργασιών.

Το βασικό στοιχείο της μεθοδολογίας αυτής είναι ο ορισμός και χρονοδρομολόγηση των γεγονότων του μοντέλου. Τα γεγονότα που μπορεί να συμβούν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα ανεξάρτητα και τα εξαρτημένα ή υπό συνθήκη γεγονότα.

- Ανεξάρτητο ονομάζεται το γεγονός που πρόκειται να συμβεί σε κάποια προκαθορισμένη χρονική στιγμή, ανεξάρτητα από την εμφάνιση άλλων γεγονότων.

- Εξαρτημένο ονομάζονται το γεγονός που συμβαίνει όταν εμφανιστεί κάποιο άλλο ανεξάρτητο ή εξαρτημένο γεγονός.

Σημειώνεται ότι τα ανεξάρτητα γεγονότα δεν είναι απαραίτητο να προκαθορίζονται επακριβώς από το μοντέλο ή να είναι γνωστά πριν αρχίσει η προσομοίωση. Είναι αρκετό να εξαρτώνται μόνο από το χρόνο, ο οποίος τις περισσότερες φορές υπολογίζεται από την εκτέλεση ενός άλλου γεγονότος.

Παράδειγμα 4.1.

Ας εξετάσουμε τα γεγονότα σε ένα απλό σύστημα με μία ουρά. Πελάτες έρχονται στο σύστημα, περιμένουν στην ουρά, αρχίζει η εξυπηρέτηση τους, τελειώνει η εξυπηρέτηση τους, και αποχωρούν από το σύστημα. Ορίζουμε τα ανεξάρτητα γεγονότα:

1. Άφιξη ενός πελάτη στην ουρά
2. Τέλος εξυπηρέτησης ενός πελάτη

Το πρώτο γεγονός είναι ανεξάρτητο, γιατί θα συμβεί σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή. Παρόλο που συχνά για τον υπολογισμό της χρονικής αυτής στιγμής, λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος άφιξης του προηγούμενου πελάτη, ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού των αφίξεων, το γεγονός δεν παύει να είναι ανεξάρτητο. Αντίστοιχα, και το δεύτερο γεγονός είναι ανεξάρτητο επειδή θα συμβεί κάποια δεδομένη χρονική στιγμή. Η χρονική αυτή στιγμή μπορεί να υπολογίζεται από τον χρόνο έναρξης με δειγματοληψία από κάποια κατανομή, αλλά αυτό δεν αλλάζει τον ορισμό του γεγονότος ως ανεξάρτητου.

Σε σχέση με τα ανεξάρτητα γεγονότα, ορίζονται και δύο εξαρτημένα γεγονότα: Το γεγονός της έναρξης εξυπηρέτησης ενός πελάτη και το γεγονός της αναχώρησης ενός πελάτη από το σύστημα. Το γεγονός της αναχώρησης από το σύστημα εξαρτάται από το γεγονός του τέλους εξυπηρέτησης επειδή μόλις τελειώσει η εξυπηρέτηση κάποιου πελάτη (ανεξάρτητο γεγονός), ο πελάτης αυτός φεύγει από το σύστημα (εξαρτημένο γεγονός). Αντίστοιχα, και η έναρξη εξυπηρέτησης είναι εξαρτημένο γεγονός γιατί εξαρτάται από άλλα γεγονότα ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος. Διακρίνονται δηλαδή οι εξής δύο περιπτώσεις:

- a) Τελειώνει η εξυπηρέτηση κάποιου πελάτη (ανεξάρτητο γεγονός) και υπάρχει πελάτης που περιμένει στην ουρά (κατάσταση του συστήματος). Στην περίπτωση αυτή συμβαίνει αμέσως το γεγονός της έναρξης εξυπηρέτησης, εξαρτώμενο από το γεγονός του τέλους εξυπηρέτησης.
- b) Έρχεται κάποιος πελάτης στο σύστημα (ανεξάρτητο γεγονός) και δεν υπάρχει άλλος πελάτης στο σύστημα (κατάσταση του συστήματος). Στην περίπτωση αυτή συμβαίνει αμέσως το γεγονός της έναρξης εξυπηρέτησης εξαρτώμενο από το γεγονός της άφιξης του πελάτη.

Είναι φανερό, ότι τα ανεξάρτητα γεγονότα δρομολογούνται να συμβούν σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή και συμβαίνουν μόλις φθάσει η χρονική αυτή στιγμή, ενώ τα εξαρτημένα γεγονότα συμβαίνουν αμέσως μόλις συμβεί κάποιο άλλο γεγονός.

4.3.2. Διαχειριστής της προσομοίωσης γεγονότων

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.2., τα προγράμματα προσομοίωσης έχουν μια ιεραρχική δομή τριών επιπέδων. Στο πρώτο από αυτά τα επίπεδα βρίσκεται ο διαχειριστής, που είναι ένα πρόγραμμα ελέγχου της προσομοίωσης. Ειδικότερα, ο διαχειριστής είναι υπεύθυνος για τις ακόλουθες λειτουργίες:

1. Έλεγχο του χρόνου
2. Προσδιορισμό των προς εκτέλεση γεγονότων
3. Εκτέλεση των γεγονότων

Σε κάθε σύστημα διακριτού χρόνου υπάρχει ένα σύνολο από μεταβλητές, οι οποίες καλούνται μεταβλητές κατάστασης. Οι μεταβλητές αυτές αλλάζουν τιμές κατά το πέρασμα του χρόνου. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.2., η αλλαγή της τιμής μίας μεταβλητής κατάστασης καλείται γεγονός. Το γεγονός αποτελεί το βασικό στοιχείο δόμησης μίας προσομοίωσης διακριτού χρόνου. Ο έλεγχος του χρόνου είναι ένας μηχανισμός που εγγυάται ότι όλα τα γεγονότα λαμβάνουν χώρα με τη σωστή χρονολογική σειρά. Τον έλεγχο του χρόνου αναλαμβάνει το ρολόι της προσομοίωσης. Ο μηχανισμός αυτός υλοποιείται με τη βοήθεια μίας χρονικής λίστας γεγονότων, η οποία συχνά καλείται και λίστα μελλοντικών γεγονότων. Στη λίστα αυτή τοποθετούνται τα γεγονότα που πρόκειται να εκτελεστούν σε μία μελλοντική χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια τα γεγονότα δρομολογούνται για να εκτελεστούν σε μία χρονική στιγμή. Η σχεδίαση ενός γεγονότος σημαίνει ότι η χρονική στιγμή στην οποία

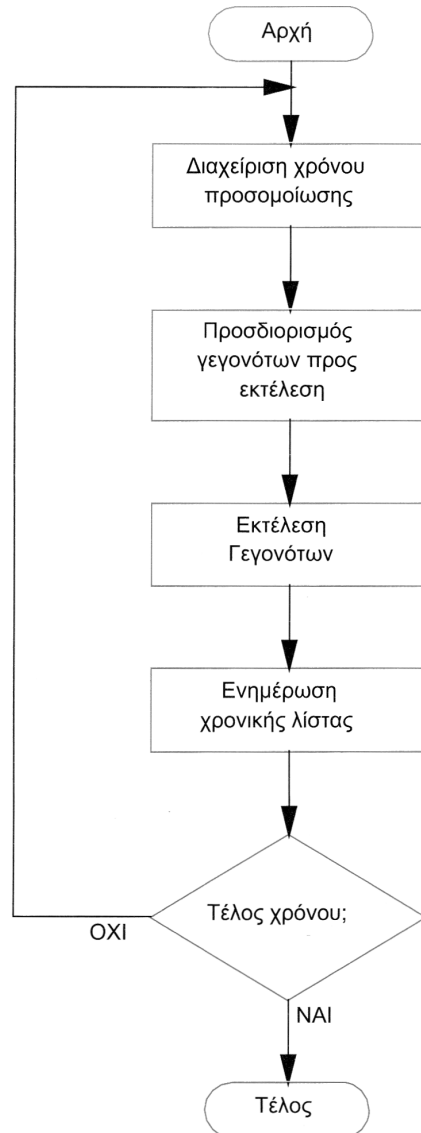
θα συμβεί αυτό το γεγονός προϋπολογίζεται ή υπολογίζεται όταν συμβεί κάποιιο άλλο γεγονός και η χρονική αυτή στιγμή τοποθετείται μέσα στη λίστα. Επίσης, η λίστα μπορεί να περιέχει και τις τιμές που πρόκειται να λάβουν κάποια από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου όταν εκτελεστεί το γεγονός. Αυτό είναι συνηθισμένο σε προσομοιώσεις ψηφιακών συστημάτων. Ο χρόνος διάρκειας ενός γεγονότος συνήθως λαμβάνεται τυχαία μέσα από μία στατιστική κατανομή.

Το ρολόι της προσομοίωσης δείχνει σε κάθε χρονική στιγμή το χρόνο της προσομοίωσης, ο οποίος αντιστοιχεί στα γεγονότα που εκτελούνται αυτήν τη χρονική στιγμή. Η διαχείρισή του γίνεται από το πρόγραμμα ελέγχου, σύμφωνα με το μηχανισμό ροής επόμενου γεγονότος. Ένα γενικό διάγραμμα του προγράμματος ελέγχου γεγονότων δίνεται στο Σχήμα 4.2. Όπως θα δούμε στην Παράγραφο 4.3.3., οι λειτουργίες του διαγράμματος περιλαμβάνουν κλήσεις σε συγκεκριμένες ρουτίνες υλοποίησης. Θα επανέλθουμε σε αυτό, όταν στρέψουμε τη συζήτησή μας στις ρουτίνες υλοποίησης.

Η λίστα μελλοντικών γεγονότων είναι μία δυναμική λίστα. Η εισαγωγή γεγονότων στη λίστα και η διαγραφή τους γίνεται τόσο από το πρόγραμμα ελέγχου, όσο και από τα προγράμματα εκτέλεσης των γεγονότων σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

- a) Μόλις το πρόγραμμα ελέγχου αυξήσει το ρολόι της προσομοίωσης στη νέα του τιμή, που αντιστοιχεί στο χρόνο του αμέσως επόμενου γεγονότος που πρόκειται να εκτελεσθεί, ελέγχει τα γεγονότα της λίστας για να προσδιορίσει αυτά που πρέπει να εκτελεστούν τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα γεγονότα αυτά δίνονται προς εκτέλεση στα αντίστοιχα προγράμματα και αφαιρούνται από τη χρονική λίστα γεγονότων.
- b) Κατά την εκτέλεση ενός γεγονότος από το πρόγραμμα εκτέλεσής του, είναι δυνατόν να προγραμματιστεί ένα άλλο μελλοντικό γεγονός. Το νέο αυτό γεγονός μπορεί να είναι είτε εξαρτημένο, είτε ανεξάρτητο. Στην πρώτη περίπτωση, ο χρόνος εκτέλεσής του είναι ο τρέχων χρόνος της προσομοίωσης. Σε κάθε περίπτωση όμως, το γεγονός εισάγεται στη χρονική λίστα γεγονότων για να εκτελεσθεί σε κάποια επόμενη επανάληψη του κύκλου του προγράμματος ελέγχου. Φυσικά, για απλούστερη και καθαρότερη δομή των προγραμμάτων προσομοίωσης, η εισαγωγή καθαυτή γίνεται πάντοτε από

το πρόγραμμα ελέγχου μετά από αίτηση του προγράμματος εκτέλεσης, ώστε η διαχείριση της λίστας γεγονότων να πραγματοποιείται κεντρικά.



Σχήμα 4.2. Διάγραμμα του προγράμματος ελέγχου προσομοίωσης γεγονότων

Ο κύκλος του Σχήματος 4.2. επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Η διαχείριση της χρονικής λίστας γεγονότων είναι αρκετά κρίσιμη για την ταχύτητα της προσομοίωσης, ιδίως όταν το μοντέλο είναι πολύπλοκο και προγραμματίζονται πολλά μελλοντικά γεγονότα. Για το λόγο αυτό, οι σχεδιαστές των προγραμμάτων προσομοίωσης χρησιμοποιούν συνήθως χρονικά διατεταγμένες συνδεδεμένες λίστες, έτσι ώστε να είναι εύκολη τόσο η προσθήκη και αφαίρεση γεγονότων, όσο και η αναζήτηση του επόμενου προς εκτέλεση γεγονότος. Η αναζήτηση αυτή είναι στοιχειώδης σε μία χρονικά διατεταγμένη λίστα, επειδή το

επόμενο γεγονός προς εκτέλεση βρίσκεται στην αρχή της λίστας αυτής. Το Παράδειγμα 4.2. είναι χρήσιμο για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω.

Παράδειγμα 4.2.

Έστω ένα ψηφιακό σήμα x , το οποίο αποτελεί την έξοδο ενός κυκλώματος δύο εισόδων a και b . Η τιμή της εξόδου x γίνεται 1 κάθε φορά που οι δύο εισοδοί είναι ίσες μεταξύ τους, διαφορετικά $x = 0$ (Λογική συνάρτηση Αποκλειστικό ΟΥΤΕ). Κάθε αλλαγή στην τιμή ενός σήματος εισόδου ή εξόδου αποτελεί ένα γεγονός. Κάθε γεγονός που συμβαίνει στις εισόδους πιθανόν να έχει ως συνέπεια την αλλαγή της τιμής της εξόδου x . Έστω ότι οι εισοδοί a και b λαμβάνουν τις ακόλουθες τιμές μέσα στο χρόνο (στην ορολογία των ψηφιακών συστημάτων, οι αλλαγές τιμών των σημάτων αναφέρονται και ως μεταβάσεις).

Χρόνος	Σήμα εισόδου	Τιμή
0ns	a, b	0,0
200ns	b	1
250ns	a	1

Η λίστα γεγονότων έχει τη μορφή ('Τιμή', Χρόνος Έναρξης, Χρόνος Έναρξης+ δ). Για λόγους διευκόλυνσης ο αναγνώστης μπορεί να κάνει τις αντιστοιχίσεις των χρόνων που αναγράφονται στην παραπάνω μορφή, με τους χρόνους έναρξης και λήξης εξυπηρέτησης ενός πελάτη, σε ένα απλό σύστημα εξυπηρέτησης πελατών, ως εξής: Ο χρόνος έναρξης ενός γεγονότος κάποιου σήματος (αλλαγή της τιμής ενός σήματος) αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που ξεκινά η εξυπηρέτηση ενός πελάτη. Ο χρόνος έναρξης + δ , αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή λήξης της εξυπηρέτησης ενός πελάτη και εξόδου του από το σύστημα.

Η διάρκεια εκτέλεσης ενός γεγονότος θεωρείται ίση με δ , όπου δ είναι ο απειροελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να αλλάξει η τιμή ενός ψηφιακού σήματος. Με άλλα λόγια, η συγκεκριμένη δομή της λίστας μελλοντικών γεγονότων είναι: η τιμή "Τιμή" ορίζεται να αποδοθεί σε ένα σήμα με μια απειροελάχιστη καθυστέρηση δ από τη χρονική στιγμή, Χρόνος Έναρξης στην

οποία έχει οριστεί να ξεκινήσει το γεγονός. Στο παράδειγμα θεωρούμε ότι η μονάδα μέτρησης του χρόνου είναι το ns.

Αρχικά θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή $t = 0$ ns οι είσοδοι έχουν τιμή 0. Επομένως, στη λίστα μελλοντικών γεγονότων θα πρέπει να προστεθεί η καταχώρηση ('1', 0ns, 0ns + δ), η οποία αντιστοιχεί στο σήμα x. Αυτό έχει ως συνέπεια, η τιμή του x να μεταβεί στο 1 σε χρόνο 0 + δ .

Μέχρι τη χρονική στιγμή $T_c=200$ ns δεν υπάρχει κανένα γεγονός στις εισόδους (αλλαγή στις τιμές των σημάτων a και b). Επομένως, το σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται σε ηρεμία. Τη χρονική στιγμή $T_c=200$ ns υπάρχει γεγονός για το σήμα b, το οποίο γίνεται 1. Επομένως, το ρολόι της προσομοίωσης θα μεταβεί στην τιμή 200ns και το γεγονός προς εκτέλεση είναι η αλλαγή της τιμής του σήματος b. Στη λίστα θα προστεθεί η καταχώρηση ('1', 200ns, 200ns + δ) για το σήμα b. Η εκτέλεση του γεγονότος μεταφέρει το ρολόι της προσομοίωσης στη χρονική στιγμή 200ns+ δ . Όμως, η εκτέλεση του γεγονότος έχει ως αποτέλεσμα οι είσοδοι a και b να διαφέρουν. Αυτό σημαίνει ότι στη λίστα προστίθεται η καταχώρηση ('0', 200ns+ δ , 200ns+2 δ) για το σήμα x. Η εκτέλεση του γεγονότος θα μεταφέρει το ρολόι της προσομοίωσης στη χρονική στιγμή 200ns + 2 δ . Η εκτέλεση του γεγονότος δεν προκαλεί κάποιο νέο γεγονός και επομένως δεν απαιτείται νέα ενημέρωση της λίστας.

Τη χρονική στιγμή $T_c=250$ ns υπάρχει γεγονός για το σήμα a, το οποίο γίνεται 1. Επομένως, το ρολόι της προσομοίωσης θα μεταβεί στην τιμή 250ns και το γεγονός προς εκτέλεση είναι η αλλαγή της τιμής του σήματος a. Στη λίστα θα προστεθεί η καταχώρηση ('1', 250ns, 250ns + δ) για το σήμα a. Η εκτέλεση του γεγονότος μεταφέρει το ρολόι της προσομοίωσης στη χρονική στιγμή 250ns + δ . Όμως, η εκτέλεση του γεγονότος έχει ως αποτέλεσμα οι είσοδοι a και b να γίνουν ίσες. Αυτό σημαίνει ότι στη λίστα προστίθεται η καταχώρηση ('1', 250ns + δ , 250ns + 2 δ). Η εκτέλεση του γεγονότος θα μεταφέρει το ρολόι της προσομοίωσης στη χρονική στιγμή 200ns + 2 δ . Η εκτέλεση του γεγονότος δεν προκαλεί κάποιο νέο γεγονός και επομένως δεν απαιτείται νέα ενημέρωση της λίστας. Οι ενημερώσεις της λίστας μελλοντικών γεγονότων απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.

x	→	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; width: 30px;">1</td> <td style="width: 30px;">0</td> <td style="width: 30px;">0+δ</td> </tr> </table>	1	0	0+δ
1	0	0+δ			
b	→	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; width: 30px;">1</td> <td style="width: 30px;">200</td> <td style="width: 30px;">200+δ</td> </tr> </table>	1	200	200+δ
1	200	200+δ			
x	→	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; width: 30px;">0</td> <td style="width: 30px;">200</td> <td style="width: 30px;">200+2δ</td> </tr> </table>	0	200	200+2δ
0	200	200+2δ			
a	→	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; width: 30px;">1</td> <td style="width: 30px;">250</td> <td style="width: 30px;">250+δ</td> </tr> </table>	1	250	250+δ
1	250	250+δ			
x	→	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; width: 30px;">1</td> <td style="width: 30px;">250</td> <td style="width: 30px;">250+2δ</td> </tr> </table>	1	250	250+2δ
1	250	250+2δ			

Σχήμα 4.3. Λίστα μελλοντικών γεγονότων για τα σήματα a, b, x του Παραδείγματος 4.2.

Στο Παράδειγμα 4.2., παρατηρείστε ότι κατά την εκτέλεση κάποιων γεγονότων (αλλαγή τιμών στις εισόδους) από το πρόγραμμα εκτέλεσης της προσομοίωσης, προγραμματίζονται μελλοντικά γεγονότα. Τα νέα γεγονότα είναι εξαρτημένα δεδομένου ότι συμβαίνουν μόνον αν εμφανιστεί ένα ανεξάρτητο γεγονός αλλαγής της τιμής μίας εισόδου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο χρόνος εκτέλεσης του εξαρτημένου γεγονότος είναι ο τρέχων χρόνος της προσομοίωσης. Πράγματι, παρατηρείστε ότι τα γεγονότα αλλαγής των τιμών της εξόδου x λαμβάνουν χώρα αμέσως μόλις ολοκληρωθεί ένα ανεξάρτητο γεγονός (δείτε και το Σχήμα 4.3.), χωρίς να αλλάξει τιμή το ρολόι της προσομοίωσης).

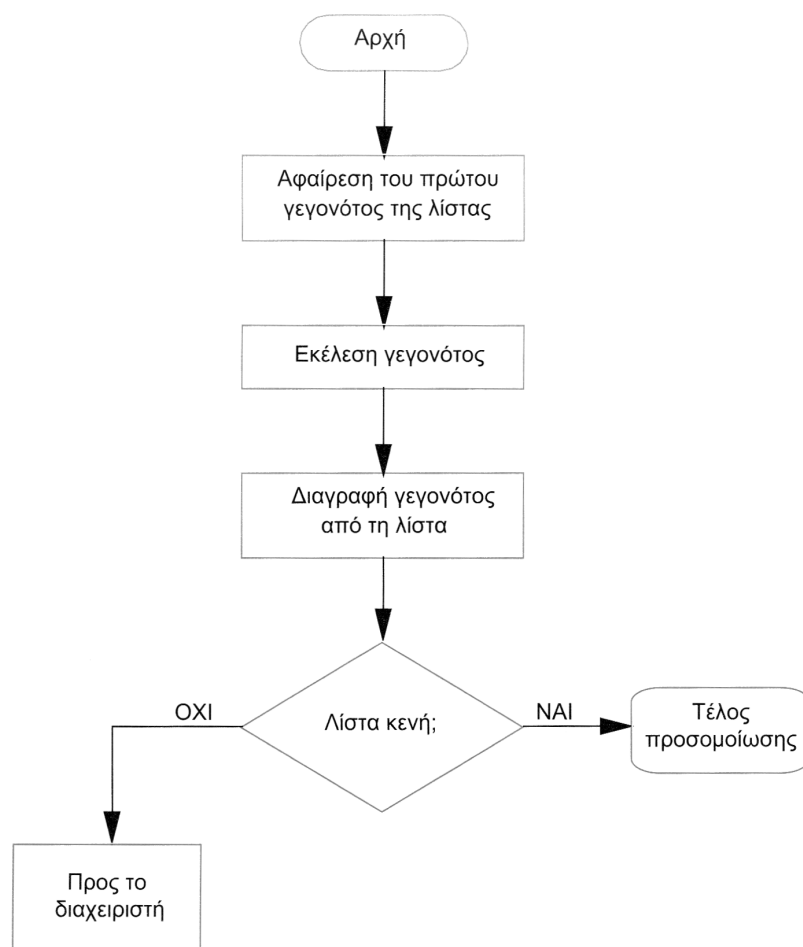
4.3.3. Ρουτίνες υλοποίησης

Οι ρουτίνες υλοποίησης εκφράζουν τις σχέσεις αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις οντότητες. Κάθε ρουτίνα πρέπει να προσδιορίζει με σαφείς εντολές προς τον υπολογιστή ποιές ακριβώς ενέργειες θα πρέπει να γίνουν όταν εμφανίζεται ένα γεγονός. Επομένως, είναι συνηθισμένη η χρήση διαγραμμάτων ροής, τα οποία αποτελούν μία βολική απεικόνιση της συμπεριφοράς που πρέπει να εμφανίσει μία ή περισσότερες οντότητες όταν συμβεί ένα γεγονός. Είναι φανερό ότι, μεταξύ διαφορετικών προγραμμάτων προσομοίωσης, θα υπάρχουν διαφορετικές ρουτίνες υλοποίησης (π.χ. ρουτίνα υλοποίησης της άφιξης και παραμονής ενός πελάτη σε ένα σύστημα ουράς, ρουτίνα περιγραφής της συμπεριφοράς ενός ψηφιακού συστήματος σε αλλαγές των τιμών εισόδου, κ.ο.κ.

Ωστόσο, σε κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης γεγονότων υπάρχει και μία ρουτίνα χρονισμού, η οποία διαχειρίζεται τα στοιχεία της λίστας μελλοντικών γεγονότων,

προκειμένου αυτά να εκτελούνται με τη σωστή χρονολογική σειρά. Η ρουτίνα αυτή μπορεί σε γενικές γραμμές να θεωρηθεί ότι έχει πολλά κοινά σημεία ανάμεσα στα διαφορετικά προγράμματα προσομοίωσης. Σε μορφή βημάτων, η λειτουργία της ρουτίνας χρονισμού είναι η εξής (Σχήμα 4.4.):

- Βήμα 1: Αφαίρεση του πρώτου γεγονότος που βρίσκεται στη λίστα
- Βήμα 2: Εκτέλεση του γεγονότος
- Βήμα 3: Διαγραφή του γεγονότος από τη λίστα
- Βήμα 4: Έλεγχος αν η λίστα έχει άλλα γεγονότα. Αν ναι, μετάβαση στο διαχειριστή, αν όχι, τέλος προσομοίωσης.



Σχήμα 4.4. Λογικό διάγραμμα υλοποίησης μίας ρουτίνας χρονισμού

Όταν αυξηθεί το ρολόι της προσομοίωσης από το διαχειριστή, ελέγχεται η λίστα μελλοντικών γεγονότων για να προσδιοριστεί το γεγονός ή τα γεγονότα που θα εκτελεστούν. Αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος του προγράμματος της προσομοίωσης περνά στη ρουτίνα χρονισμού, η οποία επιλέγει το γεγονός με τη μικρότερη τιμή

χρόνου εκτέλεσης (βήμα 1). Η εκτέλεση του γεγονότος (βήμα 2), σημαίνει ότι ο έλεγχος θα περάσει σε μία άλλη ρουτίνα υλοποίησης, η οποία περιγράφει λεπτομερώς τι πρέπει να συμβεί κατά την εκτέλεση του επιλεγμένου γεγονότος και διαχειρίζεται τυχόν αλλαγές της κατάστασης του συστήματος, αλλαγές μεταβλητών, κ.ο.κ, ή δημιουργία νέων γεγονότων. Η ρουτίνα αυτή επιστρέφει τον έλεγχο στο βήμα 3 της ρουτίνας χρονισμού, ώστε να αφαιρεθεί η καταχώρηση της λίστας. Τέλος, ελέγχεται αν υπάρχουν άλλα γεγονότα στη λίστα. Αν ναι, ο έλεγχος θα επιστρέψει στο διαχειριστή για να προχωρήσει το χρόνο της προσομοίωσης. Αν όχι, η προσομοίωση τερματίζεται. Το παράδειγμα που ακολουθεί βοηθά στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της ρουτίνας χρονισμού. Στο παράδειγμα αυτό, η λίστα μελλοντικών γεγονότων δημιουργείται βάσει των χρόνων άφιξης και εξυπηρέτησης 5 πελατών σε ένα σύστημα ουράς με έναν εξυπηρέτη.

Παράδειγμα 4.3.

Έστω ότι οι χρόνοι άφιξης και εξυπηρέτησης 5 πελατών μίας τράπεζας είναι οι ακόλουθοι:

Πελάτης	Χρόνος εισόδου	Χρόνος εξυπηρέτησης
1	1	4
2	4	5
3	5	2
4	8	3
5	12	6

Με βάση τις τιμές αυτές, η λίστα μελλοντικών γεγονότων θα έχει την ακόλουθη μορφή:

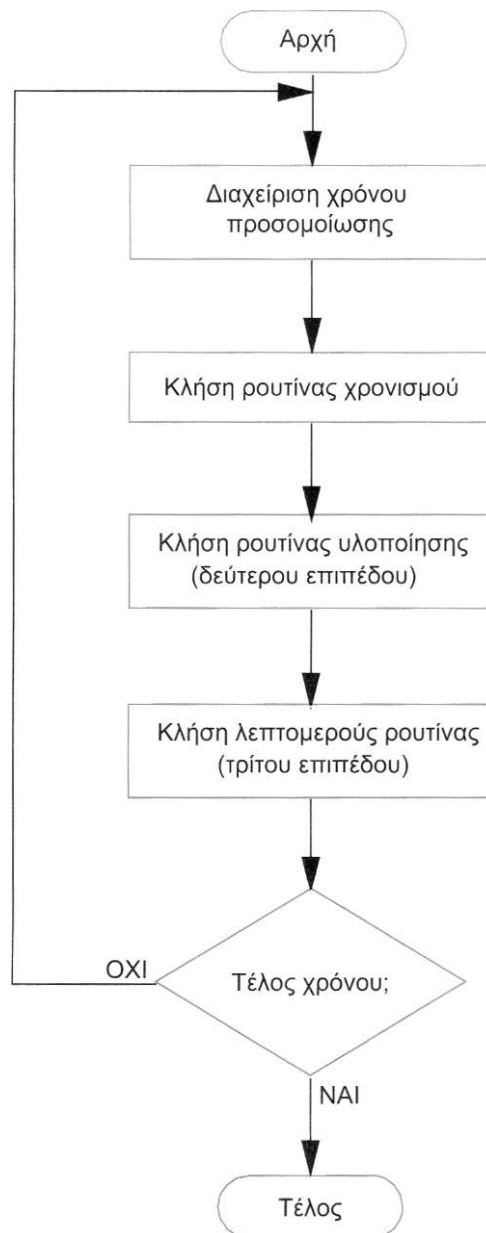
Ρολόι	Γεγονός	Πελάτης
1	Αφιξη	1
1	Έναρξη εξυπηρέτησης	1
4	Αφιξη	2
5	Αφιξη	3
5	Τέλος Εξυπηρέτησης	1
5	Έναρξη Εξυπηρέτησης	2
8	Αφιξη	4
10	Τέλος Εξυπηρέτησης	2

10	Έναρξη Εξυπηρέτησης	3
12	Αφίξη	5
12	Τέλος Εξυπηρέτησης	3
12	Έναρξη Εξυπηρέτησης	4
15	Τέλος Εξυπηρέτησης	4
15	Έναρξη Εξυπηρέτησης	5
21	Τέλος Εξυπηρέτησης	5

Αρχικά, ο χρόνος της προσομοίωσης λαμβάνει τιμή $t = 1$ (από το διαχειριστή της προσομοίωσης). Ο έλεγχος περνάει στη ρουτίνα χρονισμού, η οποία επιλέγει τα γεγονότα εκείνης της χρονικής στιγμής για να τα εκτελέσει (βήμα 2). Η εκτέλεση των δύο γεγονότων (βήμα 3) της χρονικής στιγμής $t = 1$ είναι αντικείμενο μίας ρουτίνας υλοποίησης, η οποία, για το συγκεκριμένο παράδειγμα, περιγράφεται παρακάτω. Όταν ολοκληρωθεί η εκτέλεση, ο έλεγχος θα περάσει στη ρουτίνα χρονισμού, η οποία με τη σειρά της θα διαγράψει την πρώτη καταχώρηση (βήμα 4) και θα περάσει τον έλεγχο στο διαχειριστή, ώστε να διαχειριστεί το ρολόι της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή του ρολογιού θα αυξηθεί σε $t = 4$, ο έλεγχος θα περάσει στη ρουτίνα χρονισμού και η διαδικασία αυτή θα επαναληφθεί, μέχρι το σημείο που η λίστα μελλοντικών γεγονότων να μείνει κενή. Στο σημείο αυτό, η προσομοίωση τερματίζεται.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να κάνουμε μία αναφορά στο διάγραμμα του προγράμματος ελέγχου προσομοίωσης γεγονότων του Σχήματος 4.2. Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, τα τμήματά του, με εξαίρεση το τμήμα "Διαχείριση Χρόνου Προσομοίωσης", αποτελούν κλήσεις σε συγκεκριμένες ρουτίνες υλοποίησης, οι οποίες εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Αναλυτικότερα, το τμήμα "Προσδιορισμός γεγονότων προς εκτέλεση" αποτελεί κλήση της ρουτίνας χρονισμού, ενώ το τμήμα "Εκτέλεση γεγονότων" αποτελεί κλήση από τη ρουτίνα χρονισμού προς μία συγκεκριμένη ρουτίνα υλοποίησης δευτέρου επιπέδου. Η ρουτίνα υλοποίησης εκτελεί τα γεγονότα, αλλάζει την κατάσταση του συστήματος και τις τιμές των παραμέτρων, υπολογίζει στατιστικά στοιχεία, και δρομολογεί νέα γεγονότα για τα οποία ενημερώνει τη λίστα. Η σχεδίαση νέων γεγονότων περιλαμβάνει την κλήση μίας ρουτίνας τρίτου επιπέδου (κουτί με τίτλο "Ενημέρωση χρονικής λίστας"), ώστε να παραχθούν οι τυχαίοι αριθμοί (χρόνοι άφιξης και διάρκειας εξυπηρέτησης κάθε πελάτη) βάσει των οποίων θα σχεδιαστεί το επόμενο γεγονός. Στηριζόμενοι στα

παραπάνω, μπορούμε να δώσουμε μία άλλη μορφή αυτού του διαγράμματος, βάσει των κλήσεων που γίνονται από το πρόγραμμα ελέγχου προς συγκεκριμένες ρουτίνες υλοποίησης. Το διάγραμμα αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα του προγράμματος ελέγχου προσομοίωσης γεγονότων βάσει των κλήσεων σε ρουτίνες

Σύμφωνα με το Παράδειγμα 4.3., η λίστα μελλοντικών γεγονότων περιέχει τρία διαφορετικά γεγονότα:

1. Άφιξη
2. Έναρξη εξυπηρέτησης

3. Τέλος εξυπηρέτησης

Παρακάτω, δίνονται τα λογικά διαγράμματα των ρουτινών υλοποίησης αυτών των γεγονότων. Η πρώτη ρουτίνα (υλοποίησης αφίξεων και έναρξης εξυπηρέτησης), καλεί μία ρουτίνα τρίτου επιπέδου δρομολογώντας την επόμενη άφιξη και εξετάζει αν ο εξυπηρέτης είναι διαθέσιμος. Αν είναι, τότε ξεκινά την εξυπηρέτηση του πελάτη, δεσμεύει τον εξυπηρέτη και καθορίζει το χρόνο διάρκειας της εξυπηρέτησης, καλώντας ξανά μία ρουτίνα τρίτου επιπέδου. Σε διαφορετική περίπτωση, ο πελάτης εισάγεται στην ουρά αναμονής και αναμένει μέχρι να εξυπηρετηθεί. Τα βήματα υλοποίησης της ρουτίνας είναι τα εξής:

Βήμα 1: Σχεδίαση χρονικής στιγμής επόμενης άφιξης (Ενημέρωση λίστας)

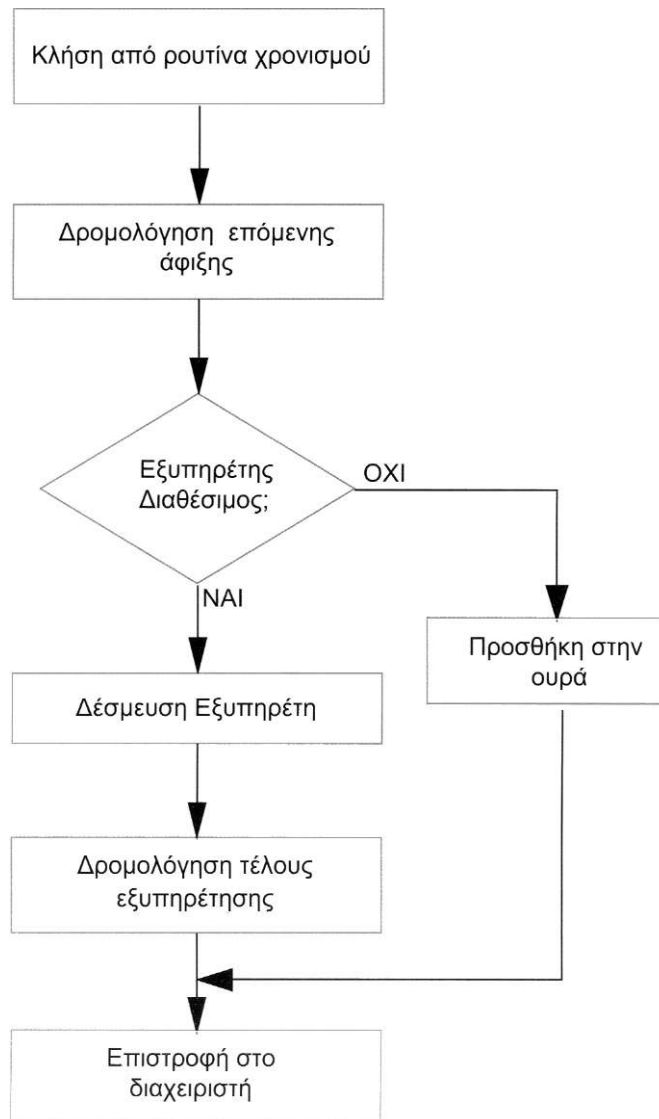
Βήμα 2: Έλεγχος αν ο εξυπηρέτης είναι διαθέσιμος. Αν ναι μετάβαση στο Βήμα 3. Αν όχι, προσθήκη στην ουρά και μετάβαση στο βήμα 5

Βήμα 3: Δέσμευση του εξυπηρέτη

Βήμα 4: Δρομολόγηση του τέλους εξυπηρέτησης (Ενημέρωση λίστας)

Βήμα 5: Επιστροφή στο διαχειριστή

Παρατηρείστε ότι, στα βήματα 1 και 4 δρομολογούνται δύο γεγονότα: η επόμενη άφιξη και το τέλος εξυπηρέτησης. Αυτό σημαίνει ότι καλούνται δύο ρουτίνες τρίτου επιπέδου, οι οποίες παράγουν τυχαίους αριθμούς βάσει στατιστικών κατανομών (εκθετική για τις αφίξεις, ομοιόμορφη για τις εξυπηρετήσεις). Το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης αφίξεων δίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6. Λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης αφίξεων σε ένα σύστημα απλής ουράς

Η ρουτίνα τέλους εξυπηρέτησης ελέγχει αν υπάρχει άλλος πελάτης στην ουρά και αν αυτό ισχύει, δεσμεύει τον εξυπηρέτη. Αν όχι, ο εξυπηρέτης αποδεσμεύεται. Με άλλα λόγια, ο ρόλος της ρουτίνας είναι η εκκαθάριση της ουράς. Τα βήματα υλοποίησης της ρουτίνας είναι τα εξής:

Βήμα 1: Έλεγχος αν υπάρχει πελάτης στην ουρά. Αν ναι μετάβαση στο Βήμα 2, αλλιώς αποδέσμευση του εξυπηρέτη και μετάβαση στο βήμα 5.

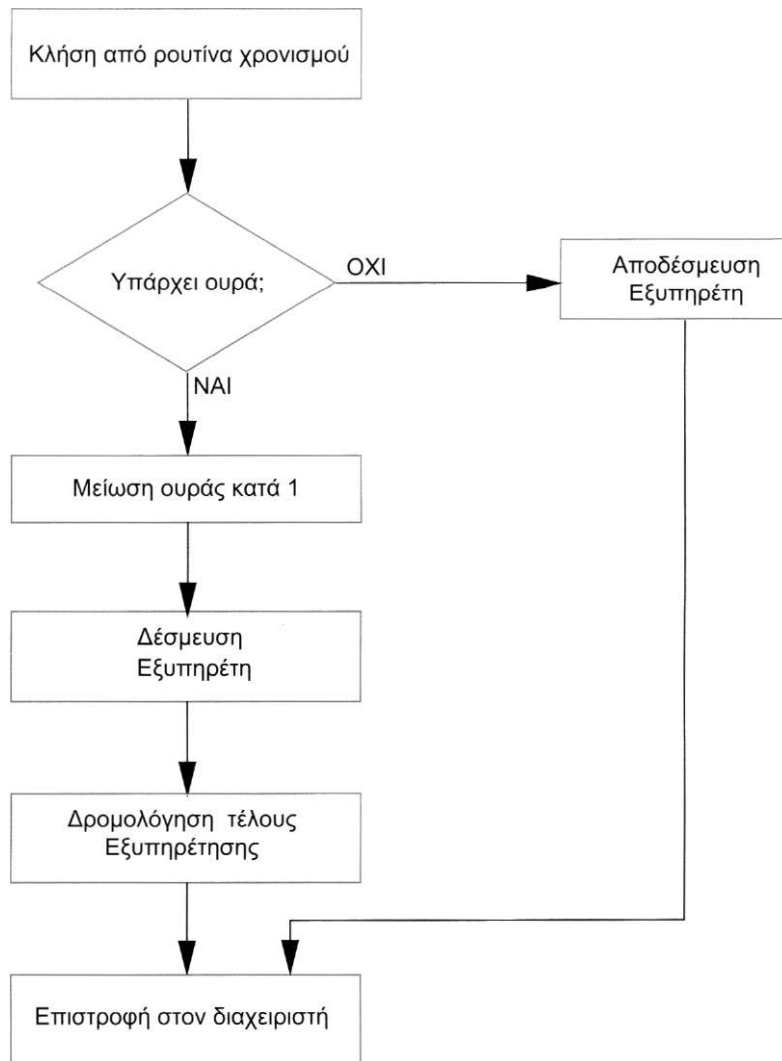
Βήμα 2: Μείωση της ουράς κατά 1

Βήμα 3: Δέσμευση του εξυπηρέτη

Βήμα 4: Δρομολόγηση του τέλους εξυπηρέτησης (Ενημέρωση λίστας)

Βήμα 5: Επιστροφή στο διαχειριστή

Το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης του τέλους εξυπηρέτησης σε ένα σύστημα απλής ουράς δίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7. Λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης του τέλους εξυπηρέτησης σε ένα σύστημα απλής ουράς

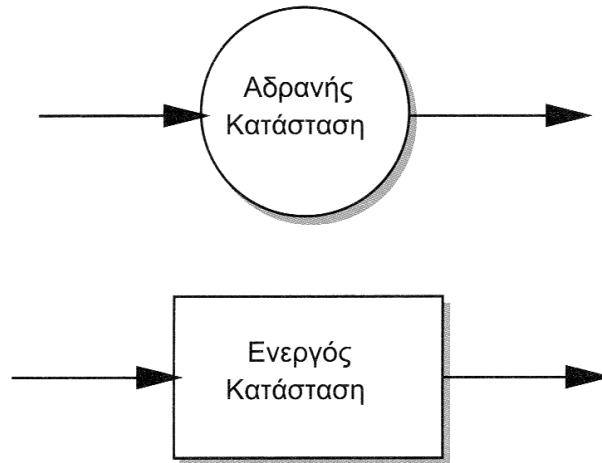
4.4. Προσομοίωση Δραστηριοτήτων

Η μεθοδολογία αυτή αναπτύχθηκε στη Μεγάλη Βρετανία, όπου και κυρίως χρησιμοποιείται, και εξελίχθηκε από τους Buxton και Laski (1962) ως βασική προσομοίωση δραστηριοτήτων και από τον Tocher (1963) ως μεθοδολογία των τριών φάσεων. Στη συνέχεια, η προσομοίωση δραστηριοτήτων χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στις οντότητες, μία μέθοδος που

αναπτύχθηκε από τον Hills (1971) και ονομάζεται "διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων".

4.4.1. Διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων

Τα διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων χρησιμοποιούν τα δύο σύμβολα που φαίνονται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11. Σύμβολα των διαγραμμάτων κύκλου δραστηριοτήτων

Οι καταστάσεις, τις οποίες δηλώνουν τα σύμβολα, αναφέρονται σε καταστάσεις των οντοτήτων του μοντέλου. Η αδρανής κατάσταση αναφέρεται συνήθως σε αναμονή της οντότητας μέχρι να συμβεί ένα γεγονός. Για το λόγο αυτό, οι αδρανείς καταστάσεις συνδέονται με ουρές. Η διάρκεια των αδρανών καταστάσεων δεν μπορεί να καθορισθεί εκ των προτέρων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο χρόνος αναμονής στην ουρά δεν είναι προκαθορισμένος, αλλά εξαρτάται από το χρόνο εξυπηρέτησης των προηγούμενων πελατών, που περιμένουν στην ουρά.

Η ενεργός κατάσταση αναφέρεται συνήθως σε αλληλεπίδραση της οντότητας με οντότητες που ανήκουν σε άλλη κατηγορία. Η διάρκεια της ενεργούς κατάστασης μπορεί πάντα να προσδιορισθεί εκ των προτέρων. Αν το μοντέλο της προσομοίωσης είναι προσδιορισμένο, η διάρκεια της ενεργούς κατάστασης είναι σταθερή. Αντίθετα, αν το μοντέλο της προσομοίωσης είναι στοχαστικό, η διάρκεια αυτή καθορίζεται με δειγματοληψία από κάποια κατανομή πιθανοτήτων. Σε ένα σύστημα ουράς, η ενεργός κατάσταση αφορά την εξυπηρέτηση ενός πελάτη.

Τα διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων σχεδιάζονται μετά από καταγραφή όλων των δραστηριοτήτων, από τις οποίες μπορεί να περάσει κάθε οντότητα του μοντέλου.

Για απλοποίηση της διαδικασίας, πρώτα σχεδιάζονται τα διαγράμματα κάθε κατηγορίας οντοτήτων, τα οποία κατόπιν συνδυάζονται για να δημιουργηθεί το συνολικό διάγραμμα του μοντέλου όπως φαίνεται στο Παράδειγμα 4.4.

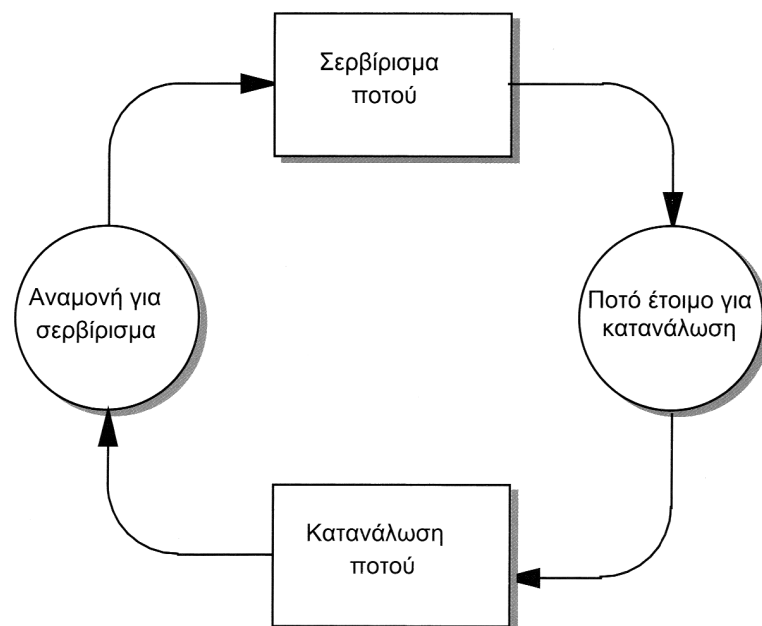
Παράδειγμα 4.4.

Σε ένα μπαρ υπάρχουν διάφοροι πελάτες που πίνουν το ποτό τους και ένας μπάρμαν που τους σερβίρει. Αυτές είναι και οι δύο κατηγορίες οντοτήτων του μοντέλου μας.

Υποθέτουμε ότι οι πελάτες στο μπαρ αυτό είναι γερά ποτήρια. Επομένως, όταν τελειώσουν το ποτό τους ζητούν αμέσως άλλο. Οι καταστάσεις λοιπόν από τις οποίες περνά κάθε πελάτης είναι:

1. Κατανάλωση ποτού
2. Αναμονή για σερβίρισμα
3. Σερβίρισμα ποτού

Το διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του πελάτη δίνεται στο Σχήμα 4.12.



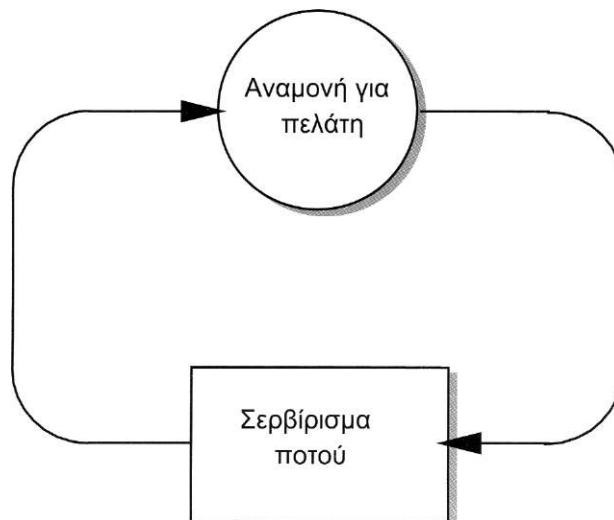
Σχήμα 4.12. Διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του κάθε πελάτη

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται και μία επί πλέον αδρανής κατάσταση του πελάτη: αυτή κατά την οποία το ποτό του είναι έτοιμο προς κατανάλωση. Θεωρητικά, ο πελάτης μπορεί να περάσει απ' ευθείας από το σερβίρισμα στην κατανάλωση.

Στα διαγράμματα όμως κύκλου δραστηριοτήτων, είναι απαραίτητο, για πρακτικούς λόγους, να υπάρχει εναλλαγή των καταστάσεων από αδρανείς σε ενεργές και το αντίθετο. Αυτό βοηθά κυρίως κατά την προσομοίωση, όπου επιδιώκεται να υπάρχει ομοιογένεια στις αλλαγές καταστάσεων.

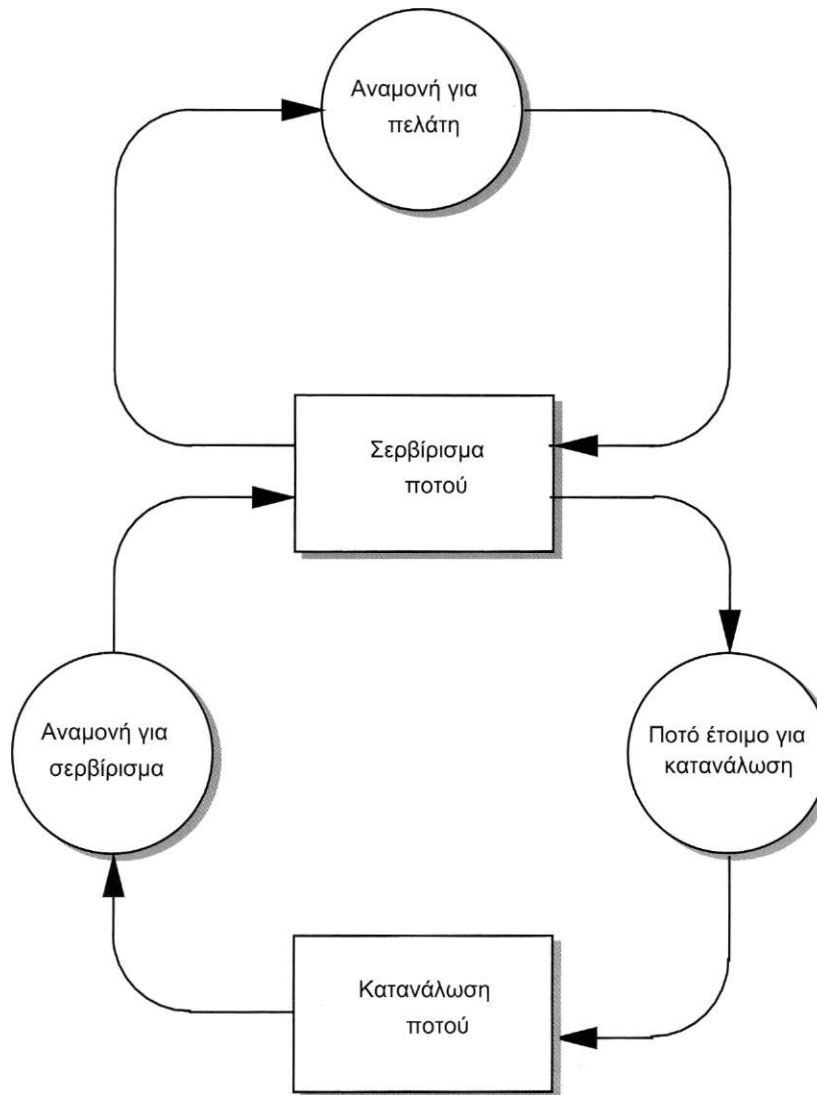
Όσον αφορά τον μπάρμαν, αυτός μπορεί να βρίσκεται σε κάποια από τις δύο καταστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13.:

1. Αναμονή για πελάτη
2. Σερβίρισμα ποτού



Σχήμα 4.13. Διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του μπάρμαν

Παρατηρούμε ότι μία από τις καταστάσεις, και συγκεκριμένα το σερβίρισμα του ποτού, είναι κοινή και στα δύο διαγράμματα. Αυτή η κατάσταση αποτελεί το σύνδεσμο των δύο διαγραμμάτων, όπως φαίνεται στο συνολικό διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του μπαρ που δίνεται στο Σχήμα 4.14.



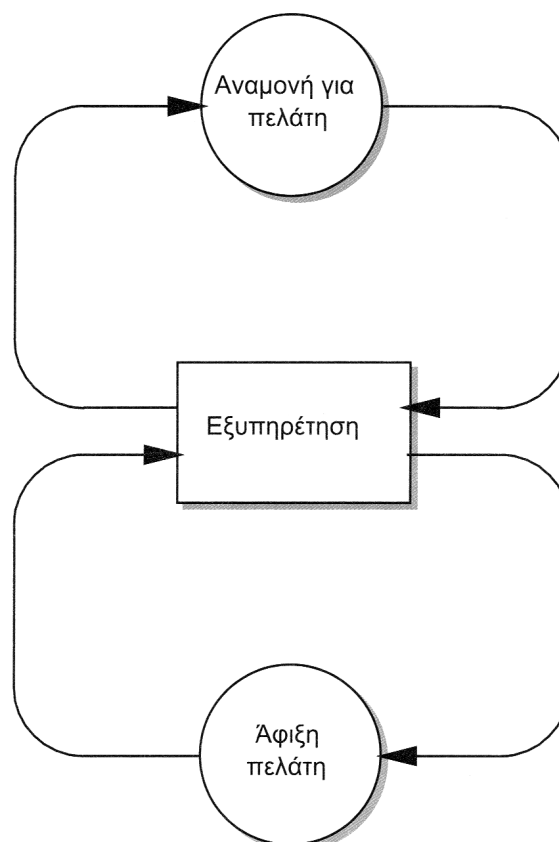
Σχήμα 4.14. Διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του μπαρ

Εξετάζοντας το διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι:

1. Οι ενεργές καταστάσεις δεν είναι απαραίτητο να δείχνουν αλληλεπίδραση δύο οντοτήτων. Πράγματι, η κατάσταση "κατανάλωση ποτού" αφορά μόνο μία οντότητα. Αν όμως αφορούν αλληλεπίδραση δύο οντοτήτων, όπως στην περίπτωση του σερβιρίσματος, τότε αφορούν οντότητες που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες ή κλάσεις.
2. Οι αδρανείς καταστάσεις αφορούν είτε αναμονή σε ουρά, όπως στην περίπτωση της "αναμονής για σερβίρισμα", είτε αναμονή για να συμβεί κάτι. Πράγματι, ο μπάρμαν όταν είναι αδρανής δεν περιμένει σε μια ουρά, αλλά περιμένει κάποιον από τους πελάτες να τελειώσει το ποτό του και να ζητήσει άλλο.

3. Στα διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων δεν φαίνονται λεπτομερειακά όλες οι οντότητες του μοντέλου, αλλά οι κατηγορίες των οντοτήτων. Για παράδειγμα, η κατάσταση "κατανάλωση ποτού" αναφέρεται σε κάθε πελάτη του μπαρ που καταναλώνει το ποτό του.

Στο προηγούμενο παράδειγμα το σύστημα είναι κλειστό, δηλαδή δεν έχει εξωγενείς δραστηριότητες ή οντότητες. Πως ορίζονται οι καταστάσεις στην περίπτωση ενός ανοικτού συστήματος; Η λύση είναι πολύ απλή και επιτυγχάνεται με την προσθήκη μίας δραστηριότητας που παράγει τις οντότητες που εισέρχονται στο σύστημα. Το διάγραμμα ενός απλού συστήματος ουράς δίνεται στο Σχήμα 4.15.



Σχήμα 4.15. Διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων μίας απλής ουράς

Η αδρανής κατάσταση "Άφιξη πελάτη" μοντελοποιεί τόσο τους πελάτες που πρόκειται να εισέλθουν στο σύστημα όσο και τους πελάτες που περιμένουν στην ουρά. Το βέλος από την κατάσταση "Εξυπηρέτηση" στην κατάσταση "Άφιξη πελάτη" δεν υποδηλώνει ότι ο πελάτης που αποχωρεί από τον εξυπηρετητή επανέρχεται στην ουρά, αλλά απλώς ότι επιστρέφει στον πληθυσμό των πιθανών πελατών του συστήματος.

Τα διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων έχουν το μειονέκτημα να βασίζονται σε καταστάσεις "ενεργών" οντοτήτων, δηλαδή οντοτήτων που κυρίως κινούνται μέσα στο σύστημα και αλλάζουν κατάσταση με προκαθορισμένο τρόπο. Όταν όμως δεν ενδιαφέρουν αυτές οι οντότητες, τα διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων οδηγούν συχνά σε υπερβολικά πολύπλοκα μοντέλα.

Για παράδειγμα, έστω ότι δίνεται το μοντέλο ενός δικτύου υπολογιστών μέσα από το οποίο διακινούνται μηνύματα. Είναι εύκολο να σχεδιασθεί το διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων για τη μετάδοση των μηνυμάτων. Αν όμως αυτό που ενδιαφέρει είναι οι χώροι αποθήκευσης των μηνυμάτων (buffers) στους ενδιάμεσους κόμβους (για να προσδιορισθεί το μέγεθος τους, το ποσοστό του χρόνου που είναι κενοί κ.λ.π.), τότε το διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων γίνεται υπερβολικά πολύπλοκο.

Παρόμοιο πρόβλημα παρουσιάζεται όταν μία δραστηριότητα διακόπτεται πριν ολοκληρωθεί. Για παράδειγμα, σε ένα υπολογιστικό σύστημα, η εκτέλεση μίας διεργασίας μπορεί να διακοπεί πριν ολοκληρωθεί, εξ αιτίας κάποιου εξωτερικού παράγοντα, όπως είναι η διακοπή (interrupt) από τον εκτυπωτή. Στην περίπτωση αυτή, η αλλαγή της κατάστασης δεν θα συμβεί στον προκαθορισμένο χρόνο, αλλά μόλις συμβεί η διακοπή.

Παρά τα μειονεκτήματά τους, τα διαγράμματα κύκλου εργασιών είναι πολύ χρήσιμα, ιδίως στην προσομοίωση δραστηριοτήτων. Ως εργαλεία μοντελοποίησης μπορούν να επεκταθούν, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν όχι μόνο εναλλαγές δύο καταστάσεων, αλλά περισσοτέρων. Μία τέτοια επέκταση αποτελούν τα δί-κτυα Petri που εξετάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.4.2. Διαχειριστής της προσομοίωσης δραστηριοτήτων

Η προσομοίωση δραστηριοτήτων στηρίζεται στις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις οντότητες του μοντέλου, σε αντίθεση με την προσομοίωση γεγονότων που είχε ως βάση τις λειτουργίες που πρέπει να γίνουν όταν συμβεί μία αλλαγή κατάστασης. Με την έννοια αυτή, οι δραστηριότητες ορίζονται ως το σύνολο των ενεργειών που ακολουθούν κάθε αλλαγή κατάστασης. Η διαφορά με την προσομοίωση γεγονότων μπορεί να γίνει περισσότερο εμφανής, αν εξετασθεί το απλό παράδειγμα της ουράς από την άποψη της προσομοίωσης δραστηριοτήτων.

Κατά την προσομοίωση γεγονότων υπήρχαν δύο ανεξάρτητα γεγονότα και δύο εξαρτημένα. Τα δύο ανεξάρτητα γεγονότα θα πρέπει τώρα να προσομοιωθούν με τρεις δραστηριότητες:

1. Άφιξη ενός πελάτη,
2. Αρχή νέας εξυπηρέτησης, και
3. Τέλος εξυπηρέτησης

Οι τρεις αυτές δραστηριότητες είναι απαραίτητες γιατί αντιπροσωπεύουν αλλαγή κατάστασης των οντοτήτων.

Το δεύτερο επίπεδο, το επίπεδο λειτουργιών, αποτελείται από ένα σύνολο ρουτινών οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν για κάθε δραστηριότητα. Όλες οι ρουτίνες έχουν την ίδια δομή, που αποτελείται από δύο τμήματα:

- Έλεγχος Συνθηκών: Το τμήμα αυτό ελέγχει τις συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για να λάβει χώρα η δραστηριότητα. Επειδή οι ρουτίνες καλούνται από τον διαχειριστή της προσομοίωσης σε κάθε κύκλο αύξησης του χρόνου προσομοίωσης, ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος για να καθορισθεί ποιές δραστηριότητες θα εκτελεσθούν και ποιές όχι.
- Ενέργειες: Το τμήμα αυτό είναι το κυρίως σώμα της ρουτίνας και περιλαμβάνει όλες τις ενέργειες που πρέπει να εκτελεσθούν για τη σωστή εκτέλεση της δραστηριότητας.

Σε αντίθεση επομένως με την προσομοίωση γεγονότων, κατά την προσομοίωση δραστηριοτήτων υπάρχει μία σειρά από δραστηριότητες που περιμένουν να εκτελεσθούν, αν οι συνθήκες εκτέλεσής τους πληρούνται.

Κατά την προσομοίωση δραστηριοτήτων, ο διαχειριστής είναι υπεύθυνος κυρίως για δύο λειτουργίες:

1. Τον έλεγχο του χρόνου,
2. Την κλήση όλων των ρουτινών δραστηριοτήτων

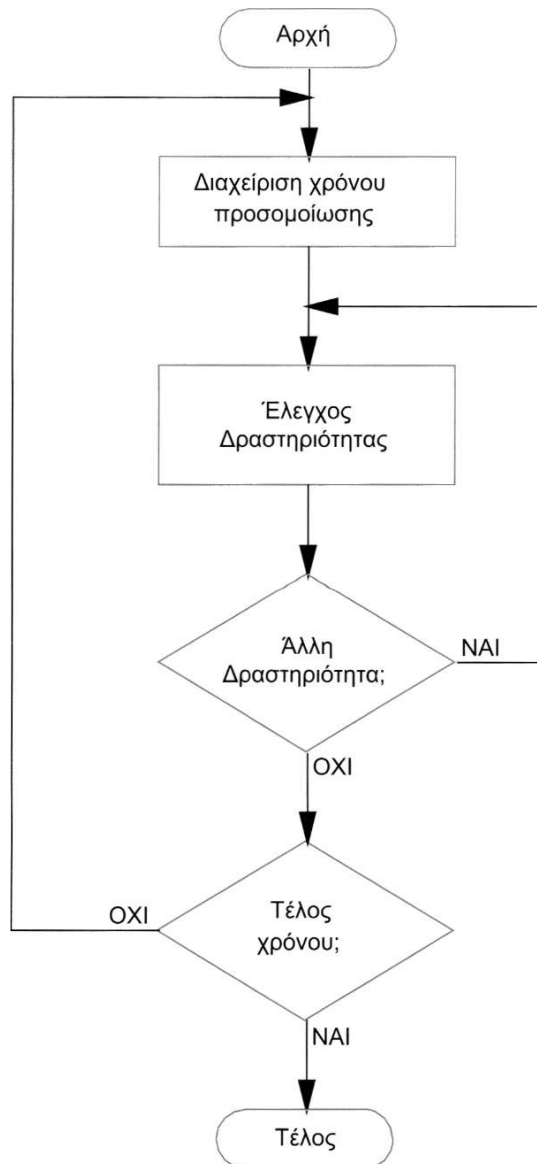
Ο έλεγχος του χρόνου γίνεται και πάλι μέσω του ρολογιού της προσομοίωσης, το οποίο δείχνει σε κάθε χρονική στιγμή το χρόνο της προσομοίωσης. Η διαχείριση όμως του ρολογιού, γίνεται στην περίπτωση αυτή με βάση την αρχή και το τέλος κάθε

δραστηριότητας. Ενώ δηλαδή κατά τη μέθοδο της προσομοίωσης γεγονότων ο διαχειριστής διατηρούσε μία χρονική λίστα με τα μελλοντικά γεγονότα, κατά τη μέθοδο της προσομοίωσης δραστηριοτήτων διατηρεί μία λίστα με τις μελλοντικές αλλαγές κατάστασης, έτσι όπως καθορίζονται από τις ρουτίνες που εκτελούνται για κάθε δραστηριότητα.

Επομένως, το σώμα του διαχειριστή αποτελείται τώρα από δύο φωλιασμένους βρόγχους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Ο εξωτερικός βρόγχος επιτελεί τον έλεγχο του χρόνου και την αύξηση του ρολογιού της προσομοίωσης, όπως και κατά την προσομοίωση γεγονότων. Ο εσωτερικός βρόγχος καλεί με τη σειρά όλες τις ρουτίνες δραστηριοτήτων.

Οι ρουτίνες των οποίων το τμήμα ελέγχου συνθηκών διαπιστώνει ότι ήλθε η ώρα για την αντίστοιχη αλλαγή κατάστασης θα εκτελέσουν τις ενέργειες που απαιτούνται γι' αυτή την αλλαγή κατάστασης. Όσες ρουτίνες διαπιστώσουν ότι η δραστηριότητα τους συνεχίζεται, απλώς επιστρέφουν τον έλεγχο στον διαχειριστή της προσομοίωσης.

Επειδή ο έλεγχος των δραστηριοτήτων και του χρόνου αρχής και λήξης τους γίνεται στο δεύτερο επίπεδο, ο διαχειριστής της προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιήσει το μηχανισμό ροής χρόνου σταθερού διαστήματος, ο οποίος είναι απλούστερος στη διαχείριση. Μπορεί βεβαίως να χρησιμοποιηθεί και ο μηχανισμός χρόνου επόμενου γεγονότος, όπου όμως αντί για γεγονότα υπάρχουν αλλαγές κατάστασης. Οι ρουτίνες δραστηριοτήτων είναι υπεύθυνες για την ενημέρωση του διαχειριστή ως προς το χρόνο κατά τον οποίο θα συμβεί η επόμενη αλλαγή κατάστασης.



Σχήμα 4.16. Διάγραμμα του προγράμματος ελέγχου προσομοίωσης δραστηριοτήτων

4.4.3. Ρουτίνες υλοποίησης

Οι ρουτίνες υλοποίησης διαχειρίζονται τις λεπτομέρειες της εκτέλεσης μίας δραστηριότητας. Η διαφορά των ρουτινών υλοποίησης δραστηριοτήτων σε σχέση με τις ρουτίνες υλοποίησης γεγονότων είναι ότι οι πρώτες εκτελούνται μόνον εφόσον ικανοποιηθούν κάποιες συνθήκες. Ειδικότερα, για κάθε δραστηριότητα καταγράφεται ένα πλήθος ενεργειών ως άμεσες συνέπειες της δραστηριότητας και οι ενέργειες αυτές (δηλαδή η δραστηριότητα), εκτελούνται μόνον αν ισχύουν κάποιες καθορισμένες συνθήκες. Αν δεν ισχύουν οι συνθήκες, δεν εκτελείται τίποτα και ο έλεγχος περνά στο διαχειριστή. Αντίθετα, στην προσομοίωση γεγονότων, καταγράφονται όλα τα πιθανά αποτελέσματα ενός γεγονότος με τη μορφή ενεργειών και εκτελούνται ορισμένες από αυτές της ενέργειας. Για το λόγο αυτό, στην

προσομοίωση δραστηριοτήτων δεν χρησιμοποιείται λίστα μελλοντικών γεγονότων, αλλά κάθε δραστηριότητα συνοδεύεται από μία χρονική τιμή, στην οποία θα αλλάξει κατάσταση το σύστημα. Αν το ρολόι της προσομοίωσης ξεπεράσει μία τέτοια τιμή, αυτό αποτελεί ένδειξη αδράνειας του συστήματος (περιμένει να γίνει κάτι).

Ο στόχος αυτής της ενότητας δεν είναι τόσο η παρουσίαση αυτών καθαυτών των ρουτινών υλοποίησης, όσο η κατανόηση της διαφοράς ανάμεσα στην προσομοίωση γεγονότων και την προσομοίωση δραστηριοτήτων. Πριν προχωρήσουμε, είναι χρήσιμο να καταγράψουμε τις ενέργειες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα εξυπηρέτησης μίας απλής ουράς πελατών, όταν υπάρχει ένα γεγονός άφιξης ή τέλους εξυπηρέτησης. Οι ενέργειες αυτές καταγράφονται στα Σχήματα 4.6. και 4.7., τα οποία αφορούν την προσομοίωση γεγονότων. Όμως, οι ενέργειες είναι κοινές ανεξάρτητα από το μηχανισμό προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθεί.

1. Σχεδίαση επόμενης άφιξης
2. Δέσμευση εξυπηρέτη
3. Αύξηση ουράς (προσθήκη του πελάτη στην ουρά)
4. Σχεδίαση τέλους εξυπηρέτησης
5. Μείωση ουράς (αφαίρεση του πελάτη από την ουρά)
6. Αποδέσμευση εξυπηρέτη

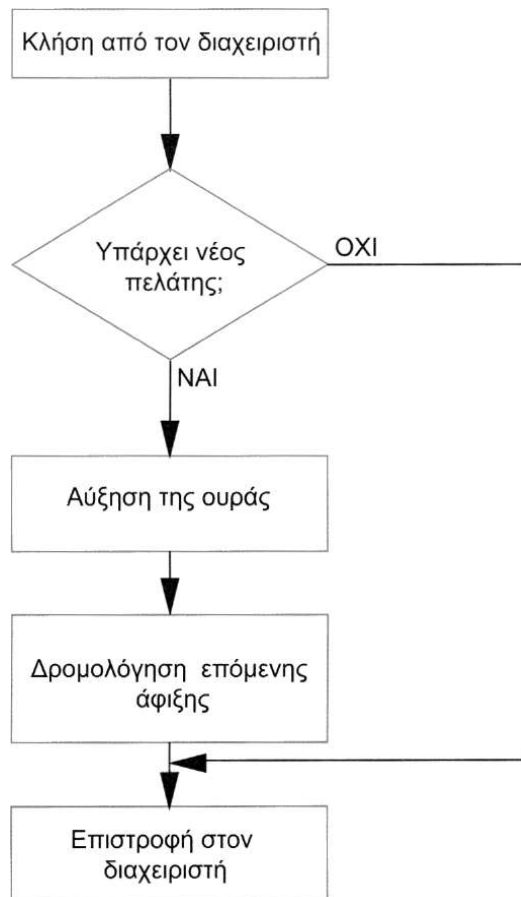
Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε τον ορισμό της δραστηριότητας που δόθηκε στην αρχή της Ενότητας 4.2.: Δραστηριότητα είναι μία λειτουργία η οποία μεταβάλλει την κατάσταση μίας οντότητας. Επομένως, στο παράδειγμα της απλής ουράς υπάρχουν τρεις δραστηριότητες, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο:

1. Άφιξη ενός πελάτη,
2. Αρχή νέας εξυπηρέτησης, και
3. Τέλος εξυπηρέτησης

Για κάθε μία από αυτές τις δραστηριότητες, θα πρέπει να οριστεί ένα σύνολο από ενέργειες, οι οποίες αποτελούν άμεσες συνέπειες, των δραστηριοτήτων. Για παράδειγμα, η δραστηριότητα "Άφιξη πελάτη" έχει ως άμεσες συνέπειες:

1. Την αύξηση της ουράς (προσθήκη του πελάτη στην ουρά)
2. Τη σχεδίαση της επόμενης άφιξης

Οι ενέργειες θα εκτελεστούν μόνον αν ισχύει η συνθήκη ύπαρξης νέου πελάτη. Αν δεν υπάρχει νέος πελάτης, δεν θα εκτελεστεί καμία από τις δύο ενέργειες (δηλαδή η δραστηριότητα) και ο έλεγχος θα περάσει στο διαχειριστή. Το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης της δραστηριότητας "Άφιξη πελάτη" δίνεται στο Σχήμα 4.17.

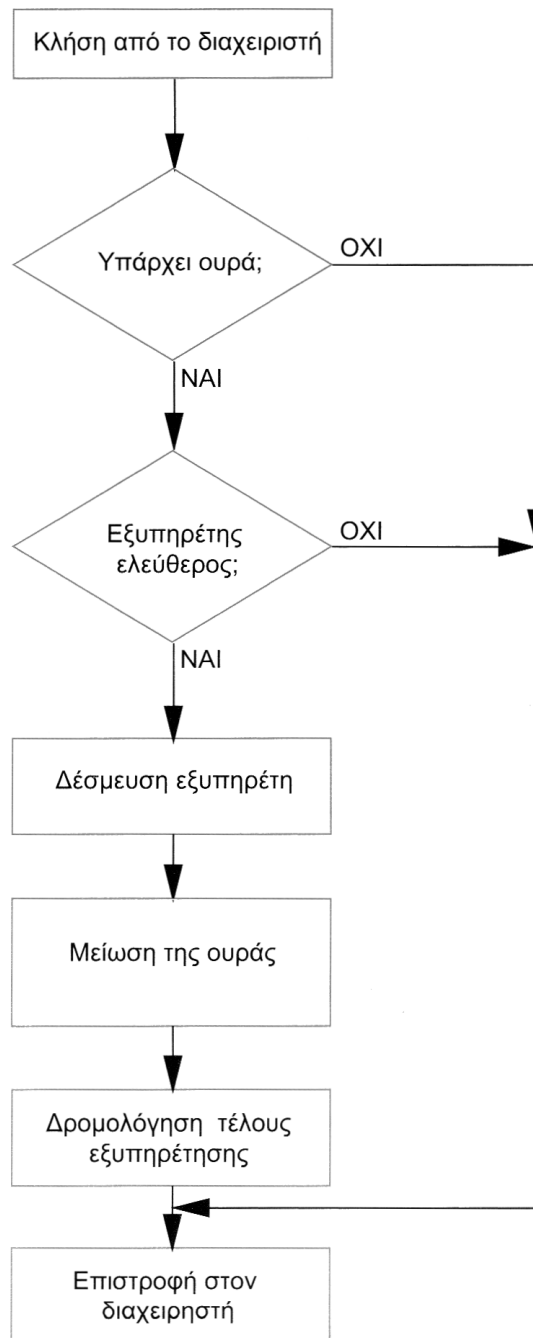


Σχήμα 4.17. Διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης της "Άφιξη πελάτη"

Ομοίως, η δραστηριότητα "Αρχή της εξυπηρέτησης" έχει ως άμεσες συνέπειες :

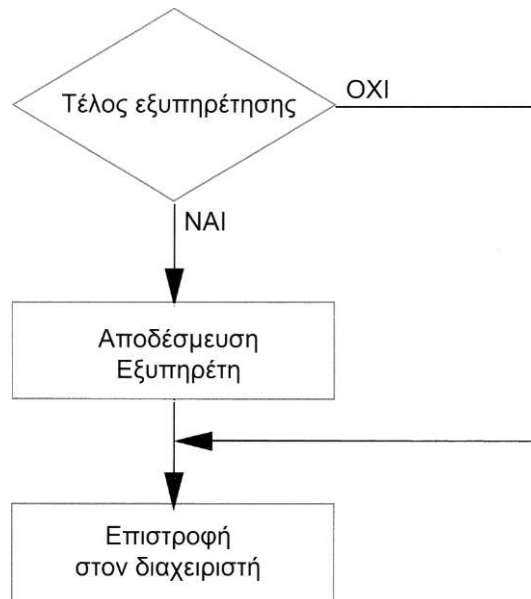
1. Τη δέσμευση του εξυπηρέτη
2. Τη μείωση της ουράς (αφαίρεση του πελάτη από την ουρά)
3. Τη σχεδίαση του τέλους της εξυπηρέτησης

Οι ενέργειες αυτές εκτελούνται μόνον αν ο εξυπηρέτης είναι ελεύθερος και υπάρχει ουρά πελατών προς εξυπηρέτηση. Αν δεν ισχύει μία από τις δύο αυτές συνθήκες, δεν θα εκτελεστεί καμία ενέργεια και ο έλεγχος θα περάσει στο διαχειριστή. Το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης της δραστηριότητας "Αρχή εξυπηρέτησης" δίνεται στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18. Διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης της "Αρχή εξυπηρέτησης"

Τέλος, η διαδικασία "Τέλος εξυπηρέτησης" έχει ως άμεση συνέπεια την αποδέσμευση του εξυπηρέτη. Όπως και στις άλλες δραστηριότητες, αν δεν φθάσει το τέλος του χρόνου εξυπηρέτησης (συνθήκη), δεν εκτελείται η ενέργεια και ο έλεγχος περνά στο διαχειριστή. Το λογικό διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης της δραστηριότητας "Τέλος εξυπηρέτησης" δίνεται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19. Διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης του "Τέλος εξυπηρέτησης"

Το λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.16. καθιστά σαφές το βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζει η προσομοίωση δραστηριοτήτων. Κάθε φορά που υπάρχει ένα γεγονός, ο διαχειριστής προσπαθεί να εκτελέσει ένα σύνολο δραστηριοτήτων, για πολλές από τις οποίες δεν ισχύουν οι συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι τα προγράμματα προσομοίωσης δραστηριοτήτων δαπανούν αρκετό χρόνο χωρίς να κάνουν κάποια πραγματική εργασία. Από την άλλη, η προσομοίωση γεγονότων εκτελεί τα γεγονότα τα οποία βρίσκονται στη λίστα και είναι εφικτή η εκτέλεσή τους επομένως είναι πιο αποτελεσματική ως προς το χρόνο εκτέλεσής της. Από την άλλη, τα προγράμματα προσομοίωσης δραστηριοτήτων είναι πιο απλά στην υλοποίηση, λόγω της δυνατότητας τους να χρησιμοποιούν το μηχανισμό ροής σταθερού διαστήματος, ο οποίος είναι πιο απλός στην υλοποίηση και στη διαχείριση.

4.4.4. Η μέθοδος των τριών φάσεων

Η μέθοδος των τριών φάσεων παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Tocher (1963) και αποτελεί συνδυασμό των μεθόδων προσομοίωσης γεγονότων και δραστηριοτήτων. Προς το σκοπό αυτό διακρίνει τις δραστηριότητες σε δύο κατηγορίες:

1. Δραστηριότητες, για τις οποίες ο χρόνος έναρξης μπορεί να προσδιορισθεί και οι οποίες δρομολογούνται γι' αυτούς τους προβλεπόμενους χρόνους.
2. Δραστηριότητες, οι οποίες μπορεί να συμβούν ή μπορεί να μη συμβούν, ανάλογα με τις συνθήκες της προσομοίωσης τη στιγμή του ελέγχου.

Επομένως, κάποιες δραστηριότητες μπορούν να ελεγχθούν άμεσα από τον διαχειριστή της προσομοίωσης ενώ άλλες εξαρτώνται από την κατάσταση του συστήματος. Οι δραστηριότητες των οποίων ο χρόνος έναρξης μπορεί να προσδιορισθεί, ονομάζονται "B" δραστηριότητες (από το Bound=αναπόφευκτες) ενώ οι υπόλοιπες ονομάζονται "C" δραστηριότητες (από το Conditional= υπό συνθήκη).

Με βάση την ταξινόμηση των γεγονότων κατά την προσομοίωση γεγονότων, οι δραστηριότητες B και C αντιστοιχούν στα εξαρτημένα και ανεξάρτητα γεγονότα αντίστοιχα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πολλοί συγγραφείς αναφέρονται σε B και C γεγονότα αντί για δραστηριότητες.

Η προσομοίωση των τριών φάσεων, ενώ παραμένει προσομοίωση δραστηριοτήτων, εκμεταλλεύεται ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της προσομοίωσης γεγονότων. Όπως στην προσομοίωση γεγονότων δεν χρειάζεται κανένας έλεγχος για να συμβεί ένα ανεξάρτητο γεγονός, έτσι και εδώ, ελαχιστοποιούνται οι έλεγχοι για την έναρξη των δραστηριοτήτων. Ο διαχειριστής της προσομοίωσης, έχοντας προσδιορίσει τους χρόνους έναρξης των B δραστηριοτήτων, μπορεί να αρχίσει την επεξεργασία μιας δραστηριότητας αμέσως μόλις έλθει ο χρόνος έναρξης, χωρίς να ελέγξει πρώτα αν πληρούνται κάποιες συνθήκες.

4.5. Προσομοίωση Διεργασιών

4.5.1. Ορισμοί

Η προσομοίωση διεργασιών είναι μία εντελώς διαφορετική τεχνική που βασίζεται στη εκτέλεση εργασιών που περιγράφουν την προσομοίωση ανεξάρτητων στοιχείων ή τμημάτων του μοντέλου. Οι εργασίες αυτές επικοινωνούν μεταξύ τους με τη χρήση σημάτων που προσομοιώνουν την επίδραση του ενός στοιχείου του μοντέλου πάνω σε άλλο. Εισάγονται οι παρακάτω ορισμοί:

Ορισμός 4.1.

Διατμηματικό σήμα ονομάζεται κάθε σήμα που είναι κοινό σε περισσότερα από ένα τμήματα του μοντέλου.

Ορισμός 4.2.

Διατμηματική επικοινωνία είναι η αλλαγή ενός διατμηματικού σήματος που προέρχεται από κάποια δραστηριότητα σε ένα τμήμα του μοντέλου.

Ορισμός 4.3.

Εργασία είναι μία πλήρης ατομική λειτουργία ενός τμήματος, δηλαδή μία σειρά γεγονότων τοπικών στο τμήμα. Κάθε εργασία ξεκινά με ένα διατμηματικό σήμα και σταματά όταν συμπληρωθεί ή όταν διακοπεί από ένα άλλο διατμηματικό σήμα.

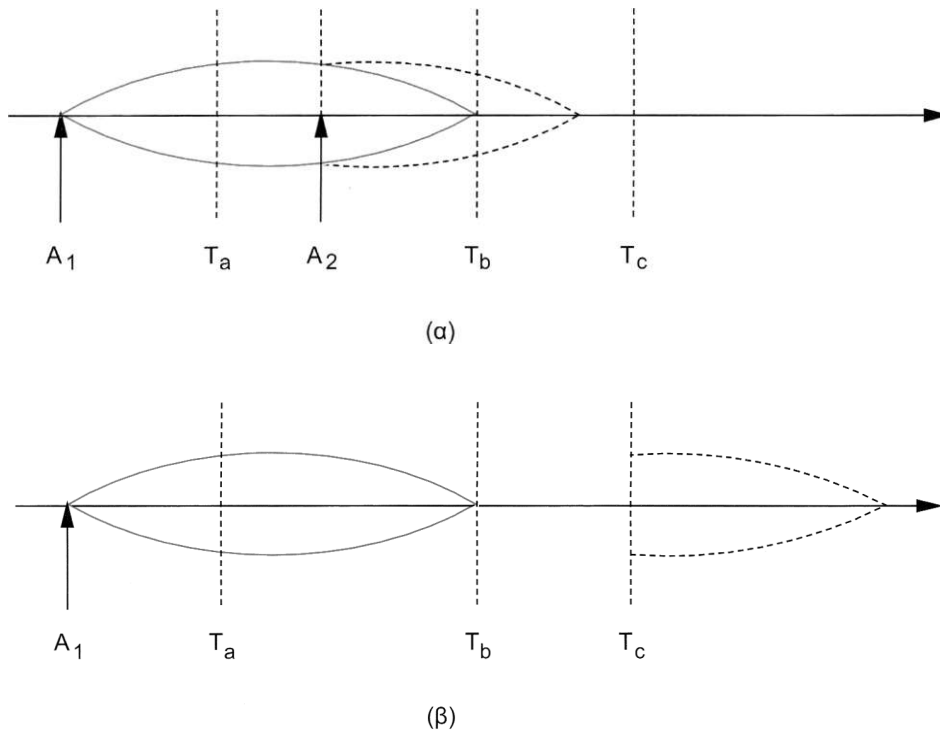
Στην προσομοίωση διεργασιών, κάθε τμήμα του μοντέλου έχει τη δική του χρονική λίστα γεγονότων, τα οποία εκτελούνται από το τμήμα σε χρονική σειρά. Η γενική χρονική λίστα, την οποία διαχειρίζεται το πρόγραμμα ελέγχου, περιέχει τα σήματα διατμηματικής επικοινωνίας, επίσης σε χρονολογική σειρά. Τα γεγονότα που συμβαίνουν σε διαφορετικά τμήματα του μοντέλου, μπορούν να προσομοιωθούν με αυθαίρετη σειρά, ανεξάρτητα από τη χρονική τους σχέση, εφόσον βεβαίως τηρείται η σωστή χρονική σειρά των διατμηματικών γεγονότων.

4.5.2. Εκτέλεση των εργασιών

Κατά την εκτέλεση μιας εργασίας σε ένα τμήμα του μοντέλου, η άφιξη ενός διατμηματικού σήματος μπορεί να επηρεάσει την εξέλιξη της εργασίας. Τα σήματα όμως που επηρεάζουν τις εργασίες μπορούν να προκαθορισθούν, όσον αφορά το χρονικό πλαίσιο στο οποίο μπορεί να συμβούν. Επομένως, κατά την ανάπτυξη του μοντέλου, ο σχεδιαστής πρέπει να γνωρίζει τα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν ανάμεσα στα διατμηματικά σήματα. Η προϋπόθεση αυτή κάνει την προσομοίωση διεργασιών περισσότερο κατάλληλη για προκαθορισμένα μοντέλα με μικρά περιθώρια στοχαστικών δραστηριοτήτων. Θεωρώντας ότι η πληροφορία που αφορά τα διατμηματικά σήματα αυτή είναι γνωστή, η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί να υλοποιηθεί ως εξής:

1. Εκτιμάται ο νωρίτερος χρόνος που μπορεί να συμβεί κάποια διατμηματική επικοινωνία. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος αναστολής της εργασίας και συμβολίζεται με T_a . Εκτιμάται, επίσης, ο αργότερος χρόνος που μπορεί να συμβεί η διατμηματική επικοινωνία. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος λήξης (time-out) και συμβολίζεται με T_c .
2. Προσομοιώνονται όλα τα γεγονότα στη χρονική λίστα του τμήματος μέχρι το χρόνο T_a .
3. Η εκτέλεση του τμήματος αναστέλλεται και σημειώνεται το ακριβές σημείο αναστολής. Ο χρόνος λήξης εισάγεται στη γενική χρονική λίστα.

4. Όταν συμβεί το διατμηματικό γεγονός, η προσομοίωση που ανεστάλη συνεχίζεται, λαμβάνοντας υπ' όψη την επίδραση του γεγονότος που συνέβη.
5. Αν το αναμενόμενο διατμηματικό σήμα δεν εμφανισθεί μέχρι το χρόνο λήξης T_c , η προσομοίωση του τμήματος συνεχίζεται από το σημείο αναστολής μέχρι το τέλος της εργασίας που συμβολίζεται με T_b .

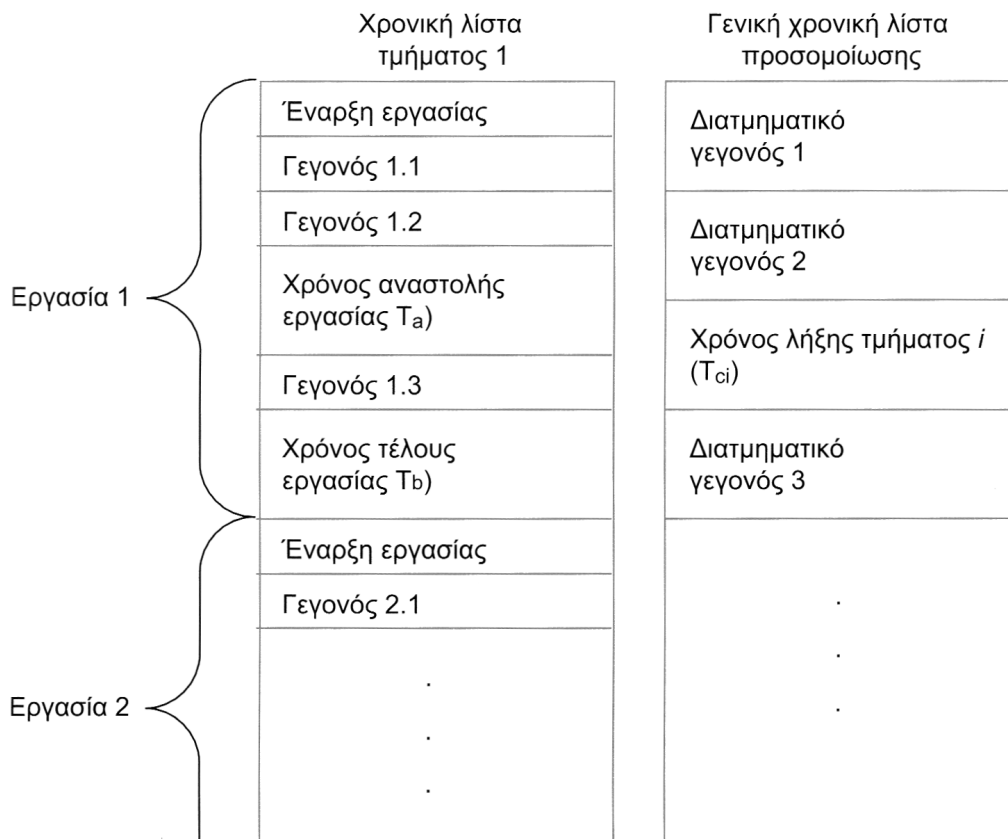


Σχήμα 4.20. Χρονικό διάγραμμα προσομοίωσης διεργασιών

Το χρονικό διάγραμμα που παριστά αυτή τη διαδικασία προσομοίωσης δίνεται στο Σχήμα 4.20(α). Το διατμηματικό σήμα που ξεκινά την εργασία συμβολίζεται με A_1 ενώ το αναμενόμενο διατμηματικό σήμα συμβολίζεται με A_2 . Το δεύτερο αυτό γεγονός αναμένεται να συμβεί ανάμεσα στους χρόνους T_a και T_c . T_b είναι ο χρόνος τερματισμού της εργασίας. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη συνέχιση της εργασίας από τη στιγμή που συμβαίνει το διατμηματικό σήμα A_1 μέχρι το τέλος της εργασίας. Επειδή ο χρόνος του διαγράμματος είναι ο προσομοιούμενος χρόνος, ο χρόνος τερματισμού της εργασίας, T_b , έχει καθυστερήσει κατά χρόνο ίσο με τη διαφορά χρόνου ανάμεσα στο T_a και το A_2 , δηλαδή, το χρόνο που μεσολάβησε από την αναστολή της εργασίας μέχρι να συμβεί το αναμενόμενο γεγονός. Αν το αναμενόμενο γεγονός A_2 δεν συμβεί μέχρι το χρόνο λήξης T_c , η προσομοίωση συνεχίζεται από το

χρόνο T_c μέχρι το τέλος τη συμπλήρωση της εργασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20(β) με διακεκομμένη γραμμή.

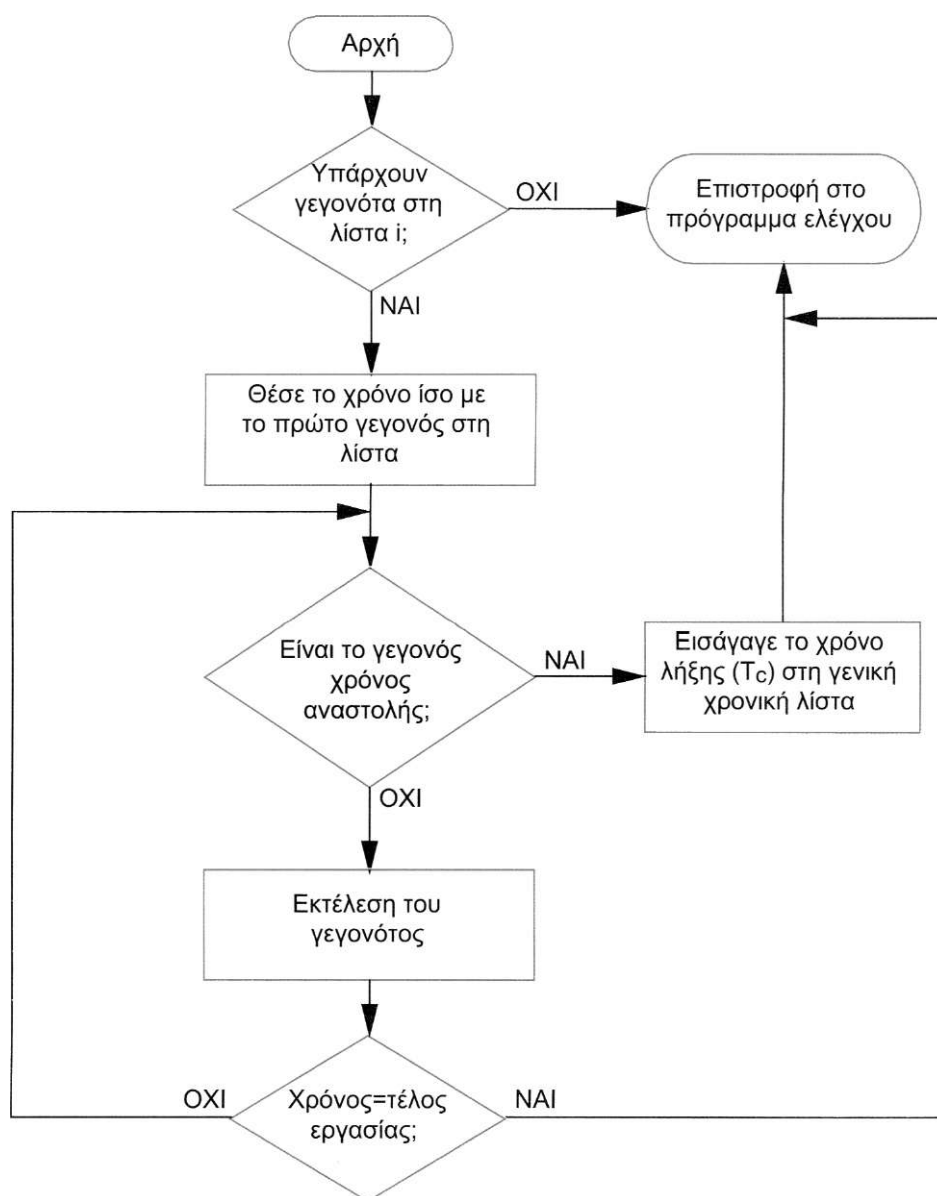
Με βάση αυτούς τους ορισμούς των χρόνων των εργασιών, δίνεται στο Σχήμα 4.21. μία αναπαράσταση της χρονικής λίστας ενός τμήματος του μοντέλου και της γενικής χρονικής λίστας της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.21. Χρονική λίστα τμήματος μοντέλου και γενική χρονική λίστα

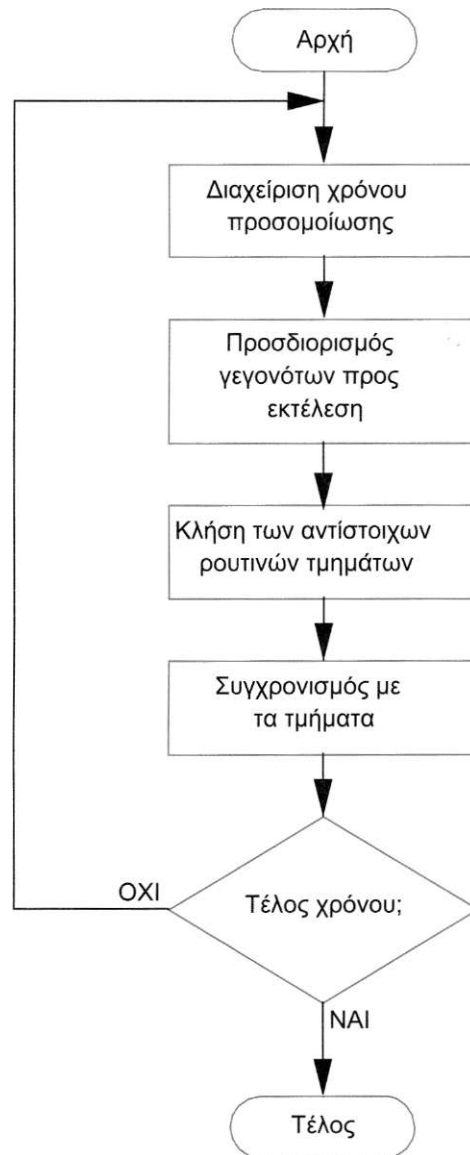
Όπως γίνεται αντιληπτό από τον ορισμό των εργασιών και τις χρονικές λίστες των γεγονότων, η διαχείριση του χρόνου της προσομοίωσης είναι αρκετά πολύπλοκη στην προσομοίωση διεργασιών γιατί πρέπει να γίνεται ταυτόχρονα και από το πρόγραμμα ελέγχου (διαχειριστή) της προσομοίωσης και από κάθε ρουτίνα προσομοίωσης των τμημάτων του μοντέλου. Η διαχείριση όμως αυτή απλοποιείται με τον κατάλληλο συγχρονισμό ανάμεσα στις επί μέρους ρουτίνες και το πρόγραμμα ελέγχου.

Το διάγραμμα ροής κάθε ρουτίνας τμήματος δίνεται στο Σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.22. Διάγραμμα ροής της ρουτίνας διαχείρισης ενός τμήματος του μοντέλου

Το τμήμα αρχίζει να εκτελεί τα γεγονότα της εργασίας του που βρίσκονται στη χρονική του λίστα, μόλις λάβει το διατμηματικό σήμα επικοινωνίας A_1 . Όταν ο χρόνος γίνει ίσος με το χρόνο αναστολής της εργασίας (T_a) η προσομοίωση του τμήματος αναστέλλεται, ο χρόνος λήξης T_c εισάγεται στην γενική χρονική λίστα και ο έλεγχος επιστρέφει στον κεντρικό διαχειριστή της προσομοίωσης. Μόλις συμβεί το γεγονός A_2 , ή μόλις φθάσει ο χρόνος λήξης, αν το γεγονός αυτό δεν έλθει μέχρι τότε, ο διαχειριστής της προσομοίωσης επιστρέφει τον έλεγχο στη ρουτίνα του τμήματος έτσι ώστε να συνεχίσει η προσομοίωση του τμήματος μέχρι το τέλος της εργασίας. Το απλοποιημένο διάγραμμα ροής του διαχειριστή της προσομοίωσης δίνεται στο Σχήμα 4.23.



Σχήμα 4.23. Διάγραμμα του προγράμματος ελέγχου προσομοίωσης διεργασιών

Η προσομοίωση διεργασιών είναι η πλέον κατάλληλη, από τις μεθόδους προσομοίωσης που εξετάστηκαν, για εφαρμογή με παράλληλη επεξεργασία. Κάθε επεξεργαστής του υπολογιστικού συστήματος προσομοιώνει ένα τμήμα του μοντέλου, ενώ ένας κεντρικός επεξεργαστής εκτελεί το πρόγραμμα ελέγχου της προσομοίωσης και είναι υπεύθυνος για τον συγχρονισμό των άλλων επεξεργαστών στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης. Η παράλληλη προσομοίωση, βεβαίως, προϋποθέτει μια λογική τμηματοποίηση του μοντέλου, η οποία όμως είναι εγγενής σε πολλά αιτιοκρατικά συστήματα, όπως για παράδειγμα τα ψηφιακά συστήματα που αποτελούνται από πολλά υποσυστήματα (chips).

5. Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων – Η Μέθοδος των Τριών Φάσεων

5.1. Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 μιλήσαμε για τον εντοπισμό των βασικών στοιχείων ενός συστήματος και τα κριτήρια επιλογής για το ποια από αυτά θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Είδαμε, επιπλέον, πώς τα διαγράμματα ροής χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν τις δραστηριότητες και τα σημεία απόφασης των συστημάτων. Δώσαμε έμφαση στο φαινόμενο των ουρών, το οποίο θα μας απασχολήσει πολύ κατά τη διάρκεια της μελέτης της προσομοίωσης.

Εφόσον οι ουρές είναι βασικό στοιχείο των διακριτών συστημάτων, είναι απαραίτητο να βρούμε κάποιο τρόπο να τις απεικονίσουμε κατά την ανάλυση και τον πειραματισμό με το σύστημα. Τα διαγράμματα ροής, αν και αρκετά εύχρηστα και διαδεδομένα, δεν υποστηρίζουν ικανοποιητικά τις ουρές, γιατί οι ουρές δεν αποτελούν ούτε διαδικασίες ούτε σημεία απόφασης. Για αυτό το λόγο, έχουν αναπτυχθεί άλλα είδη διαγραμμάτων για την προσομοίωση διακριτών συστημάτων, με κυρίαρχο το Διάγραμμα Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ). Επιπλέον, μια ολόκληρη μεθοδολογία προσομοίωσης, η προσομοίωση δραστηριοτήτων, την οποία θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 6, βασίζεται στη χρήση διαγραμμάτων αυτού του είδους.

Τα Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ), με τα οποία θα ασχοληθούμε σε αυτό το κεφάλαιο, αποτελούν έναν τρόπο για να απεικονίζουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ των οντοτήτων. Είναι πολύ χρήσιμα για τα συστήματα με ισχυρές δομές ουρών και αποτελούν θεμέλιο λίθο για την προσομοίωση δραστηριοτήτων. Αναπτύχθηκαν και έγιναν γνωστά από τον Hill το 1971, παίρνοντας σταδιακά τη σημερινή τους μορφή.

5.2. Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ)

5.2.1. Η δομή των ΔΚΔ

Τα Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων είναι ένα είδος λογικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για τη γραφική αναπαράσταση μοντέλων προσομοίωσης. Αναπτύχθηκαν αρχικά σαν μια πρόχειρη μέθοδος που χρησιμοποιούσε μόνο δυο σύμβολα: ένα ορθογώνιο για τις δραστηριότητες και ένα κύκλο για τις ουρές. Το

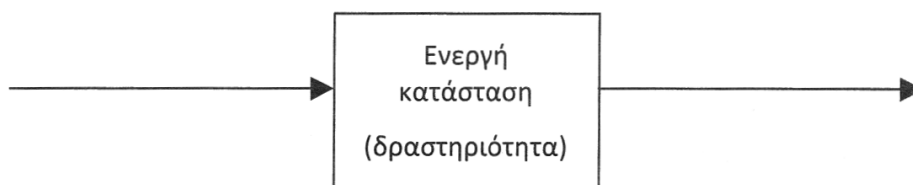
ορθογώνιο δείχνει τις ενεργές καταστάσεις οντοτήτων (δραστηριότητες), κατά τις οποίες οι διάφορες οντότητες αλληλεπιδρούν, ενώ το κύκλος δείχνει τις ανενεργές καταστάσεις (ουρές), κατά τις οποίες οι οντότητες περιμένουν μέχρι να εκπληρωθούν οι προϋποθέσεις που θα τους επιτρέψουν να ξεκινήσουν κάποια δραστηριότητα και να γίνουν και πάλι ενεργές.

Γενικά, αποτελούν ένα πολύ απλό και συνάμα εύχρηστο τρόπο, αλλά όχι ικανό για πολλές λεπτομέρειες.



Σχήμα 5.1. Ανενεργή κατάσταση (ουρά)

Ο κύκλος (Σχήμα 5.1.) δείχνει την ανενεργή κατάσταση ή ουρά και αφορά συνήθως την αναμονή της οντότητας μέχρι να συμβεί ένα γεγονός. Η διάρκεια της κατάστασης αυτής δεν μπορεί να οριστεί από την αρχή, αφού ο χρόνος αναμονής στην ουρά δεν είναι προκαθορισμένος.

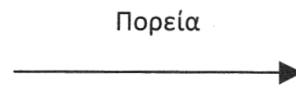


Σχήμα 5.2. Ενεργή κατάσταση (δραστηριότητα)

Από την άλλη, η ενεργή κατάσταση ή δραστηριότητα, αναφέρεται στην πιθανή αλληλεπίδραση μιας οντότητας με οντότητες που ανήκουν σε κάποια άλλη κατηγορία. Η διάρκεια μιας ενεργούς κατάστασης μπορεί πάντα να προσδιορίζεται εξ αρχής, συνήθως με δειγματοληψία από κάποια κατανομή πιθανοτήτων.

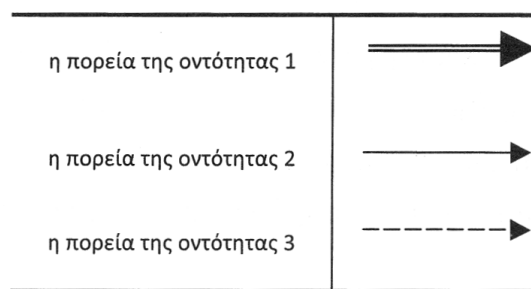
Στο Σχήμα 5.3., το βελάκι πορείας ή ίχνος, συνδέει τις διαδοχικές δραστηριότητες και τις ουρές από τις οποίες περνάει κάθε οντότητα. Πρέπει να είναι διαφορετικού είδους

για κάθε οντότητα αφού παρακολουθεί την πορεία ή τον κύκλο ζωής κάθε μίας από αυτές.



Σχήμα 5.3. Πορεία

Για παράδειγμα, οι πορείες των τριών διαφορετικών οντοτήτων σε ένα ΔΚΔ θα μπορούσαν να σχεδιαστούν με τα παρακάτω διαφορετικά ίχνη (Πίνακας 5.1.):

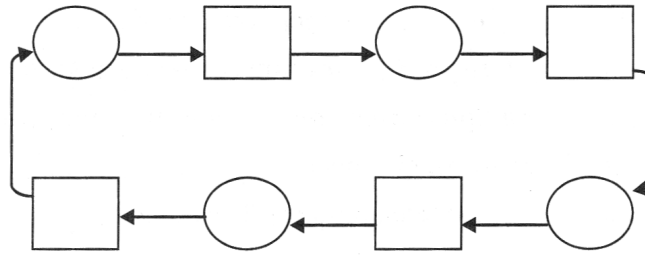


Πίνακας 5.1. Ίχνη διαφορετικών οντοτήτων

Για την απλούστευση της διαδικασίας, συνήθως σχεδιάζονται πρώτα τα διαγράμματα που απεικονίζουν τον κύκλο ζωής για κάθε οντότητα ξεχωριστά και έπειτα συνδυάζονται για να δημιουργηθεί το συνολικό διάγραμμα του συστήματος.

5.2.2. Κανόνες δόμησης των ΔΚΔ

Τα διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων είναι κλειστά κυκλώματα (δεν έχουν δηλαδή αρχή ή τέλος). Ο κύκλος ζωής μιας οντότητας, προσωρινής ή μόνιμης, όπως απεικονίζεται σε ένα ΔΚΔ είναι κλειστός (δηλαδή δεν υπάρχουν συγκεκριμένα σημεία αρχής ή τέλους της πορείας της οντότητας στο σύστημα, αντίθετα με ότι συμβαίνει σε ένα διάγραμμα ροής). Το Σχήμα 5.4. παρουσιάζει ένα τέτοιο διάγραμμα.



Σχήμα 5.4. Τα ΔΚΔ είναι κλειστά και ακολουθείται διαδοχή ουρών - δραστηριοτήτων

Επίσης, υπάρχει αυστηρή εναλλαγή ουρών και δραστηριοτήτων σε κάθε κύκλο ζωής. Δεν είναι ορθό μια οντότητα μετά την αναμονή της σε μια ουρά, να μπει σε κάποια νέα ουρά. Πρέπει να συνεχίσει στη δραστηριότητα για την οποία περίμενε. Αντιστοίχως, δε γίνεται μετά την ολοκλήρωση μιας δραστηριότητας κάποια οντότητα να εμπλακεί κατευθείαν σε μια νέα δραστηριότητα χωρίς να έχει μπει σε κάποια ουρά, έστω και για μηδενικό χρόνο. Ακόμα και στις περιπτώσεις που ισχύει κάτι τέτοιο, εισάγουμε στα ΔΚΔ τεχνητές ουρές για να εφαρμόσουμε τον κανόνα.

Επιπροσθέτως, σε κάθε ουρά εισέρχονται και εξέρχονται ίχνη από μία μόνο κατηγορία οντότητας. Δηλαδή, δε μπορούν οντότητες διαφορετικών ειδών να περιμένουν στις ίδιες ουρές.

Στις δραστηριότητες, αντιθέτως, επιτρέπεται να εμπλέκονται διαφορετικές οντότητες. Όμως, στις δραστηριότητες πρέπει να υπάρχει αντιστοιχία στο είδος των οντοτήτων που εισέρχονται και εξέρχονται. Από κάθε δραστηριότητα, πρέπει να εξέρχονται μόνο τα είδη των οντοτήτων που έχουν εισέλθει. Δηλαδή, όποιες προσωρινές οντότητες και πόροι δεσμεύονται σε μια δραστηριότητα, αυτές μόνο αποδεσμεύονται όταν αυτή τελειώσει. Είναι αδύνατο να απορροφηθεί κάποια ή να δημιουργηθεί νέο είδος κατά τη διάρκεια μιας δραστηριότητας. Είναι δυνατό η ίδια οντότητα να εξέρχεται από μία δραστηριότητα με πολλές (διαφορετικές) εναλλακτικές κατευθύνσεις δηλαδή προς διαφορετικές ουρές (πολλά εξερχόμενα όμοια βελάκια). Ο αριθμός των βελών που εισέρχονται δε χρειάζεται να είναι ο ίδιος με τον αριθμό αυτών που εξέρχονται. Η ισότητα είναι υποχρεωτική για το είδος των βελών πορείας. Οι παραπάνω κανόνες απεικονίζονται στο Πίνακα 5.2.

ΚΑΝΟΝΕΣ ΔΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ	
1.	Τα Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων είναι κλειστά.
2.	Υπάρχει αυστηρή εναλλαγή ενεργών-ανενεργών καταστάσεων. Για να ικανοποιείται ο κανόνας εισάγονται τεχνητές ουρές όπου χρειάζεται.
5.	Σε κάθε ουρά εισέρχονται και εξέρχονται βελάκια από μία μόνο οντότητα.
4.	Στις δραστηριότητες μπορούν να εισέρχονται και εξέρχονται βελάκια πορείας από πολλές οντότητες, με την προϋπόθεση ότι αυτά και μόνο τα είδη οντοτήτων που εισέρχονται πρέπει και είναι δυνατό να εξέλθουν από μια δραστηριότητα.

Πίνακας 5.2. Κανόνες δόμησης ΔΚΔ

Τα στάδια κατασκευής ενός ΔΚΔ συνοψίζονται στα βήματα που φαίνονται στο Πίνακα 5.3.

ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΝΟΣ ΔΚΔ	
1.	Αναγνώριση σημαντικών οντοτήτων ή ομάδων αυτών.
2.	Εξέταση των δραστηριοτήτων (ενεργείς καταστάσεις) στις οποίες απασχολούνται.
5.	Εξέταση των ουρών (παθητικές καταστάσεις) από τις οποίες διέρχονται.
4.	Διάταξη των δραστηριοτήτων και των ουρών σε χρονολογική σειρά για κάθε οντότητα.
5.	Σύνδεση των επιμέρους ΔΚΔ και δημιουργία του συνολικού ΔΚΔ του συστήματος

Πίνακας 5.3. Βασικά στάδια κατασκευής ενός ΔΚΔ

5.2.3. Παράδειγμα κατασκευής ενός ΔΚΔ

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε το παράδειγμα του βενζινάδικου, όπου θεωρήσαμε τη 2η περίπτωση (κοινή αντλία) και αγνοήσαμε τη διαδικασία αλλαγής λαδιών για λόγους απλούστευσης. Καταλήγουμε λοιπόν ότι τα αυτοκίνητα προσέρχονται κυρίως για να προμηθευτούν βενζίνη, αλλά κάποια από αυτά μετά αφότου γεμίσουν, μπαίνουν και στο πλυντήριο για να πλυθούν, με την επίβλεψη του υπαλλήλου.

Όπως προαναφέραμε, το συνολικό διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων ενός συστήματος αποτελείται από το σύνολο των επιμέρους διαγραμμάτων κάθε

οντότητας. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι κάθε οντότητα έχει το δικό της ΔΚΔ που απεικονίζει τις ουρές και δραστηριότητες στις οποίες εμπλέκεται η συγκεκριμένη οντότητα. Το γενικό ΔΚΔ του συστήματος προκύπτει από τη συνένωση των επιμέρους ΔΚΔ στα σημεία των κοινών δραστηριοτήτων (που εμπλέκουν δηλαδή περισσότερες από μια οντότητες).

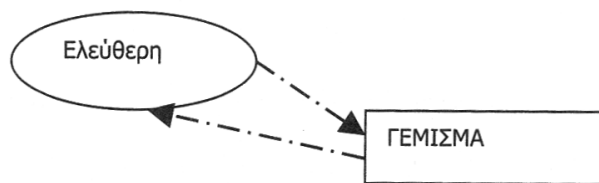
Πρώτο βήμα λοιπόν είναι να εντοπίσουμε τις οντότητες και τις δραστηριότητες που αφορούν στο σύστημα, ώστε να εξάγουμε τον κύκλο ζωής και το ΔΚΔ κάθε οντότητας. Όπως συμπεράναμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, όταν παρουσιάσαμε το σύστημα αυτό, οντότητες είναι το αυτοκίνητο, ο υπάλληλος, το πλυντήριο και η αντλία, ενώ δραστηριότητες είναι το γέμισμα του ρεζερβουάρ, το πλύσιμο και η άφιξη - είσοδος.

Ξεκινάμε από την απλούστερη περίπτωση της αντλίας. Η αντλία εμπλέκεται μόνο στη διαδικασία του γεμίσματος. Όταν δεν συμβαίνει γέμισμα, αυτή είναι «ελεύθερη» και περιμένει το επόμενο αυτοκίνητο. Ο κύκλος ζωής της λοιπόν αποτελείται από μια ουρά (Ο) και μια δραστηριότητα (Δ):

Αντλία:

ελεύθερη (Ο) → γέμισμα (Δ) → ελεύθερη (Ο) κοκ.

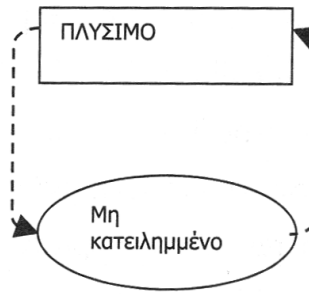
Το ΔΚΔ της είναι λοιπόν:



Το πλυντήριο αντίστοιχα, είναι είτε ελεύθερο (μη κατειλημμένο) είτε εμπλέκεται σε πλύσιμο. Ο κύκλος ζωής και το ΔΚΔ του είναι:

Πλυντήριο:

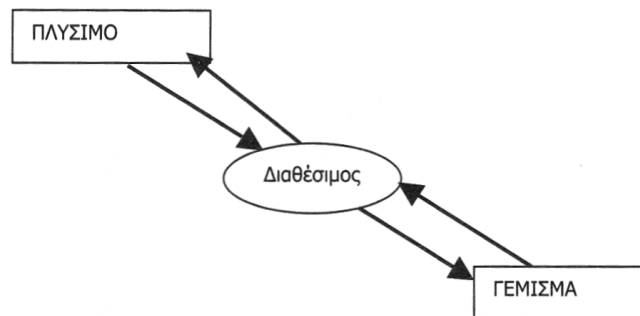
μη κατειλημμένο (Ο) → πλύσιμο (Δ) → μη κατειλημμένο (Ο) κοκ.



Ο υπάλληλος έπειτα, μπορεί να είναι είτε διαθέσιμος, περιμένοντας για αυτοκίνητα, είτε να ασχολείται με το γέμισμα ή το πλύσιμο. Ο κύκλος ζωής και το ΔΚΔ του είναι:

Υπάλληλος:

διαθέσιμος (Ο) → γέμισμα/πλύσιμο (Δ) → διαθέσιμος(Ο) → γέμισμα/πλύσιμο (Δ) κοκ.



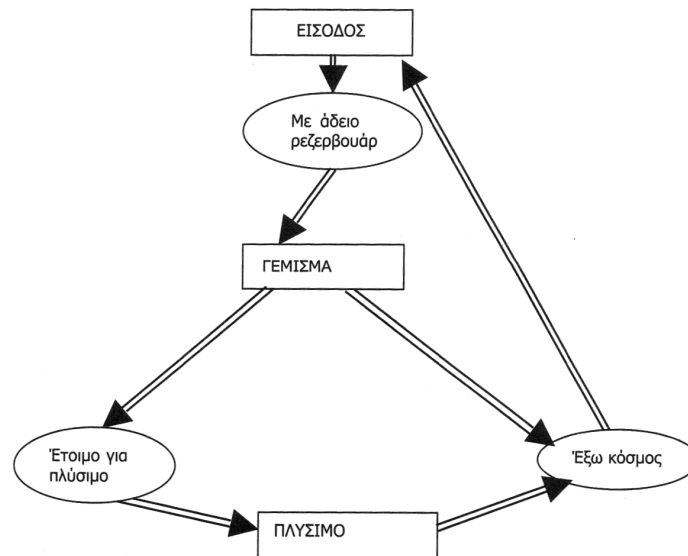
Προσοχή: Η παραπάνω απεικόνιση του κύκλου ζωής σημαίνει ότι ο υπάλληλος μπορεί κάποια στιγμή που είναι ελεύθερος να πρέπει να επιλέξει αν θα εμπλακεί σε δραστηριότητα πλυσίματος ή γεμίσματος, αν και οι δυο μπορούν να ξεκινήσουν. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να καθοριστούν προτεραιότητες μεταξύ των σχετικών δραστηριοτήτων (π.χ. το γέμισμα μπορεί να έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα από το πλύσιμο ή μπορεί να έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα ο πελάτης που περίμενε περισσότερη ώρα στην αντίστοιχη ουρά, κτλ).

Τέλος, το αυτοκίνητο μετά την άφιξή του περιμένει στην ουρά (αν χρειάζεται) και έπειτα εμπλέκεται στο γέμισμα. Μετά από αυτό είτε αποχωρεί από το σύστημα (δηλαδή μπαίνει στην τεχνητή ουρά «Έξω Κόσμος» ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη κλειστότητας του ΔΚΔ όπως έχουμε πει) είτε περιμένει να περάσει από

πλύσιμο πριν αποχωρήσει από το σύστημα. Έτσι, ο κύκλος ζωής και το ΔΚΔ του είναι:

Αυτοκίνητο:

είσοδος (Δ) → με άδειο ρεζερβουάρ (Ο) → γέμισμα (Δ) (→ έτοιμο για πλύσιμο (Ο) → πλύσιμο (Δ) →) έξω κόσμος (Ο) → είσοδος (Δ) κοκ.



5.2.4. Η τεχνητή οντότητα «Πόρτα» και η δραστηριότητα της άφιξης

Στο σημείο αυτό μπορούμε να πούμε ότι η κατασκευή του ΔΚΔ έχει τελειώσει. Απομένει όμως να αναλύσουμε ένα τελευταίο θέμα, αυτό που χειρίζεται την άφιξη προσωρινών οντοτήτων στο σύστημα.

Η σημειολογία ενός ΔΚΔ είναι ότι για να ξεκινήσει μια δραστηριότητα θα πρέπει να υπάρχουν οντότητες σε όλες τις ουρές από τις οποίες έρχονται βελάκια πορείας στη δραστηριότητα αυτή. Έτσι, για παράδειγμα, για να ξεκινήσει η δραστηριότητα «Πλύσιμο», θα πρέπει ταυτόχρονα να υπάρχει αυτοκίνητο στην ουρά «Έτοιμο για Πλύσιμο», υπάλληλος στην ουρά «Διαθέσιμος» και πλυντήριο στην ουρά «Μη κατειλημμένο» (δες τα παραπάνω ΔΚΔ). Όντως, αν υπάρχει διαθέσιμο πλυντήριο και υπάλληλος, αλλά όχι αυτοκίνητο για πλύσιμο, δεν έχει νόημα η πραγματοποίηση της δραστηριότητας. Το ίδιο και αν υπάρχει αυτοκίνητο αλλά όχι διαθέσιμος υπάλληλος ή πλυντήριο.

Παρατηρήστε τώρα τη δραστηριότητα «Είσοδος» στο ΔΚΔ του αυτοκινήτου. Δεν υπάρχει βελάκι πορείας σε άλλο ΔΚΔ που να εισέρχεται στη δραστηριότητα αυτή (και

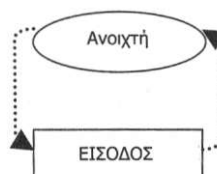
είναι λογικό, διότι δεν υπάρχει άλλη προ-απαίτηση για την είσοδο ενός αυτοκινήτου στο βενζινάδικο). Έτσι, για να πραγματοποιηθεί η δραστηριότητα άφιξης, αρκεί να υπάρχει διαθέσιμο αυτοκίνητο στην ουρά «Έξω Κόσμος». Όμως, όπως έχουμε αναφέρει, στην ουρά αυτή, υπάρχουν πάντα άπειροι πιθανοί πελάτες του συστήματος μας.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κανένας περιορισμός για την είσοδο στο σύστημα, η διαδικασία «Είσοδος» θα πραγματοποιούνταν ασταμάτητα με την έναρξη της προσομοίωσης, αφού πάντα θα υπήρχαν πολλές διαθέσιμες οντότητες στην ουρά «Έξω κόσμος». Έτσι, στο χρόνο μηδέν (έναρξη της προσομοίωσης) θα έμπαιναν στο σύστημα άπειροι πελάτες, προκαλώντας έτσι την κατάρρευση του μοντέλου.

Για να αποφύγουμε μια τέτοια εξέλιξη, βάζουμε πάντα μια τεχνητή οντότητα, την οποία ονομάζουμε «πόρτα», η οποία λειτουργεί σαν δικλείδα ασφαλείας του συστήματος και καθορίζει τον τρόπο εισόδου των προσωρινών οντοτήτων σε αυτό (δηλαδή, χρειάζονται τόσες οντότητες πόρτας όσες οι προσωρινές οντότητες στο μοντέλο μας). Η πόρτα μπορεί να είναι κλειστή ή ανοιχτή. Όσο είναι κλειστή, σημαίνει ότι απασχολείται από την τελευταία προσωρινή οντότητα που μπήκε στο σύστημα και γι' αυτό δεν μπορεί να εισέλθει κανένας νέος πελάτης στο σύστημα (καθώς τώρα η δραστηριότητα «Είσοδος» απαιτεί, εκτός από την ύπαρξη πελατών στον έξω κόσμο και την ύπαρξη της οντότητας «Πόρτα» στην ουρά «Ανοικτή»).

Έτσι, στο βενζινάδικο μας, η πόρτα θα είχε τον παρακάτω κύκλο ζωής και ΔΚ.Δ.

- ΠΟΡΤΑ: ανοιχτή (Ο) → είσοδος (Δ) → ανοιχτή (Ο)



Πρέπει να διευκρινίσουμε κάτι ακόμα για τη δραστηριότητα «Είσοδος» που συσχετίζεται με την παραπάνω συζήτηση. Ο προσεκτικός αναγνώστης μπορεί να έχει ήδη παρατηρήσει ότι, με τους ορισμούς που δώσαμε νωρίτερα, η «Είσοδος» μιας προσωρινής οντότητας σε ένα σύστημα δεν είναι δραστηριότητα, αλλά γεγονός. Όντως, ενώ όλες οι άλλες δραστηριότητες (π.χ. γέμισμα, πλύσιμο, κτλ) έχουν χρονική διάρκεια, η είσοδος είναι στιγμιαίο γεγονός και επομένως δε θα έπρεπε να υπάρχει

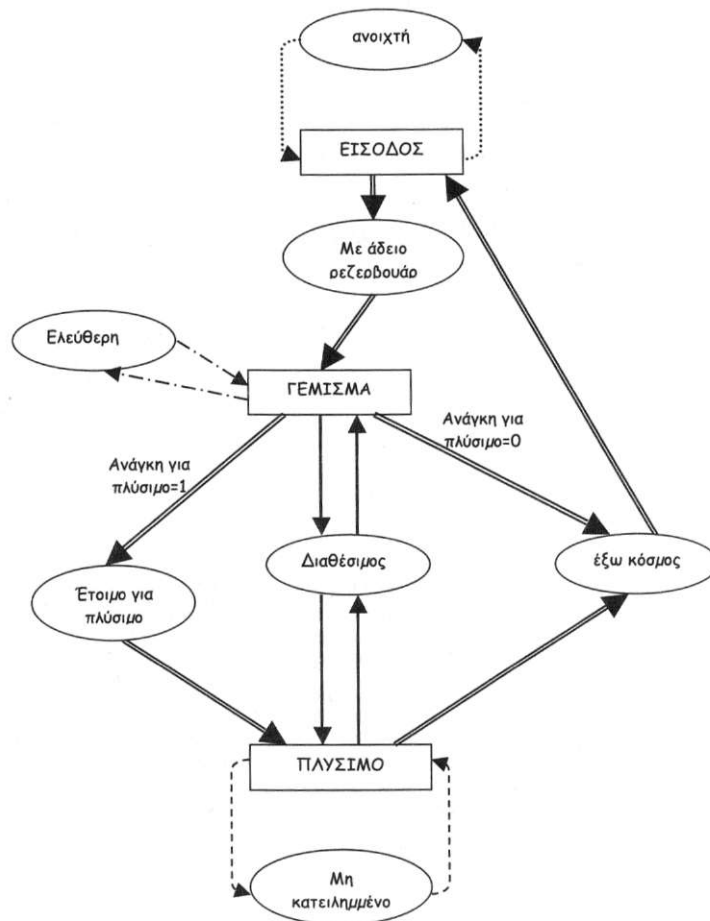
σε ένα ΔΚΔ, με τον ίδιο τρόπο που (σωστά) δεν υπάρχει ποτέ το γεγονός της «Αποχώρησης» μιας προσωρινής οντότητας από το σύστημα, αφού κι αυτό δεν είναι δραστηριότητα αλλά γεγονός.

Μια τέτοια παρατήρηση είναι απολύτως σωστή. Ο λόγος για τον οποίο μοντελοποιείται η είσοδος προσωρινών οντοτήτων είναι γιατί στην πραγματικότητα παρόλο που χρησιμοποιούμε την έννοια «Είσοδος» αυτό που μοντελοποιούμε είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών εισόδων προσωρινών οντοτήτων στο σύστημα. Αυτό είναι γνωστό ως *interarrival time* και είναι φυσικά δραστηριότητα αφού έχει χρονική διάρκεια (που μπορεί φυσικά σε μερικές περιπτώσεις να είναι και μηδέν, για παράδειγμα όταν δυο προσωρινές οντότητες εισέρχονται μαζί στο σύστημα).

Δηλαδή, αυτό που πραγματικά συμβαίνει είναι ότι το χρονικό διάστημα το οποίο διαρκεί η δραστηριότητα «Είσοδος» είναι στην πραγματικότητα το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την άφιξη του προηγούμενου πελάτη μέχρι την άφιξη του τρέχοντος, ενώ στην πραγματικότητα η άφιξη του τρέχοντος πελάτη στο σύστημα γίνεται τη στιγμή που τελειώνει η δραστηριότητα «Είσοδος» και ο πελάτης εισέρχεται στην πρώτη ουρά. Από αυτή τη χρονική στιγμή πρέπει να γίνεται και η μέτρηση όλων των ποσοτήτων που αφορούν στον πελάτη (π.χ. συνολικός χρόνος παραμονής στο σύστημα) στην προσομοίωση.

5.2.5. Παράδειγμα κατασκευής ενός ΔΚΔ (συνέχεια)

Στο παράδειγμά μας. Το συνολικό ΔΚΔ του βενζινάδικου προκύπτει με τη σύνδεση των επιμέρους ΔΚΔ, στις δραστηριότητες όπου εμπλέκονται πολλά είδη οντοτήτων.



Έτσι, το ΔΚΔ του συστήματος «βενζινάδικο» φαίνεται στο Σχήμα 5.5. (προσέξτε ότι αναφέρονται μαζί τα ίχνη για κάθε οντότητα και οι προτεραιότητες δραστηριοτήτων, όπου χρειάζεται):

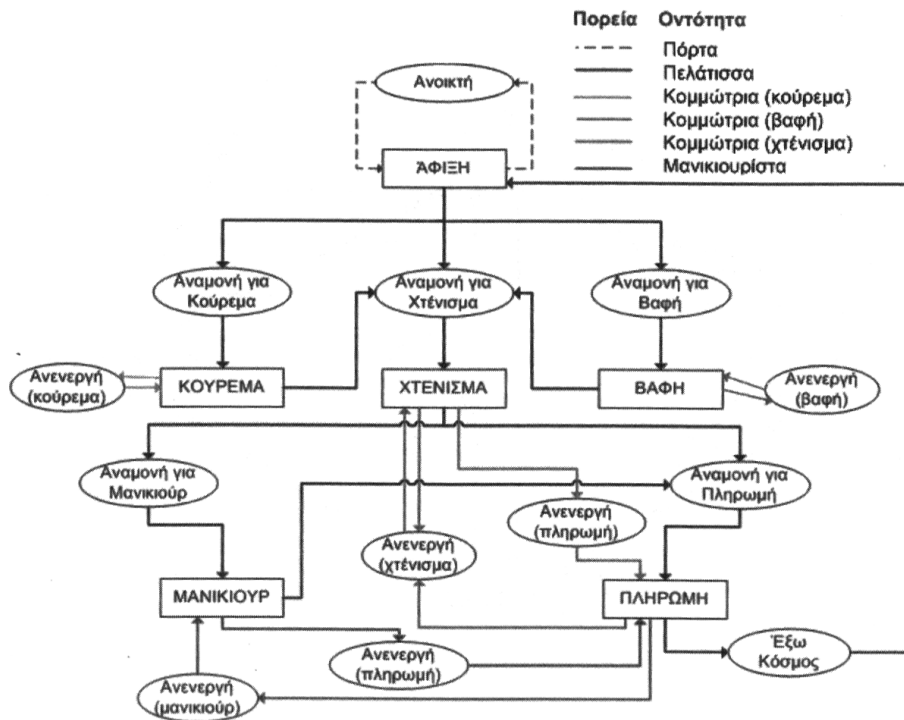
ΠΟΡΕΙΑ	ΟΝΤΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ
	αυτοκίνητο	1. γέμισμα 2. πλύσιμο
	υπάλληλος	
	αντλία	
	πλυντήριο	
	πόρτα	

Σχήμα 5.5. Διάγραμμα ΔΚΔ του βενζινάδικου

5.2.6. Άλλα παραδείγματα κατασκευής ΔΚΔ

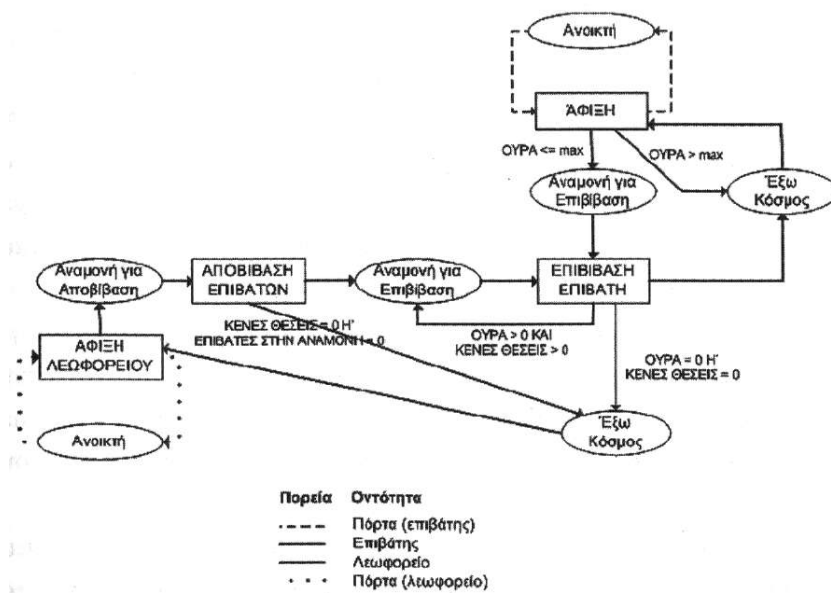
Στο υποκεφάλαιο αυτό, θα δώσουμε τα ΔΚΔ για το κομμωτήριο και τη στάση λεωφορείου που είδαμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Η ανάλυσή τους αφήνεται ως άσκηση για τον αναγνώστη.

Στην περίπτωση του κομμωτηρίου (χωρίς ταμιά), το ΔΚΔ θα είναι όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6. Το ΔΚΔ του συστήματος «κομμωτήριο»

Στην περίπτωση της στάσης λεωφορείου, το ΔΚΔ θα είναι όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7. Το ΔΚΔ του συστήματος «στάση λεωφορείου»

5.3. Σημειολογία των ΔΚΔ

Μια επανάληψη των όσων αναφέραμε σχετικά με τα ΔΚΔ:

- Τα Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων αποτελούν βασική μέθοδο συμβολικής αναπαράστασης στα πλαίσια της προσομοίωσης, γιατί μπορούν να υποστηρίξουν συστήματα με ισχυρές δομές ουρών, χρησιμοποιώντας παράλληλα τις δραστηριότητες ως κύρια δυναμικά στοιχεία.
- Το συνολικό ΔΚΔ του συστήματος προκύπτει από τη συνένωση των επιμέρους διαγραμμάτων κάθε οντότητας στα σημεία των κοινών δραστηριοτήτων.
- Ο κύκλος ζωής κάθε οντότητας σχηματίζεται από μια αυστηρή αλληλουχία δραστηριοτήτων και ουρών.
- Κάθε ΔΚΔ είναι ένα κλειστό κύκλωμα.
- Οι δραστηριότητες αποτελούν σημεία αλληλεπίδρασης οντοτήτων, γι' αυτό και σε πολλές δραστηριότητες συμμετέχουν μαζί πολλές οντότητες. Μια οντότητα περνώντας τον κύκλο ζωής της συναντιέται με άλλες οντότητες του συστήματος για να πραγματοποιήσουν από κοινού κάποια δραστηριότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή πολλές δραστηριότητες χρειάζονται τόσο πόρους (εξυπηρετητές) όσο και πελάτες για να πραγματοποιηθούν. Στα σημεία αυτά μπορούμε να πούμε ότι οι κύκλοι ζωής των αντίστοιχων οντοτήτων τέμνονται. Για παράδειγμα, σε ένα εστιατόριο ο κύκλος ζωής του εξυπηρετητή-

σερβιτόρου τέμνεται με αυτόν του πελάτη προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κοινή δραστηριότητα της παραγγελίας. Στο ΔΚΔ του βενζινάδικου φαίνεται ότι ο κύκλος ζωής του υπαλλήλου τέμνεται με αυτόν του αυτοκινήτου στις δραστηριότητες του πλυσίματος και του γεμίσματος.

- Ο αριθμός των βελών που εισέρχονται και εξέρχονται από μια δραστηριότητα δεν απαιτείται να είναι ο ίδιος - πρέπει όμως το πλήθος διαφορετικών οντοτήτων να είναι το ίδιο. Για παράδειγμα, στη δραστηριότητα «γέμισμα» στο βενζινάδικο παρατηρούμε το εξής: εισέρχονται τρία διαφορετικά βελάκια από τις οντότητες αυτοκίνητο, αντλία και υπάλληλος. Εξέρχονται όμως τέσσερα βελάκια. Η διαφορά αυτή είναι αποδεκτή, αφού το ένα παραπάνω δεν προέρχεται από διαφορετική οντότητα. Απλά το αυτοκίνητο μετά το γέμισμα, μπορεί να μεταβεί είτε για πλύσιμο είτε στον έξω κόσμο. Έτσι, όταν μια οντότητα εισέρχεται πολλαπλές φορές από μια δραστηριότητα, αυτό σημαίνει μια σχέση «είτε-είτε» μεταξύ των εναλλακτικών μονοπατιών που μπορεί να ακολουθήσει.
- Αντίθετα με τις δραστηριότητες, οι ουρές είναι «καθαρές» δηλαδή σε κάθε ουρά συμμετέχει πάντα μια και μόνο μια οντότητα. Και πάλι όμως, ο αριθμός των βελών που εισέρχονται και εξέρχονται από μια ουρά δεν απαιτείται να είναι ο ίδιος.
- Για να ξεκινήσει κάποια δραστηριότητα πρέπει να υπάρχει μία τουλάχιστον οντότητα σε κάθε ουρά εισόδου της. Στο βενζινάδικο, για να ξεκινήσει η δραστηριότητα «γέμισμα», πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα αυτοκίνητο «με άδειο ρεζερβουάρ» που περιμένει για την εν λόγω δραστηριότητα και τουλάχιστον ένας «διαθέσιμος» υπάλληλος που περιμένει για να εξυπηρετήσει.
- Η τεχνητή οντότητα «Πόρτα» ρυθμίζει την είσοδο προσωρινών οντοτήτων από τον «Έξω Κόσμο» στο σύστημα επιβάλλοντας τον περιορισμό ότι για να πραγματοποιηθεί η είσοδος δεν αρκεί να υπάρχουν οντότητες στον «έξω κόσμο» (αυτές υπάρχουν πάντα). Πρέπει να είναι και η πόρτα «ανοιχτή».
- Όταν τελειώσει μια δραστηριότητα, απελευθερώνει τις συμμετέχουσες οντότητες και τις διοχετεύει στις ουρές εξόδου ανάλογα με τον κύκλο ζωής τους. Οι ουρές αυτές με τη σειρά τους είναι δυνατό να αποτελούν ουρές εισόδου για κάποια άλλη δραστηριότητα, κοκ. Όταν για παράδειγμα τελειώσει το «γέμισμα», τόσο το αυτοκίνητο όσο και ο υπάλληλος απελευθερώνονται και

εισάγονται αντίστοιχα στις ουρές εξόδου «έτοιμο για πλύσιμο» ή «έξω κόσμος» και «διαθέσιμος». Εάν το αυτοκίνητο χρειάζεται και πλύσιμο, μετά το γέμισμα θα μπει στην ουρά εξόδου «έτοιμο για πλύσιμο» η οποία παράλληλα, θα αποτελεί και ουρά εισόδου, για το «πλύσιμο». Εάν δε χρειάζεται πλύσιμο, θα εισαχθεί αμέσως στην ουρά «έξω κόσμος». Όσον αφορά στον υπάλληλο, αυτός μπορεί μετά την ουρά «διαθέσιμος» να απασχοληθεί σε «πλύσιμο» ή σε «γέμισμα», οπότε η ουρά «διαθέσιμος» γίνεται ουρά εισόδου για τις δραστηριότητες αυτές.

- Ένα θέμα που απαιτεί προσοχή κατά τη χρήση των ΔΚΔ είναι αυτό της προτεραιότητας δραστηριοτήτων. Σε περίπτωση που μια οντότητα είναι σε θέση να αρχίσει να εμπλέκεται, την ίδια χρονική στιγμή, σε περισσότερες από μία δραστηριότητες, τότε είναι ανάγκη να έχουμε καθορίσει ποια θα προηγηθεί. Στο βενζινάδικο για παράδειγμα, έχουμε προκαθορίσει ότι πρώτα θα γίνεται το γέμισμα και μετά το πλύσιμο, αν χρειάζεται. Αυτό γίνεται γιατί αν υπάρχουν αυτοκίνητα τόσο στην ουρά «με άδειο ρεζερβουάρ» όσο και στην ουρά «έτοιμο για πλύσιμο», ένας «διαθέσιμος» υπάλληλος θα έχει δίλημμα ποιο να εξυπηρετήσει πρώτα. Είναι καλό οι προτεραιότητες των δραστηριοτήτων να δηλώνονται σε ένα υπόμνημα που θα συνοδεύει το ΔΚΔ.
- Όταν ένας πελάτης τελειώσει με τις δραστηριότητες που έχει να κάνει μέσα στο σύστημα, εξέρχεται από αυτό. Στην προσομοίωση όμως θεωρούμε ότι η προσωρινή οντότητα δεν εξέρχεται ποτέ εντελώς από το μοντέλο. Τα ΔΚΔ είναι απαραίτητο να είναι κλειστά κυκλώματα, οπότε οι οντότητες πρέπει να ανακυκλώνονται μέσα σε αυτό. Θεωρούμε λοιπόν ότι ο πελάτης όταν εξυπηρετηθεί, δηλαδή όταν ολοκληρώσει έναν κύκλο ζωής στο σύστημα, μεταλλάσσεται αυτόματα σε πιθανό πελάτη του έξω κόσμου, ο οποίος κάποια στιγμή μπορεί να ξαναμπεί στο σύστημα. Έτσι, το γεγονός της «αποχώρησης» δε συμβαίνει ποτέ στο μοντέλο και φυσικά δε μοντελοποιείται.

5.4. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΔΚΔ

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, τα διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων είναι ένα πολύτιμο εργαλείο στην προσομοίωση δραστηριοτήτων. Είναι ένα είδος λογικού μοντέλου που χρησιμοποιείται τόσο στη γραφική αναπαράσταση του συστήματος της προσομοίωσης, ιδιαίτερα όταν το σύστημα παρουσιάζει συμπεριφορά ουρών τις οποίες θέλουμε να απεικονίσουμε και να μελετήσουμε. Ακόμα, η εικονική αυτή

αναπαράσταση των οντοτήτων και των δραστηριοτήτων του συστήματος βοηθά στην ευκολότερη, γρηγορότερη και απλούστερη κατανόηση του μοντέλου.

Όμως, τα ΔΚΔ πραγματικών συστημάτων έχουν το μειονέκτημα είναι πολλές φορές πολύπλοκα και δυσνόητα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι έχουμε μόνο δυο σύμβολα (ανενεργή και ενεργή κατάσταση) για την απεικόνιση του συστήματος που μοντελοποιείται, γεγονός που δεν επιτρέπει την εύκολη απεικόνιση πιο περίπλοκων καταστάσεων. Για το λόγο αυτό, ένας αναλυτής δε θα πρέπει να αισθάνεται περιορισμένος από τους πολλούς περιορισμούς που θέτουν τα ΔΚΔ, παρά μόνο να ακολουθεί πιστά τις βασικές αρχές και κανόνες δόμησης τους. Από εκεί και πέρα έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει είτε πάνω στο ΔΚΔ είτε σε συνοδευτικά υπομνήματα πληροφορίες που είναι σημαντικές αλλά δεν απεικονίζονται στο ίδιο το διάγραμμα - όπως κάναμε κι εμείς στο παράδειγμα του βενζινάδικου.

5.5. Εκτέλεση Μοντέλου Προσομοίωσης: Η Μέθοδος των Τριών Φάσεων

Στην ενότητα αυτή θα δούμε πως μπορεί ένα ΔΚΔ να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση ενός συστήματος, δηλαδή για τη μίμηση της συμπεριφοράς του στο χρόνο. Προς το παρόν βέβαια, θα περιοριστούμε στη χειρωνακτική προσομοίωση, δηλαδή θα «τρέξουμε» το ΔΚΔ στο χαρτί, μιμούμενοι τον τρόπο με τον οποίο ένας υπολογιστής θα μπορούσε να εκτελέσει το μοντέλο της προσομοίωσης.

Για την προσομοίωση μας, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο των τριών φάσεων (three phase method), η οποία αποτελεί μία δημοφιλή μέθοδο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Tocher το 1965.

5.5.1. Ο μηχανισμός της μεθόδου

Η μέθοδος των τριών φάσεων, όπως υπονοεί και το όνομα της, αποτελείται από τρεις φάσεις: A (advance), B (bound), C (conditional). Αναλυτικότερα έχουμε:

- **Φάση A:** Μηχανισμός Ροής Χρόνου (time Advance). Στη φάση A επιλέγουμε το χρονικό σημείο στο οποίο θα μεταβεί το ρολόι της προσομοίωσης. Κάθε προσομοίωση διαρκεί για ένα σύνολο (προσομοιωμένου, όχι πραγματικού) χρόνου, ο οποίος κατά σύμβαση ξεκινά τη χρονική στιγμή μηδέν που συμβολίζει την έναρξη εκτέλεσης του μοντέλου. Στα διακριτά συστήματα, το ρολόι της προσομοίωσης μεταβαίνει στην επόμενη χρονική στιγμή στην οποία είναι προγραμματισμένη κάποια μεταβολή του μοντέλου (θυμηθείτε ότι μεταξύ

δου τέτοιων χρονικών στιγμών η κατάσταση του μοντέλου θεωρείται σταθερή). Στη μέθοδο των τριών φάσεων, ο χρόνος αυτός είναι ο νωρίτερος χρόνος στον οποίο έχει προγραμματιστεί το γεγονός τέλους μιας δραστηριότητας που βρίσκεται σε εξέλιξη. Έτσι, μετακινούμε το ρολόι της προσομοίωσης σε εκείνο το χρονικό σημείο.

- **Φάση Β:** Ανεξάρτητα γεγονότα (Bound events). Στη φάση Β εκτελούμε την ή τις δραστηριότητες που είναι προγραμματισμένες να τελειώσουν τη χρονική στιγμή στην οποία έχει μεταβεί το ρολόι της προσομοίωσης. Το τέλος αυτών των δραστηριοτήτων αποτελεί ένα ανεξάρτητο γεγονός (bound), γιατί, όπως έχουμε πει, από τη στιγμή που θα ξεκινήσει μία δραστηριότητα η λήξη της εξαρτάται μόνο από το χρόνο (διάρκεια). Όταν λέμε «εκτελούμε» το τέλος της δραστηριότητας, εννοούμε ότι μετακινούμε τις οντότητες που εμπλέκονται σε κάθε δραστηριότητα που τελειώνει από τη δραστηριότητα αυτή στις αντίστοιχες ουρές, σύμφωνα με το ΔΚΔ.
- **Φάση C:** Εξαρτημένα γεγονότα (Conditional events). Κατά τη φάση C ελέγχουμε μια προς μια όλες τις δραστηριότητες στο ΔΚΔ, με βάση τη σειρά προτεραιότητας τους, και, εάν πληρούνται οι προϋποθέσεις έναρξης για κάποιες από αυτές, εκτελούμε το γεγονός έναρξής τους. Η έναρξη των δραστηριοτήτων αποτελεί, όπως ήδη ξέρουμε, ένα εξαρτημένο γεγονός. Όταν λέμε «εκτελούμε» την έναρξη μιας δραστηριότητας, εννοούμε ότι μετακινούμε τις οντότητες που εμπλέκονται στη δραστηριότητα που αρχίζει από τις ουρές εισόδου τους προς τη δραστηριότητα αυτή, σύμφωνα με το ΔΚΔ.

5.5.2. Ένα παράδειγμα

Στην ενότητα αυτή θα δημιουργήσουμε ένα ΔΚΔ και θα το χρησιμοποιήσουμε για την εξήγηση της εκτέλεσης ενός μοντέλου προσομοίωσης με τη μέθοδο των τριών φάσεων. Συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιήσουμε για παράδειγμα την περίπτωση ενός υποθετικού μπαρ. Μέσα σε αυτό υπάρχει ένας σερβιτόρος, ο οποίος αναλαμβάνει την προετοιμασία των ποτών που παραγγέλνουν οι πελάτες, το σερβίρισμα τους και το πλύσιμο των ποτηριών. Υποθέτουμε ότι ο σερβιτόρος χρησιμοποιεί περιορισμένο αριθμό ίδιων ποτηριών για όλα τα ποτά (επομένως τα ποτήρια αποτελούν πόρο του συστήματος). Τα ποτήρια, αφού χρησιμοποιηθούν από τους πελάτες, πλένονται και επαναχρησιμοποιούνται. Κάθε πελάτης μπορεί να καταναλώσει διαφορετικό αριθμό

ποτών. Θέλουμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του παραπάνω συστήματος.

Κατασκευάζουμε καταρχήν τη λίστα περιγραφής του συστήματος (Πίνακας 5.4).

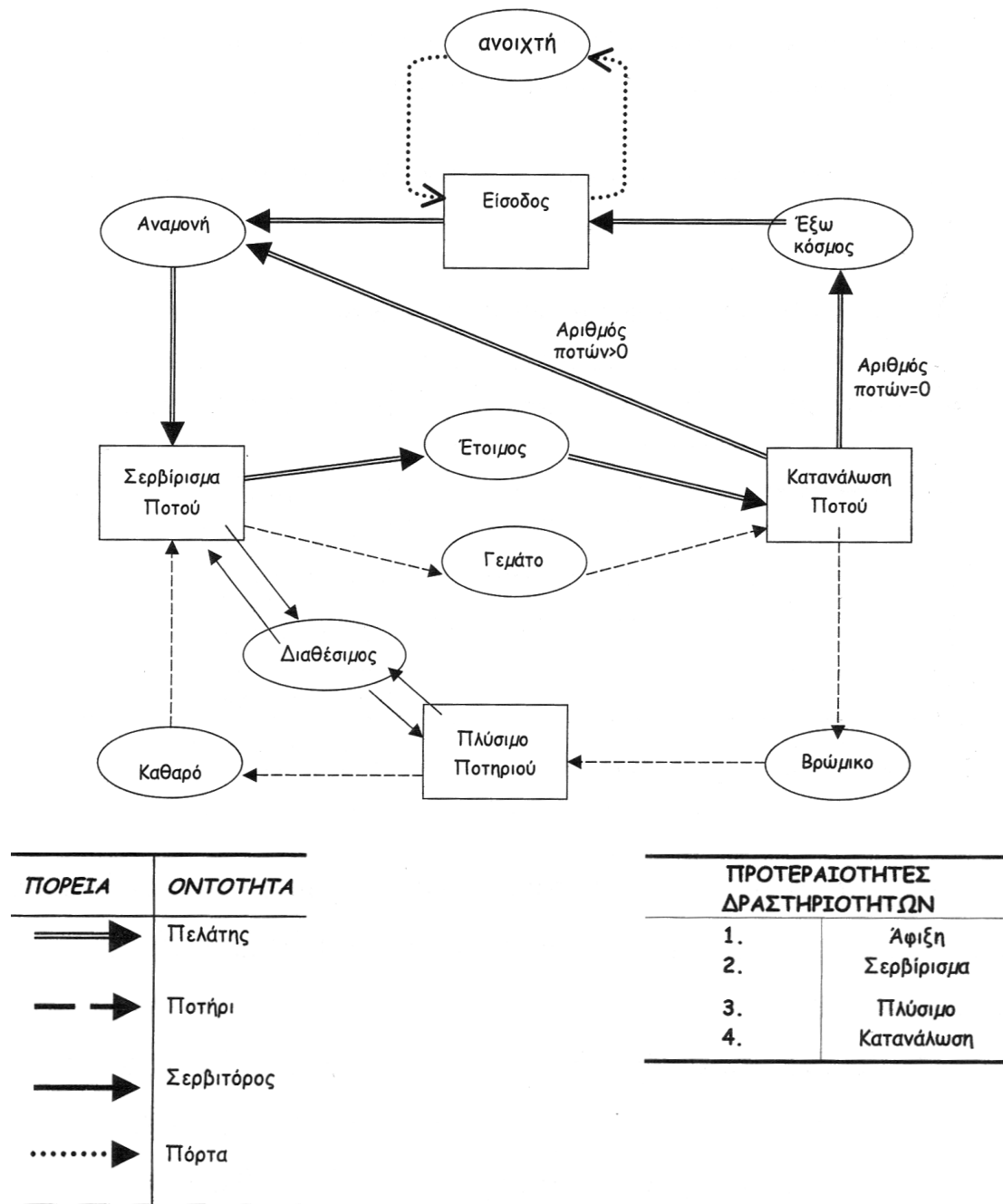
ΟΝΤΟΤΗΤΕΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ
Σερβιτόρος		<ul style="list-style-type: none"> ■ Σερβίρισμα ■ Πλύσιμο
Πελάτης	Αριθμός ποτών	<ul style="list-style-type: none"> ■ Κατανάλωση ■ Σερβίρισμα ■ Άφιξη πελάτη
Ποτήρι		<ul style="list-style-type: none"> ■ Πλύσιμο ■ Κατανάλωση ■ Σερβίρισμα
«Πόρτα»		<ul style="list-style-type: none"> ■ Άφιξη πελάτη

Πίνακας 5.4. Λίστα περιγραφής του συστήματος «μπαρ»

Στη συνέχεια, έχοντας υπόψη τους κανόνες δόμησης των ΔΚΔ κατασκευάζουμε τμηματικά το ΔΚΔ. Συγκεκριμένα, οι κύκλοι ζωής των οντοτήτων που εμπλέκονται είναι:

- **Πελάτης:** Είσοδος (Δ) → Αναμονή για Σερβίρισμα (Ο) → Σερβίρισμα Ποτού (Δ) → Έτοιμος (Ο) [τεχνητή] → Κατανάλωση Ποτού (Δ) → Αναμονή για Σερβίρισμα (Ο) ή Έξω Κόσμος (Ο)
- **Σερβιτόρος:** Διαθέσιμος (Ο) → Σερβίρισμα (Δ) ή Πλύσιμο (Δ) → Διαθέσιμος (Ο) → κοκ.
- **Ποτήρι:** Καθαρό (Ο) → Σερβίρισμα Ποτού (Δ) → Γεμάτο (Ο) [τεχνητή] → Κατανάλωση Ποτού (Δ) → Βρώμικο (Ο) → Πλύσιμο (Δ)
- **Πόρτα:** Ανοιχτή (Ο) → Είσοδος (Δ)

Η ένωση των παραπάνω κύκλων ζωής στα σημεία κοινών δραστηριοτήτων (Δ) είναι το συνολικό ΔΚΔ του συστήματος, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8. ΔΚΔ του συστήματος «μπαρ»

Προκειμένου να εκτελέσουμε το μοντέλο της προσομοίωσης που περιγράφεται στο παραπάνω ΔΚΔ, πρέπει να γνωρίζουμε μερικά επιπρόσθετα στοιχεία για το σύστημα (Πίνακας 5.5.):

- **Αριθμός οντοτήτων.** Έστω ότι στο μπαρ μας υπάρχει ένας σερβιτόρος και τρία ποτήρια. Φυσικά, οι πελάτες, που αποτελούν προσωρινή οντότητα, είναι δυνητικά άπειροι σε αριθμό.

- **Χρονική διάρκεια εκτέλεσης των δραστηριοτήτων.** Έστω ότι κάθε δραστηριότητα έχει χρονική διάρκεια που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Στο σημείο αυτό, μην ανησυχείτε αν δεν καταλαβαίνετε τις στατιστικές κατανομές που χρησιμοποιούμε - θα τις δούμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.
- **Τιμές χαρακτηριστικών οντοτήτων.** Έστω ότι ο αριθμός των ποτών που θα πει κάθε πελάτης ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ 1 και 4 ποτών, δηλαδή κατανομή $U(1,4)$.
- **Αρχικές συνθήκες του μοντέλου.** Έστω ότι στην αρχή δεν υπάρχει κανείς πελάτης μέσα στο μπαρ, ο σερβιτόρος είναι διαθέσιμος και τα ποτήρια είναι όλα πλυμένα.

Δραστηριότητες	Χρονική Διάρκεια	Εξήγηση
Χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πελατών (interarrival time)	Expο (10)	Ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πελατών ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέσο 10 λεπτά (η αρνητική εκθετική κατανομή δίνει συνήθως μια καλή προσέγγιση του ρυθμού άφιξης πελατών σε ένα σύστημα)
Σερβίρισμα	N (6,1)	Το σερβίρισμα ακολουθεί κανονική κατανομή με μέσο 6 λεπτά και διακύμανση 1 λεπτό
Κατανάλωση ποτού	U (5,8)	Η κατανάλωση ποτού ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ 5 και 8 λεπτών
Πλύσιμο	5	Το πλύσιμο κάθε ποτηριού διαρκεί 5 λεπτά. Η διάρκεια έχει σταθερή τιμή (προσδιορισμένη δραστηριότητα)

Πίνακας 5.5. Επιπρόσθετα στοιχεία συστήματος

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης, θα χρειαστούμε να κάνουμε ευκολότερα δειγματοληψία από τις παραπάνω στατιστικές κατανομές, δηλαδή να επιλέγουμε κάθε φορά που χρειάζεται μια τυχαία τιμή από την κάθε κατανομή. Για διευκόλυνσή μας, δίνεται ο Πίνακας 5.6. που δίνει τυχαίες τιμές από τις κατανομές που χρησιμοποιούνται (οι τιμές έχουν προκύψει από στατιστικούς πίνακες).

Δραστηριότητες / Χαρακτηριστικά	Κατανομή	Τιμές
Χρόνος Αφίξης πελατών	Εχρο (10)	1, 20, 30, 12, 3, 3, 5, 2, 23, 0, 10, 26, 13, 0, 21, 10, 1, 40, 8, 24, 5, 4, 15, 1, 2, 6, 1, 4, 20, 10, 9, 22, 1, 1, 40, 13, 11, 20, 8, 5, 45, 1, 25, 4, 14, 2, 8, 9, 2, 5, 0, 10, 7, 3, 12
Σερβίρισμα	N (6,1)	5, 5, 6, 5, 5, 5, 6, 6, 6, 6, 3, 5, 7, 5, 6, 6, 7, 6, 6, 5, 6, 6, 6, 7, 6, 7, 6, 6, 6, 5, 6, 6, 6, 5, 4, 4, 6, 4, 6, 7, 7, 6, 6, 6, 6, 6, 5, 6, 5, 6, 6, 6, 7, 7, 7, 6, 5, 6, 6, 4, 6, 7, 5, 6, 6, 6, 7
Κατανάλωση ποτού	U (5,8)	7, 7, 6, 7, 7, 8, 8, 6, 8, 8, 8, 7, 8, 5, 8, 8, 6, 6, 5, 5, 7, 6, 7, 8, 6, 7, 5, 5, 7, 6, 8, 6, 5, 7, 6, 8, 7, 8, 7, 7, 6, 8, 5, 6, 8, 6, 8, 6, 5, 5, 8, 6, 5, 5, 5, 6, 8, 5, 8, 6, 7, 7, 5, 8, 7, 8, 6, 5, 8, 7, 6, 8, 8, 6, 6, 5, 7, 6, 8, 5, 6, 8, 8, 5
Αριθμός ποτών που έχει ανάγκη ο πελάτης	U (1,4)	4, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 4, 1, 3, 3, 4, 4, 1, 2, 4, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 3, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 4, 4, 1, 3, 2, 1, 2, 1, 2, 4, 2, 3, 2, 4, 1, 1, 4, 3, 1, 3, 2, 2, 3, 4, 1, 2, 4, 2, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 4, 1, 1, 1, 4, 2

Πίνακας 5.6. Τιμές από τους στατιστικούς πίνακες

Σκοπός της προσομοίωσης είναι να υπολογιστεί ο μέσος χρόνος που περιμένει ο κάθε πελάτης να εξυπηρετηθεί και να εκφραστεί ως αναλογία του συνολικού χρόνου της παραμονής του στο μπαρ. Το μοντέλο θα εκτελεστεί μέχρι να εξυπηρετηθούν οι τέσσερις πρώτοι πελάτες.

Εκτέλεση:

Σχεδιάζουμε τον πίνακα εκτέλεσης του μοντέλου σύμφωνα με τη μέθοδο των τριών φάσεων. Σε αυτόν υπάρχουν τρεις στήλες, μία για κάθε φάση:

- Στη στήλη **A** φαίνεται ο τρέχον χρόνος του ρολογιού της προσομοίωσης.
- Στη στήλη **B** εκτελούνται ανεξάρτητα γεγονότα και οι μετακινήσεις στο ΔΚΔ είναι από δραστηριότητες σε ουρές.
- Στη στήλη **C**, κάνουμε έλεγχο όλων των δραστηριοτήτων στο διάγραμμα για να δούμε ποιες μπορούν να ξεκινήσουν. Αν μπορούν να ξεκινήσουν πάνω από δυο δραστηριότητες μαζί, τότε ακολουθούμε τις προτεραιότητες που έχουν οριστεί. Υπενθυμίζουμε ότι για να μπορεί να ξεκινήσει μια δραστηριότητα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μία οντότητα σε κάθε μία από

τις ουρές εισόδου. Τα γεγονότα που εκτελούνται είναι εξαρτημένα και οι μετακινήσεις στο ΔΚΔ είναι από ουρές σε δραστηριότητες. Παρακάτω δίνεται ο Πίνακας 5.7 εκτέλεσης του μοντέλου, στον οποίο, για ευκολία έχουμε υποθέσει ότι εισέρχονται στο μπαρ μόνο τέσσερις πελάτες (επαληθεύστε τον, εκτελώντας μόνοι σας την προσομοίωση πάνω στο ΔΚΔ, για παράδειγμα με τη βοήθεια κερμάτων ή άλλων αντικειμένων για κάθε οντότητα).

A Χρόνος	B Ανεξάρτητα γεγονότα	C Εξαρτημένα γεγονότα	D Τέλος
0		Άφιξη Πελάτη 1 (τέλος σε 1)	1
1	Άφιξη Πελάτη 1 (Ανάγκη για 4 ποτά)	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1 (Τέλος σε 5)	6
		Άφιξη Πελάτη 2 (Τέλος σε 20)	21
6	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1	Κατανάλωση από πελάτη 1 του ποτού 1 με ποτήρι 1 (Τέλος σε 7)	13
13	Κατανάλωση από πελάτη 1 του ποτού 1 με ποτήρι 1 (ποτά 3)	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 2 (Τέλος σε 5)	18
18	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 2	Κατανάλωση από πελάτη 1 του ποτού 2 με ποτήρι 2 (Τέλος σε 7)	25
		Πλύσιμο ποτηριού 1 από Σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	23
21	Άφιξη πελάτη 2 (ανάγκη για δύο ποτά)	Άφιξη Πελάτη 3 (Τέλος σε 30)	51
23	Πλύσιμο ποτηριού 1 από Σερβιτόρο	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 2 από Σερβιτόρο με ποτήρι 3 (Τέλος σε 6)	29
25	Κατανάλωση ποτού (2ου) από πελάτη 1 σε ποτήρι 2	-	-
29	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 2 από Σερβιτόρο με ποτήρι 3	Κατανάλωση ποτού (1ου) από πελάτη 2 με ποτήρι 3 (Τέλος σε 6)	35
		Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1 (Τέλος σε 5)	34
34	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1	Κατανάλωση ποτού (3ου) από πελάτη 1 με ποτήρι 1 (Τέλος σε 7)	41
		Πλύσιμο ποτηριού 2 από σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	39
35	Κατανάλωση ποτού (1ου) από πελάτη 2 με ποτήρι 3	-	-
39	Πλύσιμο ποτηριού 2 από σερβιτόρο	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 2 από Σερβιτόρο με ποτήρι 2 (Τέλος σε 5)	44

41	Κατανάλωση ποτού (3ου) από πελάτη 1 με ποτήρι 1		-
44	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 2 από Σερβιτόρο με ποτήρι 2	Κατανάλωση ποτού (20B) από πελάτη 2 με ποτήρι 2 (Τέλος σε 7)	51
		Πλύσιμο ποτηριού 3 από Σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	49
49	Πλύσιμο ποτηριού 3 από Σερβιτόρο	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από το Σερβιτόρο με ποτήρι 3 (Τέλος σε 5)	54
51	Άφιξη πελάτη 3 (ανάγκη για 1 ποτό)	(Αναχώρηση πελάτη 2) Άφιξη πελάτη 4 (Τέλος σε 12)	63
	Κατανάλωση ποτού (2 ^ο) από πελάτη 2 με ποτήρι 2		
54	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από το Σερβιτόρο με ποτήρι 3	Κατανάλωση ποτού (4ου) από πελάτη 1 με ποτήρι 3 (Τέλος σε 8)	62
		Πλύσιμο ποτηριού 1 από Σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	59
59	Πλύσιμο ποτηριού 1 από σερβιτόρο	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 3 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1 (Τέλος σε 6)	65
62	Κατανάλωση ποτού (4ου) από πελάτη 1 με ποτήρι 3	(Αναχώρηση πελάτη 1)	-
63	Άφιξη πελάτη 4 (ανάγκη για 2 ποτά)	-	-
65	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 3 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1	Κατανάλωση ποτού (1 ^{ου}) από πελάτη 3 με ποτήρι 1 (Τέλος σε 8)	73
		Πλύσιμο ποτηριού 2 από σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	70
70	Πλύσιμο ποτηριού 2 από Σερβιτόρο	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 4 από Σερβιτόρο με ποτήρι 2 (Τέλος σε 6)	76
73	Κατανάλωση ποτού (1ου) από πελάτη 3 με ποτήρι 1 (0 ποτά)	(Αναχώρηση πελάτη 3)	-
76	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 4 από Σερβιτόρο με ποτήρι 2	Κατανάλωση ποτού (1 ^{ου}) από πελάτη 4 με ποτήρι 2 (Τέλος σε 6)	82
		Πλύσιμο ποτηριού 3 από σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	81
81	Πλύσιμο ποτηριού 3 από σερβιτόρο	Πλύσιμο ποτηριού 1 από Σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	86
82	Κατανάλωση ποτού (1 ^{ου}) από πελάτη 4 με ποτήρι 2	-	-

86	Πλύσιμο ποτηριού 1 από Σερβιτόρο	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 4 από Σερβιτόρο με ποτήρι 3 (Τέλος σε 6)	92
92	Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 4 από Σερβιτόρο με ποτήρι 3	Κατανάλωση ποτού (2ου) από πελάτη 4 με ποτήρι 3 (Τέλος σε 8)	100
		Πλύσιμο ποτηριού 2 από Σερβιτόρο (Τέλος σε 5)	97
97	Πλύσιμο ποτηριού 2 από Σερβιτόρο	-	-
100	Κατανάλωση ποτού (2ου) από πελάτη 4 με ποτήρι 3	(Αναχώρηση πελάτη 4)	-
ΤΕΛΟΣ			

Πίνακας 5.7. Πίνακας εκτέλεσης του μοντέλου με την μέθοδο των 3 φάσεων

Ας δούμε όμως βήμα-βήμα, ενδεικτικά για τις πρώτες στιγμές του ρολογιού τι κάναμε, ώστε να δημιουργηθεί ο παραπάνω πίνακας:

- Ξεκινώντας, το ρολόι της προσομοίωσης από το χρόνο μηδέν, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει φυσικά κανένα προγραμματισμένο γεγονός που θα μπορούσε να τελειώσει (φάση Β), οπότε περνάμε απευθείας στη φάση Ο. Υπάρχει μόνο ένα εξαρτημένο γεγονός που μπορεί να συμβεί, δηλαδή η «άφιξη πελάτη» και μάλιστα του πρώτου. Στη συνέχεια, βρίσκουμε από την αντίστοιχη κατανομή τη διάρκεια, άρα το χρόνο τέλους αυτής της δραστηριότητας. Παίρνουμε, δηλαδή, από την κατανομή «άφιξη πελάτη» την πρώτη τιμή. Έχοντας βρει την πρώτη αυτή τιμή, τη γράφουμε στη δεξιά στήλη.
- Έπειτα εκτελούμε πάλι τη φάση Α και πηγαίνουμε το ρολόι της προσομοίωσης στο νωρίτερο χρόνο κάτι έχει προγραμματιστεί να τελειώσει. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αφού δεν υπάρχει άλλη εναλλακτική το ρολόι της προσομοίωσης πάει στο 1. Τη στιγμή αυτή θα έχει τελειώσει η δραστηριότητα άφιξης του πρώτου πελάτη (δηλαδή ο πρώτος πελάτης μπαίνει στο μπαρ τη χρονική στιγμή 1. Σύμφωνα με το ΔΚΔ, παρατηρούμε ποιες δραστηριότητες μπορούν να ξεκινήσουν τώρα (φάση Ο). Μπορούν να ξεκινήσουν δύο δραστηριότητες: το «Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1» και η «Άφιξη Πελάτη 2». Για κάθε μία από τις παραπάνω δραστηριότητες επιλέγουμε μία τιμή από τις αντίστοιχες κατανομές (ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν) και στην τιμή αυτή προσθέτουμε τον τρέχοντα χρόνο της προσομοίωσης (χρόνος στη στήλη Α). Έτσι, το σερβίρισμα του 1ου ποτού στον 1ο πελάτη θα

τελειώσει στη χρονική στιγμή 6, δηλαδή σε 5+1 λεπτά, ενώ η άφιξη του 2ου πελάτη θα γίνει στη χρονική στιγμή 21 (20+1 λεπτά).

- Εκτελούμε τη φάση Α ξανά. Συγκρίνουμε τους χρόνους τέλους των δραστηριοτήτων που είναι σε εκτέλεση και επιλέγουμε αυτή που θα τελειώσει νωρίτερα, εδώ το σερβίρισμα ποτού. Μετακινούμε το ρολόι της προσομοίωσης στο χρόνο αυτό. Εκτελούμε τη λήξη της δραστηριότητας αυτής (σερβίρισμα του 1ου ποτού στον 1ο πελάτη) και περνάμε στη φάση Ο. Παρατηρούμε, από το ΔΚΔ, ότι μπορεί να ξεκινήσει η δραστηριότητα «Κατανάλωση ποτού (1ου) από πελάτη 1 με ποτήρι 1» η οποία τελειώνει στο χρόνο 13 (6 από στήλη Α και 7 από την κατανομή «κατανάλωση ποτού»).

5.6. Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν βασικές έννοιες για τη δόμηση των Διαγραμμάτων Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ), καθώς επίσης και σχετικά παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση αυτών. Αρχικά, ορίσαμε τι είναι ένα ΔΚΔ και ποιοι οι κανόνες που ένας αναλυτής πρέπει να λάβει υπόψη του, ώστε να μοντελοποιήσει σωστά το υπό μελέτη σύστημα. Είδαμε επίσης πώς λειτουργούν τα ΔΚΔ και καταγράψαμε βασικούς κανόνες για τη δόμηση τους. Στη συνέχεια παρουσιάσαμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από τη χρήση των διαγραμμάτων κύκλου δραστηριοτήτων. Τέλος, ασχοληθήκαμε με τη μέθοδο των τριών φάσεων, μία μέθοδο εκτέλεσης προσομοίωσης και παραθέσαμε ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόησή της.

6. Χειρισμός Χρόνου και Μεθοδολογίες Προσομοίωσης

6.1. Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκαν η μετάβαση από ένα σύστημα σε ένα μοντέλο, η κατασκευή μοντέλων και η γραφική απεικόνισή τους. Η προσομοίωση όμως όπως έχει προαναφερθεί ασχολείται με δυναμικά συστήματα και δεν αφορά στατικές καταστάσεις. Επομένως, η γραφική αναπαράσταση δεν αρκεί για την παρατήρησή τους και την κατανόηση της λειτουργίας τους. Είναι απαραίτητο να εισάγουμε με κάποιο τρόπο κάποιας μορφής «δυναμικότητα» στο μοντέλο. Εξάλλου μια βασική λειτουργία της προσομοίωσης είναι να «δημιουργεί ιστορικό» στο σύστημα, δηλαδή να πραγματοποιεί διαδοχικά τρεξίματα του μοντέλου και να συλλέγει στοιχεία για την πορεία και τη συμπεριφορά του στο πέρασμα του χρόνου. Άρα είναι απαραίτητο να ενσωματώσουμε τη διάσταση του χρόνου στο μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει ώστε να αυτό μπορέσει να «τρέξει». Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να πραγματοποιηθεί αυτό. Το πέρασμα του χρόνου αναπαρίσταται γενικά από το μηχανισμό ροής χρόνου. Υπάρχουν δυο βασικές μορφές χειρισμού του χρόνου (μηχανισμός επόμενου γεγονότος και μηχανισμός σταθερού χρονικού διαστήματος), οι οποίες υποστηρίζουν διαφορετικές μεθοδολογίες εκτέλεσης ενός μοντέλου προσομοίωσης. Οι κυριότερες μεθοδολογίες είναι η προσομοίωση γεγονότων (event scheduling ή αλλιώς event worldview), η προσομοίωση δραστηριοτήτων (activity worldview) και η προσομοίωση αλληλεπίδρασης διεργασιών (process interaction worldview). Κάθε μία από αυτές στηρίζεται αντίστοιχα στα γεγονότα, στις δραστηριότητες και στις αλληλεπιδρούσες διεργασίες του συστήματος και θα μελετηθεί στις παρακάτω παραγράφους. Όπως θα συζητηθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, οι γλώσσες προγραμματισμού και τα πακέτα λογισμικού που χρησιμοποιεί η προσομοίωση βασίζονται σε κάποια από τις παραπάνω προσεγγίσεις. Ακόμα και αν ένα πακέτο δεν υποστηρίζει άμεσα κάποια από αυτές, η κατανόηση των διαφορετικών αυτών μεθοδολογιών είναι απαραίτητη γιατί μπορεί να δώσει το έναυσμα στον αναλυτή για τη διερεύνηση και πιθανή ανακάλυψη κάποιου εναλλακτικού τρόπου μοντελοποίησης του συστήματος.

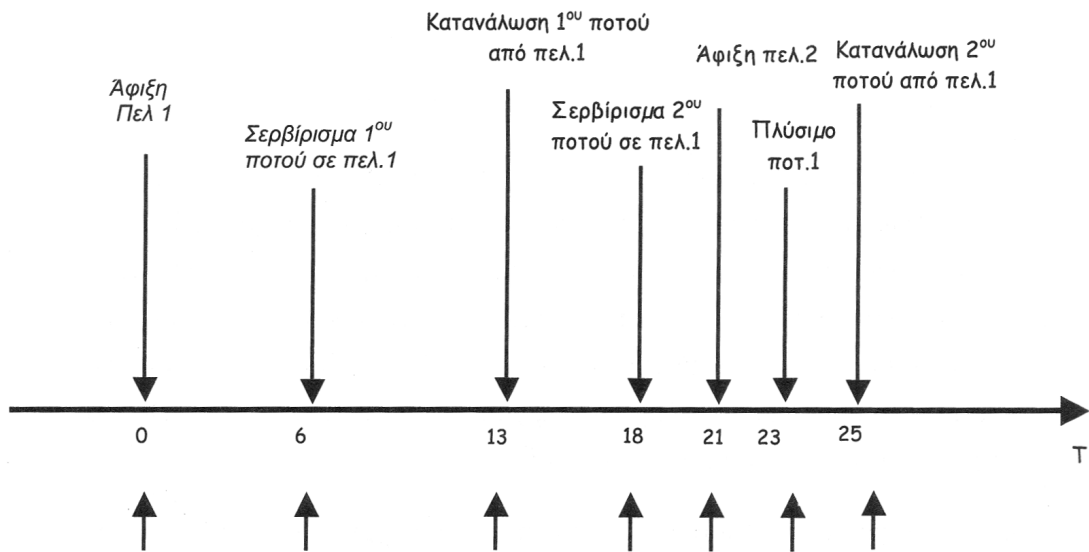
6.2. Χειρισμός Χρόνου

6.2.1. Μηχανισμοί ελέγχου του χρόνου

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η προσομοίωση αποτελεί ιδανική μέθοδο για να παρατηρήσει κάποιος την πορεία ενός συστήματος διαχρονικά. Προκειμένου να επιτευχθεί μία τέτοιου είδους παρατήρηση υπάρχουν δυο τρόποι οργάνωσης του χρόνου ή όπως αλλιώς λέγονται δυο «μηχανισμοί ροής χρόνου». Οι μηχανισμοί αυτοί καταγράφουν την πάροδο του χρόνου στο υπό μελέτη σύστημα και ελέγχουν τις χρονικές μεταβολές αυτού. Οι δύο βασικοί μηχανισμοί ροής χρόνου είναι:

- a) Ο Μηχανισμός Επόμενου Γεγονότος, που χρησιμοποιείται κυρίως σε διακριτά συστήματα, ασχολείται μόνο με εκείνες τις χρονικές στιγμές στις οποίες συμβαίνουν γεγονότα. Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, ο χρόνος προσπερνώντας όλα τα ενδιάμεσα στάδια κατά τα οποία δε συμβαίνει κάποια αλλαγή στο σύστημα, «προχωράει» σε αυτή την προκαθορισμένη στιγμή, όπου ένα γεγονός λαμβάνει χώρα. Στο συγκεκριμένο μηχανισμό είναι απαραίτητη η χρήση ενός καταλόγου δρομολογηθέντων και μη εκτελεσθέντων γεγονότων. Με τον όρο κατάλογο δεδομένων εννοούμε μια συλλογή γεγονότων τα οποία είναι διατεταγμένα σε χρονολογική σειρά. Ο κατάλογος δε θα πρέπει να αποτελεί μια άγνωστη έννοια, αφού ουσιαστικά χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου μελετήθηκε η μέθοδος των τριών φάσεων (Πίνακας επίλυσης του συστήματος - μέθοδος 3 φάσεων) για να καταγραφούν τα γεγονότα και να ταξινομηθούν χρονικά. Στο επόμενο κεφάλαιο θα επανέρθουμε αναλυτικότερα στο θέμα αυτό.

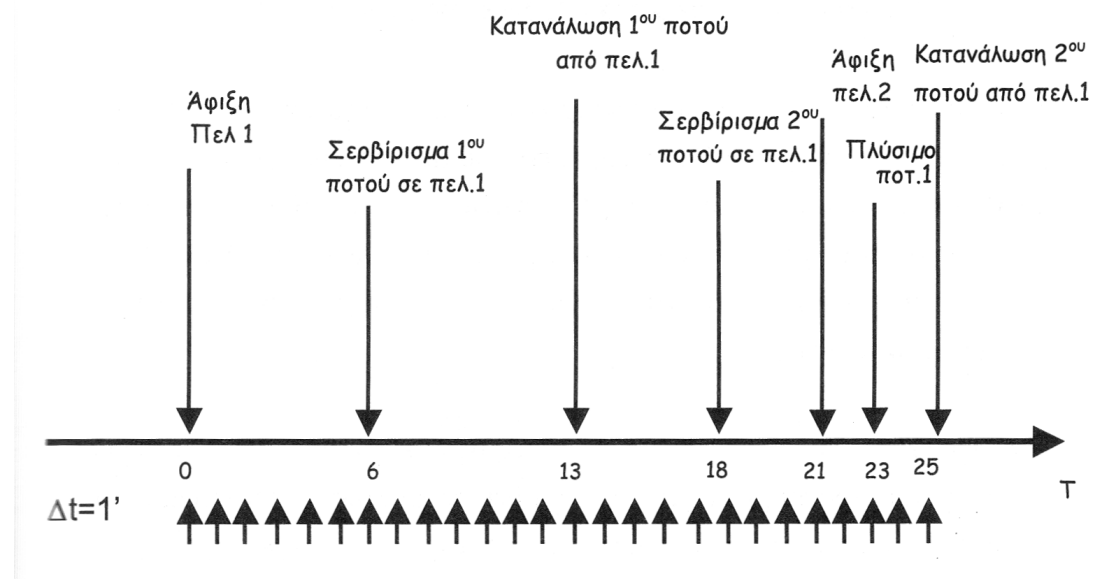
Στη γνωστή περίπτωση του μπαρ, ο μηχανισμός επόμενου γεγονότος για τα πρώτα 25 λεπτά εκτέλεσης του μοντέλου θα είχε το παρακάτω αποτέλεσμα (Σχήμα 6.1.). Συγκρίνοντας μάλιστα το παρακάτω σχήμα με τον πίνακα επίλυσης του συστήματος επικυρώνεται το ότι ο χρόνος σταματά μόνο σε στιγμές που συμβαίνουν γεγονότα στο σύστημα - επομένως η μέθοδος των τριών φάσεων ακολουθεί το μηχανισμό ροής χρόνου επόμενου γεγονότος.



Σχήμα 6.1. Χρονοδιάγραμμα μηχανισμού επομένου γεγονότος του παραδείγματος «μπαρ»

b) Ο Μηχανισμός Σταθερού χρονικού διαστήματος, που χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση συνεχών συστημάτων, ρυθμίζει το ρολόι της προσομοίωσης να σταματά κατά ένα σταθερό χρονικό διάστημα (Δt). Η επιλογή του διαστήματος Δt είναι σημαντική. Ένα σχετικά μικρό Δt θα οδηγούσε σε υπερβολικά πολλές και πιθανά άσκοπες επαναλήψεις των ελέγχων. Το αποτέλεσμα θα ήταν ένα αργό, μη αποδοτικό πρόγραμμα (Σχήμα 6.2). Αντίθετα, ένα σχετικά μεγάλο M θα είχε ως αποτέλεσμα να εξετάζεται το σύστημα σε πολύ αραιά χρονικά διαστήματα, με συνέπεια να ομαδοποιούνται σημαντικά γεγονότα και δραστηριότητες που πιθανώς συμβαίνουν στο ενδιάμεσο και πρέπει να τύχουν χωριστής εξέτασης.

Έτσι, τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης επομένως δε θα ήταν ακριβή και κατ' επέκταση ούτε αξιόπιστα. Στο παρακάτω παράδειγμα παρουσιάζεται το μπαρ όπως αυτό θα αντιμετωπιζόταν με το μηχανισμό σταθερού διαστήματος με διάστημα το ένα λεπτό.



Σχήμα 6.2. Χρονοδιάγραμμα μηχανισμού σταθερού διαστήματος στο παράδειγμα του «μπαρ».

Ο μηχανισμός επόμενου γεγονότος υπερτερεί σε σχέση με τον μηχανισμό σταθερού χρονικού διαστήματος καθώς αποφεύγουμε άσκοπες αυξήσεις του ρολογιού της προσομοίωσης, αφού το ρολόι της προσομοίωσης προσπερνά όλα εκείνα τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία δε συμβαίνει κάποια αλλαγή στο σύστημα και σταματάει σε εκείνα μόνο τα σημεία κατά τα οποία συμβαίνουν αλλαγές.

Αντίστοιχα, με το μηχανισμό σταθερού διαστήματος αποφεύγουμε τους πιο περίπλοκους (προγραμματιστικά) μηχανισμούς προγραμματισμού των επόμενων γεγονότων, αφού χωρίζουμε το ρολόι της προσομοίωσης σε προκαθορισμένα, σταθερά χρονικά διαστήματα.

Ο μηχανισμός επόμενου γεγονότος χρησιμοποιείται στην προσομοίωση γεγονότων ενώ ο μηχανισμός σταθερού διαστήματος χρησιμοποιείται στην προσομοίωση δραστηριοτήτων, όπως θα παρουσιαστεί και στις παρακάτω παραγράφους.

6.3. Κατάλογος Επόμενου Γεγονότος

Όπως είπαμε, στο μηχανισμό ροής χρόνου επόμενου γεγονότος, πρέπει να καταγράφονται σε χρονική διάταξη οι προγραμματισμένες δραστηριότητες ανάλογα με το χρόνο τέλους τους. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την αύξηση του

χρόνου προσομοίωσης και εξασφαλίζει ότι όλα τα γεγονότα θα συμβούν με τη σωστή χρονική σειρά, βασίζεται στον κατάλογο επόμενου γεγονότος.

Τα γεγονότα καταχωρούνται ως εγγραφές στον κατάλογο αυτό. Για κάθε γεγονός που προγραμματίζεται να συμβεί σε συγκεκριμένη στιγμή στο μέλλον δημιουργείται μία εγγραφή. Η εγγραφή αυτή παρέχει τις εξής δύο πληροφορίες: τη χρονική στιγμή που προγραμματίζεται να συμβεί ένα γεγονός και το είδος του γεγονότος. Με τον όρο προγραμματισμένα γεγονότα εννοούνται τα γεγονότα αποπεράτωσης δραστηριοτήτων, τα οποία εισάγονται στον κατάλογο τη στιγμή έναρξης της δραστηριότητας. Η διάρκεια της δραστηριότητας, η οποία είτε υπολογίζεται είτε επιλέγεται από κάποια στατιστική κατανομή, προστίθεται στο χρόνο έναρξης της δραστηριότητας και έτσι υπολογίζεται η στιγμή αποπεράτωσης της.

Ο κατάλογος επόμενου γεγονότος είναι ταξινομημένος κατά αύξοντα χρόνο. Έτσι, πρώτη στον κατάλογο επόμενου γεγονότος θα είναι η εγγραφή του γεγονότος που είναι προγραμματισμένο να συμβεί συντομότερα, έχει δηλαδή το νωρίτερο χρόνο πραγματοποίησης. Κάθε στιγμή της προσομοίωσης το επόμενο γεγονός που θα συμβεί είναι αυτό που αναπαρίσταται από την πρώτη εγγραφή στον κατάλογο, δεδομένου ότι αυτή αφορά το γεγονός με το νωρίτερο χρόνο πραγματοποίησης.

Ενδεικτικά, στο παράδειγμα του μπαρ έχουμε τον παρακάτω κατάλογο γεγονότων (Πίνακας 6.1.) για τη χρονική στιγμή 1, όπου έχει γίνει ήδη η άφιξη του πρώτου πελάτη και δρομολογούνται τα εξής δυο γεγονότα:

Γεγονός	Χρόνος Πραγματοποίησης
Σερβίρισμα ποτού σε πελάτη 1 από Σερβιτόρο με ποτήρι 1	6
Άφιξη Πελάτη 2	21

Πίνακας 6.1. Κατάλογος γεγονότων για το παράδειγμα του μπαρ (στιγμή 1)

Τη στιγμή 6 σερβίρεται το πρώτο ποτό στον πρώτο πελάτη, οπότε εξάγεται η πρώτη γραμμή από τον κατάλογο, και δρομολογείται ένα νέο γεγονός (εισάγεται μια νέα γραμμή στη σωστή θέση) που αφορά στην κατανάλωση ποτού, όπως αυτό φαίνεται στο Πίνακα 6.2.

Γεγονός	Χρόνος Πραγματοποίησης
Κατανάλωση από πελάτη 1 του ποτού 1 με ποτήρι 1	13
Άφιξη Πελάτη 2	21

Πίνακας 6.2. Κατάλογος γεγονότων για το παράδειγμα του μπαρ (στιγμή 6)

Ο τρόπος που υλοποιείται υπολογιστικά ένας κατάλογος αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.4. Μεθοδολογίες Προσομοίωσης Διακριτών Συστημάτων

Ο μηχανισμός της προσομοίωσης θα πρέπει να είναι ικανός να περιγράφει τις οντότητες του συστήματος, να αναπαριστά (δυναμικά) τη δυναμικότητα της συμπεριφοράς του και να ελέγχει την εκτέλεση της προσομοίωσης. Στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων η δυναμικότητα του συστήματος περιλαμβάνει τη διαδοχή των γεγονότων με ενημέρωση της κατάστασης του συστήματος σε κάθε γεγονός. Υπάρχουν τρεις κύριες εναλλακτικές προσεγγίσεις προσομοίωσης κάθε μία από τις οποίες παρέχει έναν ιδιαίτερο τρόπο οργάνωσης και παρουσίασης των γεγονότων του συστήματος. Ανεξάρτητα από την προσέγγιση που ακολουθείται υπάρχει ένας μηχανισμός ροής χρόνου ο οποίος αν και μπορεί να πάρει διαφορετική μορφή ανάλογα με την προσέγγιση που ακολουθείται, κατά βάση κάνει το ίδιο έργο: μετακινεί το χρόνο της προσομοίωσης από μια στιγμή σε κάποια άλλη.

Οι μεθοδολογίες προσομοίωσης είναι οι εξής:

- Προσομοίωση γεγονότων. Στην προσομοίωση γεγονότων το μοντέλο μελετάται μόνο τις στιγμές εκείνες κατά τις οποίες συμβαίνει κάποιο γεγονός και αλλάζει η τιμή κάποιας παραμέτρου του. Τα πιθανά γεγονότα χωρίζονται σε ανεξάρτητα και εξαρτημένα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί το μηχανισμό ροής χρόνου επόμενου γεγονότος και τον κατάλογο επόμενου γεγονότος για τη δρομολόγηση στιγμιαίων συμβάντων.
- Προσομοίωση δραστηριοτήτων. Στην προσομοίωση δραστηριοτήτων το μοντέλο εκτιμάται σε τακτά (σταθερά) χρονικά διαστήματα, ανεξάρτητα από το αν συμβαίνουν αλλαγές. Η μέθοδος χρησιμοποιεί το μηχανισμό σταθερού διαστήματος και μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Σε κάθε σταθερή αύξηση του χρόνου της προσομοίωσης ελέγχονται μία προς μία όλες οι δραστηριότητες

σχετικά με το κατά πόσο πληρούνται οι προϋποθέσεις που θα τους επέτρεπαν να πραγματοποιηθούν. Στην περίπτωση που συναντώνται οι συνθήκες για κάποια δραστηριότητα, τότε αυτή ξεκινά.

- Προσομοίωση αλληλεπίδρασης διεργασιών. Η προσομοίωση αλληλεπίδρασης διεργασιών επιτρέπει την ανεξάρτητη μοντελοποίηση επί μέρους τμημάτων του μοντέλου τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων. Στην προσομοίωση αλληλεπίδρασης διεργασιών το μοντέλο ορίζεται με βάση τις οντότητες και τον κύκλο ζωής τους. Μια διεργασία μπορεί να ταυτιστεί με τον κύκλο ζωής μιας οντότητας. Περιέχει διάφορα γεγονότα και δραστηριότητες. Κάποιες δραστηριότητες μπορεί να απαιτούν πόρους που είναι περιορισμένοι. Περιορισμοί αυτού του είδους αλλά και άλλοι είναι οι αιτίες που προκαλούν την αλληλεπίδραση των διεργασιών και τη δημιουργία ουρών. Στην απλούστερη περίπτωση, όταν μια οντότητα, για να αρχίσει κάποια δραστηριότητα, απαιτεί ένα μη διαθέσιμο πόρο, τότε θα περιμένει μέχρι να τελειώσει η δραστηριότητα που τον απασχολεί και να αποδεσμευτεί. Με πιο απλά λόγια, στην προσομοίωση αλληλεπίδρασης διεργασιών χωρίζουμε το μοντέλο σε διάφορα τμήματα που λειτουργούν αυτόνομα. Δηλαδή, για κάθε οντότητα υπάρχει ένα διαφορετικό τμήμα, μια συνέχεια γεγονότων και δραστηριοτήτων η οποία ονομάζεται διεργασία. Η κάθε διεργασία αντιμετωπίζεται ξεχωριστά σε πρώτο επίπεδο ενώ υπάρχει και ένα πρόγραμμα γενικού ελέγχου που επιτρέπει και εξασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών διεργασιών-τμημάτων.

Η μέθοδος των τριών φάσεων που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτελεί συνδυασμό των μεθοδολογιών γεγονότων και δραστηριοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, υιοθετεί την αύξηση του χρόνου και τον κατάλογο επόμενου γεγονότος σύμφωνα με την προσομοίωση γεγονότων (φάσεις A και B) και παράλληλα χρησιμοποιεί το σκανάρισμα των δραστηριοτήτων στη φάση C, όπως στην προσομοίωση δραστηριοτήτων. Η μέθοδος αυτή βελτιώνει την απόδοση εκτέλεσης της προσομοίωσης δραστηριοτήτων με το να σταματάει το χρόνο σε κρίσιμα σημεία, σε σημεία δηλαδή πραγματοποίησης γεγονότων. Κάτι τέτοιο εξασφαλίζει ότι έχει αλλάξει κάτι ουσιαστικό στο σύστημα (εκτός από το χρόνο), και ο έλεγχος των δραστηριοτήτων είναι πολύ πιο πιθανό να έχει κάποιο θετικό αποτέλεσμα, δηλαδή την έναρξη κάποιας δραστηριότητας.

Με άλλα λόγια, το πρόγραμμα δεν αναγκάζεται να κάνει πολλούς χρονοβόρους και ίσως άσκοπους ελέγχους. Ελέγχει και πάλι τις δραστηριότητες σε κάθε χτύπο του ρολογιού, όμως οι χτύποι σε αυτή την περίπτωση είναι λιγότεροι και επιλεγμένοι πιο εύστοχα.

6.5. Περίληψη

Στο παρόν κεφάλαιο ασχοληθήκαμε τόσο με το χρόνο (και το πώς αυτός επηρεάζει ένα μοντέλο), όσο και με τις μεθοδολογίες που ακολουθούνται κατά την προσομοίωση. Έγινε εμφανές ότι η ενσωμάτωση της διάστασης του χρόνου στο μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει είναι απαραίτητη προκειμένου να μπορέσει αυτό να «τρέξει». Στο κεφάλαιο αρχικά, παρουσιάστηκαν οι δύο μηχανισμοί ροής του χρόνου και στη συνέχεια έγινε μία σύγκριση των αυτών. Στη συνέχεια, παρουσιάσαμε τις τρεις κυριότερες μεθοδολογίες προσομοίωσης, οι οποίες κατά κύριο λόγο υπαγορεύουν το είδος του προγραμματιστικού μοντέλου που θα δημιουργηθεί, βασιζόμενες κυρίως στην επεξεργασία των ουρών.

7. Ανάλυση Εισόδου και Εξόδου Προσομοίωσης

7.1. Εισαγωγή

Για να είναι πετυχημένη μια προσομοίωση πρέπει το μοντέλο να αποτελεί πιστή αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος. Έχουμε ήδη δει πώς αντιμετωπίζεται η μοντελοποίηση των οντοτήτων, των χαρακτηριστικών τους και των δραστηριοτήτων σε ένα μοντέλο προσομοίωσης. Όμως αυτά είναι μόνο τα ποιοτικά στοιχεία του μοντέλου. Για να είναι το μοντέλο πιστό, πρέπει και οι ποσοτικές πληροφορίες που θα εισαχθούν σε αυτό ως δεδομένα να αντιπροσωπεύουν πιστά την πραγματικότητα. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε αρχικά με την ανάλυση της εισόδου της προσομοίωσης, δηλαδή, με την τροφοδότηση του μοντέλου με δεδομένα.

Οι περισσότερες από τις τιμές εισόδου του μοντέλου προκύπτουν μετά από παρατήρηση του συστήματος και καταγραφή μετρήσεων. Τέτοιες πληροφορίες είναι οι χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πελατών στο σύστημα, οι διάρκειες των διαδικασιών, οι πιθανότητες ακολούθησης πορειών και τα χαρακτηριστικά των οντοτήτων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου ασχολούμαστε με την ανάλυση εξόδου της προσομοίωσης. Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα αποτελέσουν βάση για τη λήψη αποφάσεων, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή εξαγωγή τους και τη μετέπειτα ερμηνεία τους, καθώς ενδεχόμενα λάθη θα οδηγήσουν σε άστοχες και αναποτελεσματικές επιλογές δράσης.

Κατά την προσομοίωση ενός συστήματος και συγκεκριμένα κατά την εκτέλεση του μοντέλου, αυτό που ουσιαστικά συμβαίνει είναι η μετατροπή των δεδομένων εισόδου μέσα από το μηχανισμό του μοντέλου σε στατιστικά αποτελέσματα που μας δίνουν πληροφόρηση σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, δεν μπορούμε αβίαστα να αποδεχτούμε ως έγκυρα τα αποτελέσματα αυτά. Πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι τα δεδομένα εισόδου από τα οποία προκύπτουν, βασίζονται στην παραγωγή και τη χρήση τυχαίων δειγμάτων. Εξάλλου και η προσομοίωση, ως μέθοδος, είναι στοχαστική.

Επομένως, όπως τα δεδομένα εισόδου, έτσι και τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι στοχαστικά και πρέπει να αντιμετωπίζονται με στατιστική δειγματοληψία και

ανάλυση. Άμεσα λοιπόν, τίθεται και το θέμα του εύρους και της επάρκειας του δείγματος των εξόδων που θα χρησιμοποιηθούν.

Ένα άλλο ζήτημα που προκύπτει σε αυτή τη φάση είναι η διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης για την οποία θα τρέχει το μοντέλο. Δηλαδή πρέπει να αποφασιστεί για πόσο χρονικό διάστημα θα εκτελείται κάθε φορά το μοντέλο. Αυτό συνδέεται άμεσα με το εάν θέλουμε να παρατηρήσουμε το σύστημα εφόσον έχει φτάσει στη σταθερή του κατάσταση ή θέλουμε να δούμε τη συμπεριφορά του για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η διαδικασία της ανάλυσης εξόδου επηρεάζεται από το αν το σύστημα φτάνει σε σταθερή κατάσταση κατά την εκτέλεση του μοντέλου και κατά πόσο τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τις αρχικές συνθήκες του. Επίσης, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στο κατά πόσο τα αποτελέσματα είναι αλληλοσυσχετιζόμενα δηλαδή κατά πόσο η μια τιμή επηρεάζει την άλλη. Τα αποτελέσματα πρέπει να είναι τυχαία και να μην εμπεριέχουν επιτήδευση που θα οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω θέματα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης που θα παρουσιαστούν στις παρακάτω ενότητες. Η κύρια τακτική που ακολουθείται στην ανάλυση εξόδου της προσομοίωσης είναι ο πειραματισμός τόσο με τις τιμές των παραμέτρων όσο και με τη δομή του συστήματος.

7.2. Ανάλυση Εισόδου Προσομοίωσης

7.2.1. Δεδομένα εισόδου

Στα περισσότερα ακαδημαϊκά προβλήματα (π.χ. στα πλαίσια κάποιου μαθήματος στο πανεπιστήμιο), οι φοιτητές καλούνται να λύσουν κάποιο πρόβλημα με βάση συγκεκριμένα στοιχεία που έχουν στη διάθεση τους ως δεδομένα. Δημιουργείται έτσι η εντύπωση ότι τα δεδομένα ενός προβλήματος θα είναι πάντα διαθέσιμα, έτοιμα προς επεξεργασία. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Η συλλογή των δεδομένων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και βασικότερα βήματα στην ανάλυση ενός συστήματος και ιδιαίτερα στην προσομοίωσή του. Εκτός του ότι διάφοροι παράγοντες μπορεί να καθιστούν δύσκολη τη συλλογή στοιχείων, ακόμα και όταν κατορθωθεί το εγχείρημα αυτό, τα δεδομένα πρέπει να μετασχηματιστούν στην κατάλληλη μορφή ώστε να επικοινωνούν με το υπάρχον μοντέλο στο οποίο θα διοχετευτούν.

Τα δεδομένα εισόδου, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.1., είναι οι παρατηρήσεις σχετικά με τις βασικές διαδικασίες του συστήματος όπως χρόνοι μεταξύ αφίξεων, χρόνοι εξυπηρέτησης και επιλογές διαδρομών.

Τυπικά Δεδομένα Εισόδου	
1.	Χρόνοι δραστηριοτήτων
2.	Χρόνοι ανάμεσα σε αφίξεις
3.	Χαρακτηριστικά οντοτήτων
4.	Επιλογή διαδρομής (μετά από δραστηριότητες)

Πίνακας 7.1. Δεδομένα εισόδου που απασχολούν την προσομοίωση

Είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε στο σημείο αυτό ότι κατά τη συλλογή δεδομένων εισόδου δε μας ενδιαφέρει να συγκεντρώσουμε δεδομένα απόδοσης (δηλαδή εξόδου) του συστήματος. Τα δεδομένα απόδοσης είναι παρατηρήσεις ως προς χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως μέγιστη διάρκεια αναμονής σε ουρά, μέση ώρα παραμονής στο σύστημα, βαθμοί χρήσης πόρων, κτλ. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν ουσιαστικά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, την έξοδο δηλαδή του μοντέλου και όχι την είσοδο. Παρόλα αυτά, στην πράξη πολλές φορές οι αναλυτές συλλέγουν και τέτοια στοιχεία κατά την ανάλυση του συστήματος, όχι όμως για να τροφοδοτήσουν το μοντέλο με αυτά αλλά για να τα συγκρίνουν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και να επικυρώσουν την πιστότητα του μοντέλου. Θα συζητήσουμε το θέμα της επικύρωσης στο επόμενο κεφάλαιο.

Συλλογή δεδομένων εισόδου

Η πιο άμεση μέθοδος συλλογής δεδομένων εισόδου με δειγματοληψία είναι η επιτόπια παρατήρηση και συλλογή πραγματικών στοιχείων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, ο αναλυτής παρατηρεί επί τόπου το σύστημα. Αφού έχει αποφασίσει ποιες παράμετροι του συστήματος θα χρειαστούν στη μελέτη του, συλλέγει αρκετά δεδομένα ώστε να αποτελούν αξιόπιστο δείγμα του πραγματικού στατιστικού πληθυσμού. Το αδύναμο σημείο της πρακτικής αυτής είναι ότι συχνά απαιτεί τη διάθεση αρκετού χρόνου και πόρων. Ακόμα, σε κάποιες περιπτώσεις είναι αδύνατη η συλλογή στοιχείων από το πραγματικό σύστημα (π.χ. το σύστημα δεν υπάρχει ακόμα ή είναι αδύνατη η πρόσβαση σε αυτό).

Ένας εναλλακτικός τρόπος άντλησης δεδομένων εισόδου είναι η εκμετάλλευση υπαρχόντων στοιχείων του συστήματος. Ο τρόπος αυτός αφορά ιδιαίτερα την περίπτωση μελέτης οργανισμών γιατί αυτοί διατηρούν αρχεία όπου υπάρχουν αποθηκευμένα ιστορικά στοιχεία των διάφορων λειτουργιών τους. Δυστυχώς όμως, οι αναφορές και τα στατιστικά αυτά αποδεικνύονται συνήθως άχρηστα για την προσομοίωση είτε γιατί αφορούν κυρίως παραμέτρους απόδοσης του συστήματος και όχι παραμέτρους εισόδου (άλλωστε, η απόδοση είναι αυτή που κυρίως ενδιαφέρει την επιχείρηση) είτε γιατί τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα στο βαθμό λεπτομέρειας που απαιτεί η προσομοίωση (για παράδειγμα, υπάρχουν μέσοι όροι αλλά δεν μπορούν να εξαχθούν στατιστικές κατανομές αναλυτικά για κάθε δραστηριότητα).

Στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η άμεση συλλογή δεδομένων εισόδου, ο αναλυτής μπορεί:

- Να συλλέξει δεδομένα από παρόμοια συστήματα. Η λύση αυτή ενδείκνυται στην περίπτωση που το υπό μελέτη σύστημα δεν υπάρχει ακόμα αλλά βρίσκεται στη φάση της κατασκευής. Προϋποθέτει ότι υπάρχουν παρόμοια συστήματα και η επιτυχία της εξαρτάται από το κατά πόσο οι παράμετροι του ενός ταιριάζουν με αυτές του άλλου. Για παράδειγμα, έστω ότι εξετάζουμε τη λειτουργία ενός συστήματος νοσοκομείου που πρόκειται να ιδρυθεί σε μια κωμόπολη. Για το συγκεκριμένο σύστημα προφανώς δεν υπάρχουν ακόμα στοιχεία. Θα μπορούσαμε, όμως, να μελετήσουμε ένα νοσοκομείο που ήδη λειτουργεί σε μια περιοχή με τον ίδιο περίπου πληθυσμό και διαθέτει δυναμικότητα παρόμοια με αυτή που θα διαθέτει το νέο νοσοκομείο. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσαμε να αντλήσουμε αρκετά αξιόπιστα στοιχεία εισόδου όπως π.χ. χρόνοι μεταξύ αφίξεων ασθενών.
- Να κάνει υποθέσεις και να δώσει υποθετικές τιμές στις εισόδους. Στην περίπτωση αυτή, που είναι αρκετά συνηθισμένη, ο αναλυτής πρέπει να αντιμετωπίσει τα δεδομένα αυτά με επιφύλαξη και να αυξήσει την αξιοπιστία των υποθέσεων του μέσω ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας στοχεύει στη μελέτη των αλλαγών που συνεπάγεται μια ενδεχόμενη μεταβολή κάθε ενός από τα στοιχεία για τα οποία έχουν γίνει υποθέσεις αντί για άμεση συλλογή και θα τη συζητήσουμε στο Κεφάλαιο 8.

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να τονιστεί ότι η πρακτική της αντικατάστασης της συλλογής δεδομένων με υποθέσεις πρέπει να έχει περιορισμένη εφαρμογή. Σε περιπτώσεις που δεν μπορούν να συλλεχθούν αξιόπιστα δεδομένα για την πλειοψηφία των παραμέτρων ενός μοντέλου, τότε μπορεί η προσομοίωσή του να μην είναι η κατάλληλη προσέγγιση μελέτης.

Σε κάθε περίπτωση, με όποιον τρόπο και αν πραγματοποιείται η συλλογή των δεδομένων, πρέπει να ελέγχεται η ποιότητά τους. Καταρχάς, πρέπει να επιβεβαιώνουμε αν τα δεδομένα που συλλέξαμε όντως αντιστοιχούν στις εισόδους για τις οποίες τα προορίζουμε. Για παράδειγμα, στη μελέτη ενός ιατρού, για τη διάρκεια εξυπηρέτησης ενός ασθενούς είναι σημαντικό να έχουμε ξεκαθαρίσει αν οι δεδομένοι χρόνοι μετρώνται από τη στιγμή που θα αρχίσει η εξέταση από το γιατρό ή αν εμπεριέχεται και η καταγραφή ιστορικού από τη γραμματέα του πριν την εξέταση. Επίσης, πρέπει να λαμβάνει κανείς υπόψη ότι σε κάποια στοιχεία μπορεί να υπάρχει επιτήδευση από τους εμπλεκόμενους ειδικά στην περίπτωση που έχουν να κάνουν με την απόδοσή τους και θα μπορούσαν να επηρεάσουν την εικόνα τους. Για παράδειγμα, σε ένα τεχνικό τμήμα οι δηλωμένοι χρόνοι αποπεράτωσης μιας βλάβης είναι πιθανό να μην αντιστοιχούν στην πραγματικότητα. Η ποιότητα των δεδομένων εισόδου, όπως προαναφέρθηκε, επηρεάζει άμεσα την ποιότητα και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Τυχαιότητα των δεδομένων εισόδου

Αφού έχει συλλέξει τα δεδομένα εισόδου, ένας αναλυτής πρέπει να τα επεξεργαστεί προκειμένου να τα χρησιμοποιήσει στο μοντέλο. Πρέπει να διευκρινίσουμε ότι τα δεδομένα εισόδου που συλλέγονται με τις παραπάνω μεθόδους, δεν αποτελούν παρά τυχαία δείγματα αφού είναι νούμερα που εξήχθησαν τυχαία από την παρατήρηση ενός φαινομένου κάποιες μόνο χρονικές στιγμές. Αυτό δεν είναι κατ' ανάγκη μειονέκτημα, αφού η τυχαιότητα είναι άλλωστε αναπόσπαστο κομμάτι της πραγματικότητας και αφού το σύστημά μας είναι πραγματικό και στοχαστικό δεν μπορούν οι παράμετροι του παρά να παίρνουν τυχαίες τιμές.

Τα πακέτα προσομοίωσης (όπως το 8ππμ18) στις εισόδους τους ζητούν από το χρήστη να εισάγει για κάθε παράμετρο μια κατανομή πιθανοτήτων από την

οποία θα παίρνει τιμές η αντίστοιχη είσοδος. Πώς μετατρέπονται όμως τα δεδομένα εισόδου από τυχαίους αριθμούς σε στατιστικές κατανομές;

Καταρχάς, πρέπει να γίνεται στατιστική ανάλυση του δείγματος για να προσδιοριστεί η φύση του στατιστικού πληθυσμού. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπολογίσουμε τη συχνότητα με την οποία εμφανίζονται οι διάφορες τιμές σε κάθε παράμετρο και να τη μεταφράσουμε σε πιθανότητα εμφάνισης της κάθε τιμής για κάθε χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, η παράμετρος «χρόνοι μεταξύ αφίξεων» αποτελεί μια τυχαία μεταβλητή και εμείς αναζητάμε τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας που ακολουθεί αυτή η τυχαία μεταβλητή. Στην ουσία η τυχαία μεταβλητή είναι μία συνάρτηση.

Για να παραχθούν τυχαία αποτελέσματα με συμπεριφορά παρόμοια με αυτήν των δεδομένων πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί το μοτίβο συμπεριφοράς των τελευταίων και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί το μοτίβο αυτό για παραγωγή των αντίστοιχων τυχαίων αποτελεσμάτων. Το μοτίβο αυτό καλείται συνάρτηση κατανομής πιθανότητας και απεικονίζει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή να πάρει μία τιμή. Επειδή κάθε σύστημα είναι ξεχωριστό και οι παράμετροι του ακολουθούν ιδιαίτερη κατανομή πιθανότητας, έχουν προταθεί γενικές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας για κάθε ένα από τα συχνά αυτά παρατηρούμενα τυχαία φαινόμενα. Οι πιο δημοφιλείς από αυτές τις συναρτήσεις που είναι γνωστές και ως θεωρητικές συναρτήσεις κατανομής είναι η ομοιόμορφη, η κανονική, η εκθετική, η διωνυμική και άλλες, για τις οποίες θα γίνει λόγος αναλυτικότερα παρακάτω.

Η ύπαρξη προκαθορισμένων συναρτησιακών σχέσεων σε μορφή συνάρτησης κατανομής πιθανότητας διευκολύνει ιδιαίτερα τη διαδικασία παραγωγής τυχαίων μεταβλητών οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών τυχαίων φαινομένων. Επιδιώκεται κάθε φορά να χρησιμοποιείται η συνάρτηση εκείνη που ταιριάζει καλύτερα με τα δεδομένα του πραγματικού συστήματος. Για την επιλογή της πιο κατάλληλης θεωρητικής συνάρτησης κατανομής χρησιμοποιείται η μέθοδος του στατιστικού ελέγχου καλής προσαρμογής (goodness-of-fit test).

7.2.2. Δειγματοληψία από συνεχείς κατανομές

Η δειγματοληψία για συνεχείς παραμέτρους μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τις συνεχείς κατανομές. Μερικές ενδεικτικές συνεχείς κατανομές που συναντώνται συχνά στα πλαίσια της προσομοίωσης είναι: η ομοιόμορφη κατανομή (Uniform), η εκθετική (Exponential) και η κανονική (Normal). Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι πολλές φορές στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται συνεχείς κατανομές ακόμα και για φαινόμενα όπου οι παράμετροι παίρνουν διακριτές τιμές, στρογγυλοποιώντας κάθε φορά το τυχαίο δείγμα που προκύπτει από τη δειγματοληψία στην κατανομή.

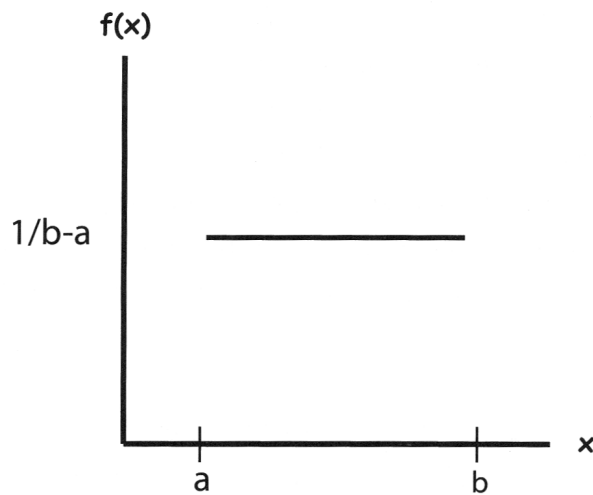
Ομοιόμορφη Κατανομή (Uniform Distribution)

Η ομοιόμορφη κατανομή συμβολίζεται με $U(a,b)$ και αποτελεί μια ιδιαίτερα χρήσιμη κατανομή όταν δε γνωρίζουμε πολλά στοιχεία για το υπό μελέτη σύστημα, παρά μόνο άνω και κάτω όρια τιμών. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου παρατηρούνται ισοπίθανες καταστάσεις μέσα σε ένα διάστημα τιμών. Στο παράδειγμα του μπαρ χρησιμοποιήσαμε την κατανομή $U(5,8)$ για την αναπαράσταση της κατανάλωσης των ποτών, που σημαίνει ότι κάθε ποτό καταναλώνεται ισοπίθανα μέσα σε 5 έως 8 λεπτά. Γενικά, η ομοιόμορφη κατανομή έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Πίνακα 7.2.

Ομοιόμορφη κατανομή	
Εύρος	$[a, b]$
Μέσος	$\frac{a + b}{2}$
Διακύμανση	$\frac{(b - a)^2}{12}$

Πίνακας 7.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη ομοιόμορφης κατανομής

Η συνάρτηση της ομοιόμορφης κατανομής φαίνεται στο Σχήμα 7.1.



$$\text{όπου } f(x) = \begin{cases} 1/b-a, & \text{εάν } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Σχήμα 7.1. Η γραφική παράσταση της ομοιόμορφης κατανομής.

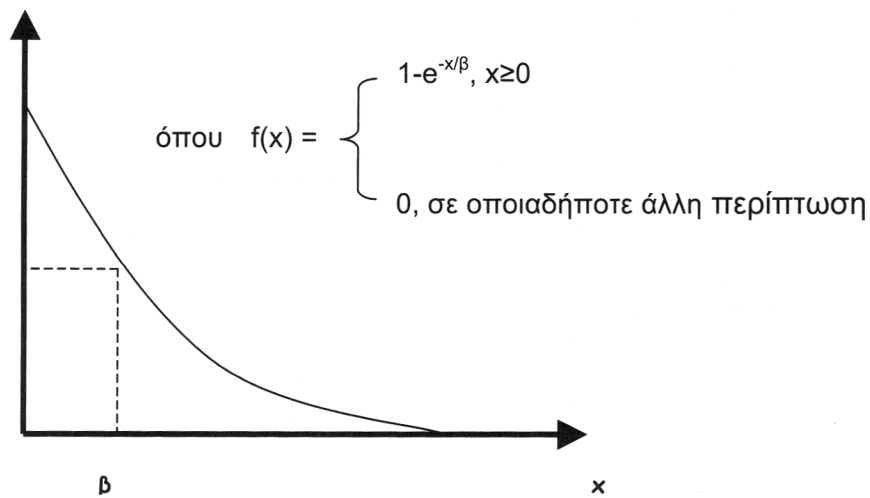
Εκθετική Κατανομή (Exponential Distribution)

Η εκθετική κατανομή συμβολίζεται ως $\text{Exp}(\beta)$. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μοντελοποίηση των χρόνων ανάμεσα στις διάφορες αφίξεις, καθώς αποδεικνύεται ότι αφίξεις που είναι ανεξάρτητες η μια από την άλλη και προέρχονται από άπειρο πληθυσμό ακολουθούν την κατανομή αυτή. Η εκθετική κατανομή έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Πίνακα 7.3.

Εκθετική κατανομή	
Εύρος	$[0, \infty)$
Μέσος	β
Διακύμανση	β^2

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη εκθετικής κατανομής

Η συνάρτηση της παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2. Η γραφική παράσταση της εκθετικής κατανομής

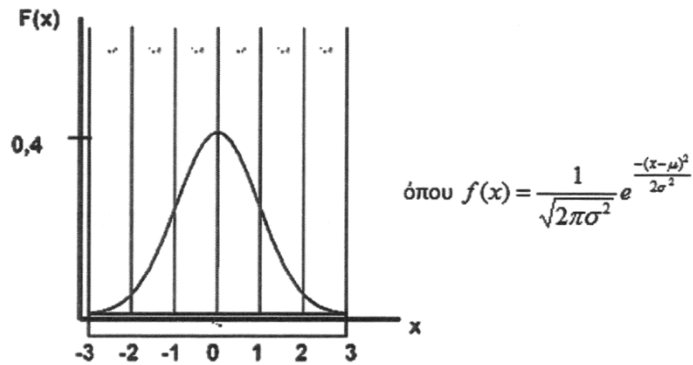
Κανονική Κατανομή (Normal Distribution)

Η κανονική κατανομή συμβολίζεται με $N(\mu, \sigma^2)$. Είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην προσομοίωση για τη μοντελοποίηση αθροισμάτων (δηλαδή σύνθετων δραστηριοτήτων), τη μοντελοποίηση λαθών (π.χ. περιθώριο λάθους γύρω από ένα μέσο), χρόνων εξυπηρέτησης, κ.ά. Η κανονική κατανομή έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Πίνακα 7.4.

Κανονική κατανομή	
Εύρος	$(-\infty, \infty)$
Μέσος	μ
Διακύμανση	σ^2

Πίνακας 7.4. Χαρακτηριστικά μεγέθη εκθετικής κατανομής

Η συνάρτηση της κανονικής κατανομής $N(0,1)$ φαίνεται στο Σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3: Η γραφική παράσταση της κανονικής κατανομής

7.2.3. Δειγματοληψία από διακριτές κατανομές

Οι διακριτές κατανομές χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τυχαία φαινόμενα στα οποία οι διάφορες παράμετροι μπορούν να εκφραστούν και έχουν νόημα μόνο για διακριτές τιμές.

Κατανομή Bernoulli

Έστω ένα πείραμα που αποτελείται από n δοκιμές και κάθε μία μπορεί να αποβεί επιτυχημένη ή αποτυχημένη. Εάν οι δοκιμές είναι ανεξάρτητες, κάθε δοκιμή έχει μόνο δύο πιθανά αποτελέσματα και η πιθανότητα επιτυχίας είναι η ίδια για όλες τις δοκιμές. Τότε μιλάμε για δοκιμές Bernoulli και την κατανομή Bernoulli. Η κατανομή αυτή συμβολίζεται ως Bernoulli(p) και χρησιμοποιείται γενικά για να παραστήσει φαινόμενα με 2 μόνο διακριτά ενδεχόμενα, όπως για παράδειγμα τα αποτελέσματα ρίψης νομίσματος που περιορίζονται σε κορώνα ή γράμματα, ή την κατάσταση μιας κομμώτριας που μπορεί να είναι είτε έμπειρη είτε άπειρη. Η κατανομή Bernoulli έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Πίνακα 7.5.

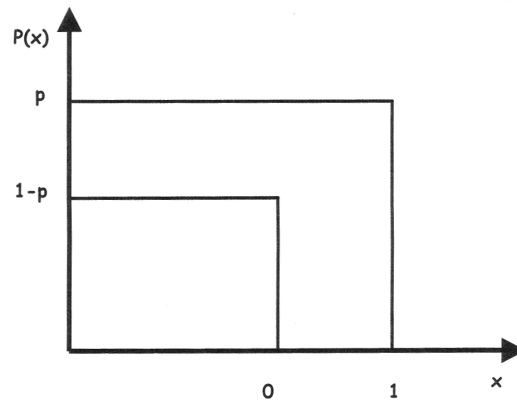
Κατανομή Bernoulli	
Εύρος	{0,1}
Μέσος	p
Διακύμανση	$p(1-p)$

Πίνακας 7.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη κατανομής Bernoulli

Η αντίστοιχη συνάρτηση δίνεται από τον τύπο:

$$P(x) = \begin{cases} p, & x=1 \\ 1-p, & x=0 \\ 0 & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

ενώ απεικονίζεται γραφικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4. Η γραφική παράσταση της κατανομής Bernoulli (p)

Διακριτή Ομοιόμορφη (Discrete Uniform)

Συμβολίζεται ως $DU(i,j)$ και χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει φαινόμενα με πάνω από δυο ισοπίθανα ενδεχόμενα, όπως για παράδειγμα τα αποτελέσματα από τη ρίψη ενός ζαριού όπου είναι το ίδιο πιθανό να έρθει κάθε αριθμός από $i=1$ έως $j=6$. Χρησιμοποιείται γενικότερα για να μοντελοποιήσει την πλήρη αβεβαιότητα, αφού όλα τα ενδεχόμενα έχουν την ίδια πιθανότητα να συμβούν και ειδικότερα στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα. Η διακριτή ομοιόμορφη κατανομή έχει τα χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στο Πίνακα 7.6.

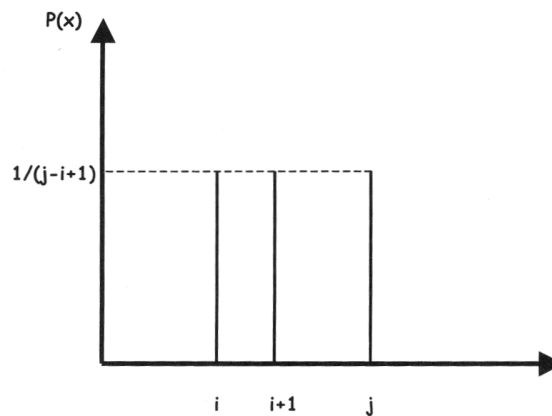
Διακριτή Ομοιόμορφη Κατανομή	
Εύρος	$\{i, i+1, \dots, j\}$
Μέσος	$\frac{(i+j)}{2}$
Διακύμανση	$\frac{[(j-i+1)^2 - 1]}{12}$

Πίνακας 7.6. Χαρακτηριστικά μεγέθη διακριτής ομοιόμορφης κατανομής

Η αντίστοιχη συνάρτηση δίνεται από τον τύπο:

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{j-i+1}, & i \leq x \leq j, \\ 0 & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

ενώ απεικονίζεται γραφικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-5.



Σχήμα 7.5. Η γραφική παράσταση της διακριτής ομοιόμορφης κατανομής $DU(i,j)$.

Διωνυμική Κατανομή (Binomial Distribution)

Συμβολίζεται ως $\text{bin}(t,p)$. Χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τον αριθμό των επιτυχιών σε t τεστ Bernoulli όπου η πιθανότητα επιτυχίας σε κάθε τεστ είναι p . Με άλλα λόγια μοντελοποιεί το πλήθος των επιτυχιών ανάμεσα σε t δοκιμές, υπό την προϋπόθεση ότι οι δοκιμές είναι ανεξάρτητες και έχουν κοινή πιθανότητα επιτυχίας ίση με p . Για παράδειγμα, ο αριθμός των ελαττωματικών λαμπτήρων σε μια παρτίδα 80 κομματιών ακολουθεί $\text{bin}(80, 0.01)$ αν η πιθανότητα κάθε λαμπτήρα να είναι ελαττωματικός είναι 1%. Η διωνυμική κατανομή έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Πίνακα 7.7.

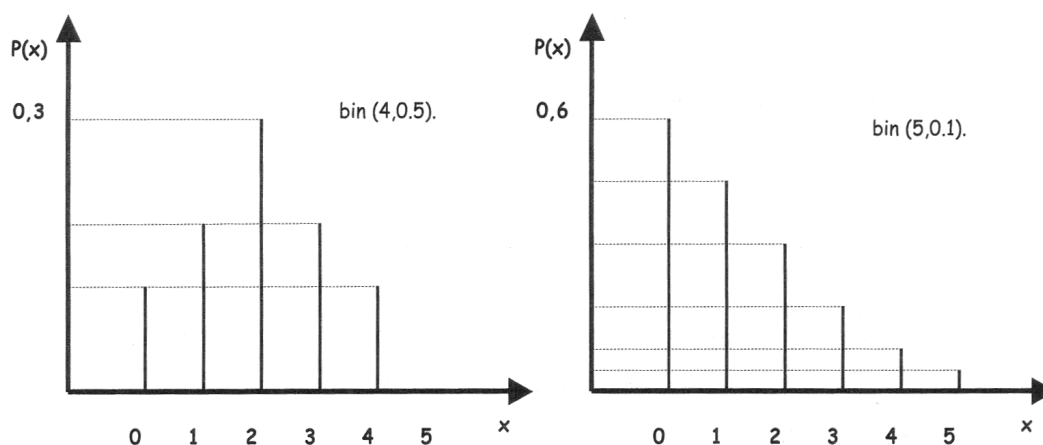
Διωνυμική Κατανομή	
Εύρος	$\{0,1,\dots,t\}$
Μέσος	tp
Διακύμανση	$tp(1-p)$

Πίνακας 7.7. Χαρακτηριστικά μεγέθη διωνυμικής κατανομής

Η αντίστοιχη συνάρτηση δίνεται από τον τύπο:

$$P(x) = \begin{cases} \binom{t}{x} p^x (1-p)^{t-x}, & x \in \{0,1,\dots,t\}, \text{ όπου } \binom{t}{x} = \frac{t!}{x!(t-x)!}, \\ 0 & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

ενώ απεικονίζεται γραφικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6. (τα γραφήματα μπορεί να έχουν διαφορετική μορφή ανάλογα με τις παραμέτρους):



Σχήμα 7.6. Η γραφική παράσταση δυο διωνυμικών κατανομών

Κατανομή Poisson

Συμβολίζεται ως Poisson(λ) και χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει το πλήθος των ανεξάρτητων γεγονότων που συμβαίνουν σε συγκεκριμένο χρονικό ή τοπικό διάστημα. Για παράδειγμα μοντελοποιεί το ρυθμό αφίξεων πελατών σε ένα κατάστημα (δηλαδή τον αριθμό των πελατών που έρχονται στη μονάδα του χρόνου) ή τον αριθμό φωτονίων σε τυχαία δέσμη φωτός. Η κατανομή αυτή είναι

αντίστροφη της εκθετικής: όταν ο αριθμός αφίξεων στη μονάδα του χρόνου ακολουθεί κατανομή Poisson (λ), τότε οι χρόνοι ανάμεσα στις αφίξεις ακολουθούν εκθετική κατανομή $Exp(1/\lambda)$. Η κατανομή Poisson έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Πίνακα 7.8.

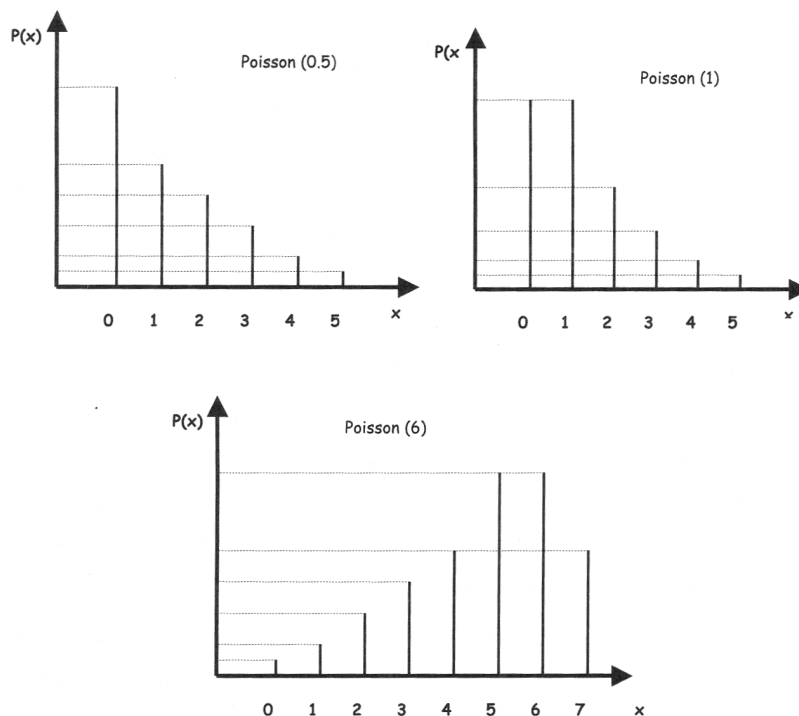
Κατανομή Poisson	
Εύρος	$\{0, 1, \dots\}$
Μέσος	λ
Διακύμανση	λ

Πίνακας 7.8. Χαρακτηριστικά μεγέθη της κατανομής Poisson

Η αντίστοιχη συνάρτηση δίνεται από τον τύπο:

$$P(x) = \begin{cases} \left(\frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \right), & x \in \{0, 1, \dots\}, \\ 0 & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

ενώ απεικονίζεται γραφικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7. (τα γραφήματα μπορεί να έχουν διαφορετική μορφή ανάλογα με τις παραμέτρους):



Σχήμα 7.7. Η γραφική παράσταση τριών κατανομών Poisson

7.3. Ανάλυση Εξόδου Προσομοίωσης

7.3.1. Δεδομένα εξόδου

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο όρος «δεδομένα εξόδου» της προσομοίωσης. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, προκειμένου να εκτελέσουμε το μοντέλο εισάγουμε δεδομένα που προκύπτουν από δειγματοληψία και αφορούν στις δραστηριότητες του συστήματος. Κατά το τρέξιμο του μοντέλου, αυτό καλείται να αντιμετωπίσει τα δεδομένα αυτά και να συμπεριφερθεί όπως έχουμε ορίσει σύμφωνα με το πραγματικό σύστημα. Τα αποτελέσματα που θα συλλεχθούν από το λογισμικό έχουν να κάνουν με τα στοιχεία απόδοσης του συστήματος και καθορίζονται από το σκοπό της προσομοίωσης, άρα κυρίως από τον πελάτη για τον οποίο πραγματοποιείται αυτή. Τιμές που συνήθως μετρώνται είναι: ο μέσος χρόνος αναμονής σε κάθε ουρά, ο μέσος χρόνος παραμονής προσωρινών οντοτήτων στο σύστημα, ο βαθμός χρησιμοποίησης κάποιου πόρου, το μέσο κόστος από τη χρήση κάθε πόρου, ο συνολικός αριθμός πελατών που εξυπηρετήθηκαν, τα ποσοστά αποτυχιών του συστήματος να εξυπηρετήσει, και άλλα. Ενώ τα δεδομένα εισόδου περιγράφουν κυρίως τις δραστηριότητες του συστήματος, τα δεδομένα εξόδου περιγράφουν κυρίως τη συμπεριφορά των ουρών και των οντοτήτων (πόρων και πελατών).

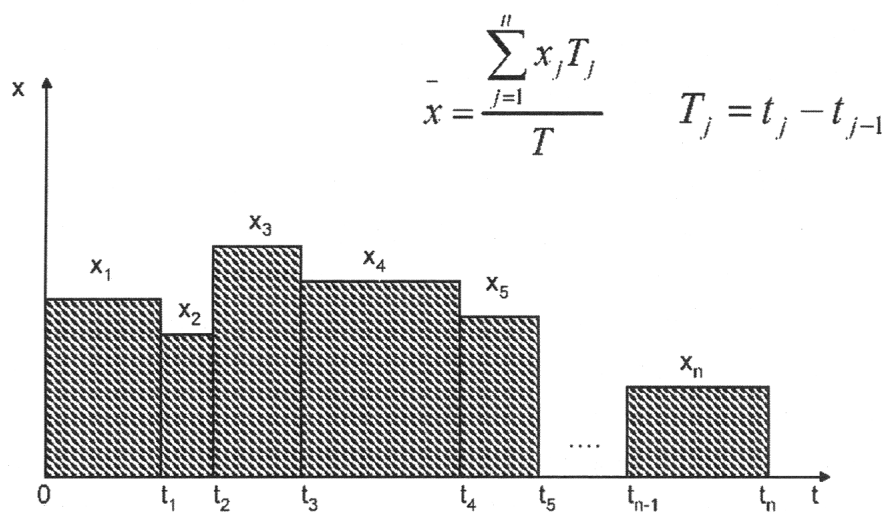
Είναι σημαντικό να παρουσιαστεί ο τρόπος που συλλέγεται και μετράται κάθε τιμή. Έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε την τιμή του μέσου χρόνου παραμονής στο σύστημα π.χ. των πελατισσών στο κομμωτήριο. Για κάθε πελάτισσα έχουμε κάποιο χρόνο άφιξης στο κομμωτήριο, σκοπό επίσκεψης και διάρκεια εξυπηρέτησης σε κάθε δραστηριότητα από την οποία θα περάσει. Έστω ότι μια συγκεκριμένη πελάτισσα Α εισέρχεται στο σύστημα στις 15:00, έχει σκοπό να κάνει βαφή και χτένισμα, η βαφή θα διαρκέσει 60 λεπτά ενώ το χτένισμα 20 λεπτά και η πληρωμή στο ταμείο 5 λεπτά (είτε οι χρόνοι αυτοί είναι σταθεροί είτε προκύπτουν ως τυχαία δείγματα από κατανομές). Αυτό που δεν ξέρουμε για να υπολογίσουμε το μέσο συνολικό χρόνο παραμονής στο κομμωτήριο είναι πόση ώρα θα περιμένει στην ουρά της βαφής, του χτενίσματος και του ταμείου. Είναι στοιχεία που θα τα παράσχει το μοντέλο καθώς θα εκτελείται.

Όταν τελικά θα φτάσει η σειρά της πελάτισσας να εξυπηρετηθεί σε κάθε σημείο, το σύστημα θα συλλέξει την πληροφορία και θα υπολογίσει τη διάρκεια αναμονής σε

κάθε περίπτωση. Έτσι, όταν φτάσει η στιγμή που θα αποχωρήσει η πελάτισσα από το κομμωτήριο, θα έχει καταγραφεί η διάρκεια αναμονής στη βαφή (έστω 10 λεπτά), στο χτένισμα (έστω 15 λεπτά), στο ταμείο (έστω 2 λεπτά), καθώς και ο συνολικός χρόνος παραμονής της στο σύστημα (ο οποίος θα είναι $10+60+15+20+2+5=112$ λεπτά). Το ίδιο συμβαίνει για όλες τις πελάτισσες, οπότε μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες μέσες τιμές για διάφορες χρονικές περιόδους (π.χ. για δύο μέρες λειτουργίας του κομμωτηρίου).

Μπορούμε να διακρίνουμε τα δεδομένα εξόδου που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε:

- Δεδομένα ανεξάρτητα από το χρόνο: Αφορούν συγκεκριμένες μεταβλητές του συστήματος για τις οποίες ενδιαφέρεται ο αναλυτής και οι οποίες δεν επηρεάζονται από το χρόνο (συνήθως μέγιστα ή ελάχιστα μεταβλητών).
- Δεδομένα εξαρτημένα από το χρόνο: Αφορούν μεταβλητές που η τιμή τους μεταβάλλεται συνεχώς στο χρόνο, δηλαδή τα συνήθη βασικά δεδομένα στατιστικής ανάλυσης (όπως μέσες τιμές μεταβλητών οι οποίες αλλάζουν με την κίνηση των οντοτήτων). Για παράδειγμα, η μέση τιμή μιας παρατηρούμενης ποσότητας x στο χρονικό διάστημα 0 έως t , δίνεται από το σταθμισμένο μέσο όρο των επιμέρους τιμών που πήρε το x κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του μοντέλου επί τον χρόνο για τον οποίο είχε κάθε επιμέρους τιμή, όπως δείχνει το Σχήμα 7.8.



Σχήμα 7.8. Χρονικό διάγραμμα μεταβολών μιας παρατηρούμενης ποσότητας

7.3.2. Στάδιο κατά την εκτέλεση του μοντέλου

Καθώς θα «τρέχει» το μοντέλο, θα περάσει από κάποιες διάφορες περιόδους έως ότου φτάσει στο σημείο που θα αντιπροσωπεύει τη συνήθη του κατάσταση. Ένα σημείο απόφασης κατά την εκτέλεση του μοντέλου είναι το αν το σύστημα που θέλουμε να παρατηρήσουμε φτάνει σε σταθερή κατάσταση ή όχι. Η διάρκεια και η αλληλουχία των μεταβατικών αυτών φάσεων εξαρτάται από τις υποθέσεις που έχουμε κάνει για την αρχική κατάσταση του συστήματος και άρα από τις αρχικές τιμές που έχουμε δώσει στα χαρακτηριστικά των οντοτήτων.

Αρχική / σταθερή κατάσταση και μεταβατική φάση

Λέγοντας αρχική κατάσταση του συστήματος, εννοούμε την κατάσταση που δημιουργείται από τις αρχικές συνθήκες. Είναι δηλαδή η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα όταν αρχίζει η διαδικασία της προσομοίωσης. Είναι στη δικαιοδοσία του αναλυτή να καθορίσει και να μεταβάλλει την αρχική κατάσταση του συστήματος αλλάζοντας ανάλογα τις παραμέτρους των οντοτήτων του στην εκκίνηση της προσομοίωσης.

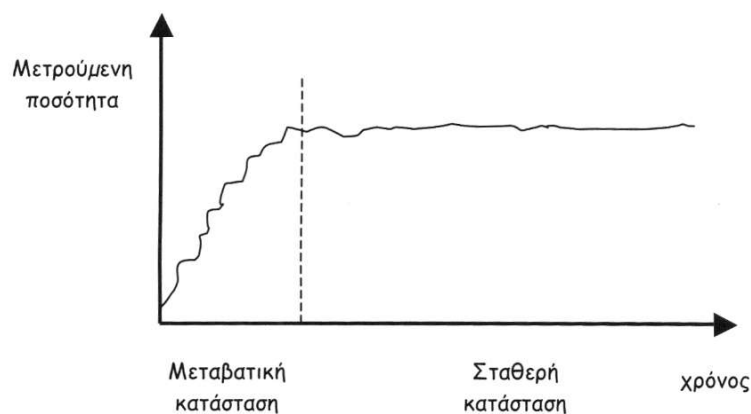
Για παράδειγμα, μπορούμε να αναπτύξουμε δυο σενάρια σχετικά με την αρχική κατάσταση μιας τράπεζας. Στο πρώτο, κατά το άνοιγμα του καταστήματος, δεν υπάρχει κανένας πελάτης στο σύστημα, οπότε, όλοι οι υπάλληλοι είναι ανενεργοί έως ότου αρχίσουν να μαζεύονται πελάτες. Στο δεύτερο σενάριο, πριν ακόμα αρχίσει να λειτουργεί η τράπεζα, έχουν ήδη μαζευτεί πελάτες έξω από την είσοδο περιμένοντας να αρχίσουν να εξυπηρετούνται, οπότε το σύστημα αρχίζει τη λειτουργία του με μια ήδη σχηματισμένη ουρά προς εξυπηρέτηση.

Συνήθως το σύστημα φτάνει σε σταθερή κατάσταση κάποια στιγμή και μένει σε αυτή για το διάστημα που απομένει μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Ένας τρόπος να διακρίνουμε μια τέτοια κατάσταση είναι το γεγονός ότι στην κατάσταση αυτή οι διαδοχικές παρατηρήσεις της απόδοσης του συστήματος δε διαχωρίζονται στατιστικά (δηλαδή ένας κινητός μέσος όρος της ποσότητας που μας ενδιαφέρει δε μεταβάλλεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου).

Μέχρι όμως να φτάσει το σύστημα σε σταθερή κατάσταση θα χρειαστεί να περάσει από διάφορες ενδιάμεσες καταστάσεις, το σύνολο των οποίων ονομάζεται μεταβατική φάση. Μεταβατική φάση με άλλα λόγια αποκαλείται η περίοδος της

προσομοίωσης μέχρι το σύστημα να φτάσει σε σταθερή κατάσταση (Σχήμα 7.9). Οι αρχικές συνθήκες επηρεάζουν τη μεταβατική φάση και το πότε το σύστημα θα φτάσει σε σταθερή κατάσταση.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να εισάγουμε και την έννοια του warm up time ή αλλιώς περίοδο προσαρμογής του συστήματος. Το warm up time δεν είναι τίποτα άλλο παρά η χρονική περίοδος κατά την οποία η προσομοίωση τρέχει χωρίς να συλλέγονται δεδομένα εξόδου μέχρις ότου το σύστημα φτάσει σε σταθερή κατάσταση.



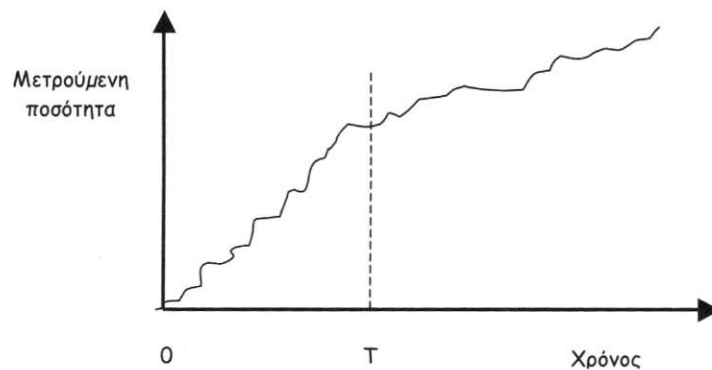
Σχήμα 7.9. Η συμπεριφορά της τιμής μιας παραμέτρου κατά τη μεταβατική φάση και τη σταθερή κατάσταση

Συνήθως, ενδιαφέρει η ανάλυση των αποτελεσμάτων όταν το σύστημα έχει φτάσει στη συνήθη κατάσταση λειτουργίας του. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να εξαλείψουμε την επίδραση των αρχικών συνθηκών. Οι τρεις δημοφιλέστεροι μέθοδοι εξάλειψης των αρχικών συνθηκών παρουσιάζονται ενδεικτικά παρακάτω:

- Η προσομοίωση τρέχει για πολύ μεγάλη χρονική περίοδο έτσι ώστε τα δείγματα από τη μεταβατική φάση να είναι πολύ λίγα σε σχέση με αυτά της σταθερής κατάστασης.
- Από τις μετρήσεις αποκλείονται μερικά ή όλα τα δείγματα της μεταβατικής φάσης.
- Η εκτέλεση της προσομοίωσης ξεκινά με αρχικές συνθήκες που είναι πλησιέστερες στη σταθερή κατάσταση του συστήματος ώστε να ελαχιστοποιείται το μήκος της μεταβατικής φάσης.

Η αρχική κατάσταση του συστήματος έχει σημαντική επίπτωση στη διάρκεια της μεταβατικής κατάστασης καθώς και στη διάρκεια του warm up time. Πρέπει να σημειωθεί ότι, εάν προσομοιώνουμε ένα σύστημα καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του και εάν έχουμε εισάγει ως δεδομένα εισόδου πραγματικά στοιχεία που έχουν συλλεχθεί για όλες τις ώρες, τότε δε χρειάζεται να υπολογίσουμε warm up time. Στην περίπτωση όμως που θέλουμε να προσομοιώσουμε ένα σύστημα μόνον για συγκεκριμένες ώρες (για παράδειγμα ώρες αιχμής), τότε πρέπει να έχουμε στο νου μας ότι το μοντέλο από την αρχή της εκτέλεσής του πρέπει να είναι «φορτωμένο» δηλαδή ξεκινά με ήδη σχηματισμένες ουρές και απασχολημένους υπαλλήλους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δε φτάνουν όλα τα συστήματα και όλες οι παράμετροι σε σταθερή κατάσταση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.10. Η συμπεριφορά της τιμής μιας παραμέτρου σε σύστημα που δε φτάνει σε σταθερή κατάσταση

7.3.3. Πειραματισμός

Ανάλυση αποτελεσμάτων

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δημιουργήσει ένα αξιόπιστο μοντέλο του υπάρχοντος συστήματος «κομμωτήριο» και θέλουμε να εξαγάγουμε κάποια συμπεράσματα για το πώς λειτουργεί. Αρχικά, εκτελούμε το μοντέλο μια φορά και μέσω του λογισμικού που χρησιμοποιούμε λαμβάνουμε κάποιες αναφορές με στοιχεία απόδοσης για τη συγκεκριμένη εκτέλεση. Η υιοθέτηση των αποτελεσμάτων αυτών ως αντιπροσωπευτικά του συστήματος θα ήταν μια βιαστική και επιπόλαιη κίνηση. Καθώς τα αποτελέσματα είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο τρέξιμο, και γνωρίζοντας ότι τα δεδομένα εισόδου σε ένα μόνο τρέξιμο της

προσομοίωσης, δεν αποτελούν παρά τυχαία δείγματα των πραγματικών στοχαστικών μεταβλητών, δεν μπορούμε παρά να συμπεράνουμε ότι και τα αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης αποτελούν κι αυτά τυχαία δείγματα.

Αν για παράδειγμα οι χρόνοι άφιξης των πελατισσών ή η διάρκεια του χτενίσματος ήταν λίγο διαφορετικά (αν δηλαδή χρησιμοποιούσαμε μια διαφορετική ακολουθία τυχαίων αριθμών), τότε και τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά. Επομένως, πρέπει να επαναλάβουμε την εκτέλεση μιας προσομοίωσης πολλές φορές χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετική ακολουθία τυχαίων αριθμών ώστε να εξασφαλίσουμε ότι ο μέσος όρος για κάθε παράμετρο που παρατηρούμε θα είναι απαλλαγμένος από την επίδραση της τυχειότητας των δεδομένων εισόδου. Όσο περισσότερες εκτελέσεις πραγματοποιήσουμε τόσο λιγότερο θα εμπλέκεται ο παράγοντας αυτός στο τελικό αποτέλεσμα.

Ας το δούμε αυτό με ένα απλό παράδειγμα. Τρέχουμε το μοντέλο προσομοίωσης μιας απλής τράπεζας μια φορά, έστω για χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας, και η προσομοίωση μας δίνει ως αποτέλεσμα ότι ο μέσος χρόνος αναμονής των πελατών στην ουρά εξυπηρέτησης είναι 12,3 λεπτά. Πόσο νομιμοποιούμε να θεωρήσουμε το αποτέλεσμα αυτό ως τον πραγματικό μέσο χρόνο αναμονής; Η απάντηση είναι καθόλου. Ένας λόγος είναι αυτός που αναφέραμε πριν, δηλαδή η τυχειότητα των δεδομένων εισόδου στο συγκεκριμένο τρέξιμο του μοντέλου (αν τρέξουμε ξανά την προσομοίωση θα πάρουμε άλλο νούμερο, π.χ. 14,6 λεπτά).

Αν λοιπόν εκτελέσουμε το μοντέλο πολλές φορές (έστω 100 ή 1.000) και πάρουμε το μέσο όρο των μέσων χρόνων αναμονής σε κάθε τρέξιμο (έστω 13,9 λεπτά), πόσο νομιμοποιούμε να θεωρήσουμε το αποτέλεσμα αυτό ως τον πραγματικό μέσο χρόνο αναμονής; Δυστυχώς η απάντηση είναι και πάλι καθόλου, κι αυτό γιατί η πραγματική μεταβλητή «μέσος χρόνος αναμονής» είναι στοχαστική μεταβλητή και επομένως δεν ορίζεται με ένα μόνο νούμερο. Στην πραγματικότητα δηλαδή, στην τράπεζα δε δημιουργούνται ουρές με μέσο χρόνο αναμονής 12,3 ή 13,9 λεπτά αλλά ουρές με μέσο χρόνο αναμονής της μορφής $13,9 \pm 1,4$ λεπτά στο 95% (ή 99%) των περιπτώσεων. Με άλλα λόγια, τα περισσότερα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης είναι στοχαστικές μεταβλητές

και πρέπει να εκφράζονται σαν διαστήματα τιμών που ισχύουν με κάποιο διάστημα εμπιστοσύνης. Για να πάρουμε τέτοια αποτελέσματα πρέπει να τρέξουμε την προσομοίωση πολλές φορές με διαφορετικές γεννήτριες τυχαίων αριθμών στην είσοδο και για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάθε φορά. Έπειτα εκτιμούμε τα διαστήματα τιμών των δεδομένων εξόδου, όπως φαίνεται στην επόμενη ενότητα.

Εκτίμηση δεδομένων εξόδου

Όπως είπαμε και νωρίτερα, προκειμένου να εκτιμήσουμε σωστά τις στοχαστικές τιμές των παραμέτρων εξόδου, τρέχουμε την προσομοίωση για μεγάλη χρονική διάρκεια (για να εξαλείψουμε και την επίδραση των αρχικών συνθηκών) και πολλές φορές, κάθε φορά όμως με διαφορετική σειρά τυχαίων αριθμών.

Μετρούμενη Ποσότητα	Τύποι
Μέσος όρος παρατηρήσεων της κάθε επανάληψης i σε σταθερή κατάσταση	$R_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m}$
Μέσος όρος των μέσων μετρούμενων ποσοτήτων R_i για τις k εκτελέσεις σε σταθερή κατάσταση	$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k}$
Η διακύμανση της παραπάνω μετρούμενης ποσότητας	$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (R_i - \bar{R})^2}{k-1}$
Εύρος τιμών της πραγματικής μετρούμενης ποσότητας (με εμπιστοσύνη γ)	$\left[\bar{R} - \frac{\sigma}{\sqrt{k}} t_{\frac{\gamma}{2}, k-1}, \bar{R} + \frac{\sigma}{\sqrt{k}} t_{\frac{\gamma}{2}, k-1} \right]$

Πίνακας 7.9. Εκτίμηση της μέσης τιμής στοχαστικής μεταβλητής σε πολλές εκτελέσεις της προσομοίωσης

Όπου, n = ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων,

k = ο αριθμός των ανεξάρτητων εκτελέσεων της προσομοίωσης, άρα $k-1$ οι βαθμοί ελευθερίας,

m = ο αριθμός των παρατηρήσεων σε σταθερή κατάσταση,

m_0 = ο αριθμός των παρατηρήσεων σε μεταβατική φάση,

χ_{ij} = η παρατήρηση της i επανάληψης σε σταθερή κατάσταση,

γ = διάστημα εμπιστοσύνης (συνήθως 95% ή 99%)

R_i = ο μέσος όρος των παρατηρήσεων της i επανάληψης σε σταθερή κατάσταση

Έστω για παράδειγμα ότι θέλουμε να παρατηρήσουμε το μήκος της ουράς μπροστά στο μπαρ. Εκτελούμε το μοντέλο για μια μεγάλη διάρκεια χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη ακολουθία τυχαίων αριθμών στις εισόδους (χρόνος άφιξης πελατών, διάρκεια σερβιρίσματος, κτλ). Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης, το μήκος της ουράς παίρνει διαφορετικές διαδοχικές τιμές (χ_{ij}). Στο τέλος της εκτέλεσης υπολογίζουμε τη μέση τιμή των τιμών αυτών (R_i).

Ο μέσος αυτός αποτελεί ένα δείγμα μόνο της παρατηρούμενης ποσότητας που αντιστοιχεί σε μία εκτέλεση. Για να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ποσότητας που παρατηρούμε, είναι απαραίτητο να εκτελέσουμε το μοντέλο περισσότερο από μία φορές (έστω k) και να συγκεντρώσουμε αρκετό πλήθος δειγμάτων. Τελικά υπολογίζουμε το μέσο των δειγμάτων αυτών και βρίσκουμε το μέσο που αναπαριστά πιστότερα την παράμετρο, καθώς και το διάστημα τιμών του με δεδομένο διάστημα εμπιστοσύνης (συνήθως 95%, 99% ή 99,9% ανάλογα με το σύστημα).

Ουσιαστικά πραγματοποιούμε δειγματοληψία για τα αποτελέσματα όπως και για τα δεδομένα εισόδου. Όσο περισσότερα δείγματα έχουμε, τόσο περισσότερο προσεγγίζουμε τη σταθερή κατάσταση του συστήματος και είμαστε περισσότερο σίγουροι για την αξιοπιστία τους αφού είναι απαλλαγμένα από την τυχαιότητα των δεδομένων εισόδου καθώς και από την υπερβολική διακύμανση.

Σενάρια πειραματισμού

Σε επόμενη φάση, αφού καταφέρουμε να αναλύσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος όπως αυτό λειτουργεί στην πραγματικότητα, σειρά έχει ο πειραματισμός και η αλλαγή της δομής του συστήματος με ανάλογη παραμετροποίηση του μοντέλου ώστε να συγκρίνουμε τις συμπεριφορές κάθε

εκδοχής του μοντέλου και να επιλέξουμε ποια θα ήταν πιο επιθυμητή και για το πραγματικό σύστημα, ώστε να δράσουμε ανάλογα. Είναι σημαντικό να συγκρίνουμε τα μοντέλα μεταξύ τους, αλλάζοντας κάθε φορά μόνο ένα στοιχείο και διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.

Έστω για παράδειγμα ότι θέλουμε να παρατηρήσουμε τη λειτουργία του κομμωτηρίου με την εισαγωγή μιας δεύτερης κομμώτριας εξειδικευμένης στη βαφή. Θα πρέπει στο υπάρχον μοντέλο να αλλάξουμε τα δεδομένα του αντίστοιχου πόρου και να το εκτελέσουμε χρησιμοποιώντας τις ίδιες σειρές τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιήσαμε και στις εκτελέσεις του αρχικού μοντέλου, ώστε η διαφορά των αποτελεσμάτων να οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην αλλαγή του συγκεκριμένου πόρου. Για να εξασφαλίσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων κάθε εκδοχής του μοντέλου πραγματοποιούμε για κάθε μία πολλαπλές εκτελέσεις όπως στην πρώτη φάση.

Ανάλυση Ευαισθησίας

Πολλές φορές αναγκαζόμαστε να κάνουμε υποθέσεις σε ότι αφορά τα δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης (για παράδειγμα, σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η άμεση συλλογή). Υποθέσεις μπορούν ακόμα να γίνουν και σε ότι αφορά τον πειραματισμό, καθώς και εκεί στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορούμε να έχουμε πραγματικά δεδομένα, καθώς το υπό μελέτη σενάριο δεν έχει ακόμα υλοποιηθεί. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να δούμε πως η αυτοματοποίηση μιας δραστηριότητας (αντικατάσταση ενός χειρωνακτικού με υπολογιστικό τρόπο επεξεργασίας) θα βελτιώνει τη λειτουργία του συνολικού συστήματος, θα έπρεπε να τρέξουμε ένα σενάριο πειραματισμού στην προσομοίωση μας, στο οποίο η συγκεκριμένη δραστηριότητα θα διαρκούσε λιγότερο, ώστε να δούμε τι επιπτώσεις θα είχε αυτό στο σύνολο του συστήματος. Το ερώτημα όμως που προκύπτει είναι: πόσο λιγότερο θα λειτουργεί η νέα διαδικασία σε σχέση με την παλιά; Δυστυχώς δεν μπορούμε να έχουμε ακριβή απάντηση στο ερώτημα αυτό, αφού ακόμα δεν έχουμε υλοποιήσει τη νέα διαδικασία (μάλιστα, κάνουμε την προσομοίωση ακριβώς για να δούμε αν πρέπει να την υλοποιήσουμε). Έτσι, θα αναγκαστούμε να κάνουμε υποθέσεις και εκτιμήσεις σχετικά με το νέο χρονικό διάστημα.

Είτε κάνουμε υποθέσεις σχετικά με δεδομένα εισόδου είτε σχετικά με σενάρια πειραματισμού, σε κάθε περίπτωση δεν μπορούμε να είμαστε απολύτως σίγουροι για την ορθότητα των υποθέσεων αυτών. Επειδή, όπως έχουμε ήδη πει, η αξιοπιστία των συμπερασμάτων της προσομοίωσης είναι σε άμεση συνάρτηση με την αξιοπιστία των δεδομένων του μοντέλου, πρέπει να κάνουμε κάτι ώστε να αυξήσουμε την αξιοπιστία της ανάλυσής μας στην περίπτωση που έχουμε καταφύγει στη δημιουργία υποθέσεων.

Η ανάλυση ευαισθησίας έρχεται να βοηθήσει σε αυτή την περίπτωση. Η ανάλυση ευαισθησίας ενός μοντέλου απαντά στο ερώτημα: «πόσο ευαίσθητο είναι το μοντέλο στην τιμή μιας συγκεκριμένης παραμέτρου;». Το ερώτημα αυτό έχει μεγάλη σημασία σε πολύπλοκα συστήματα, καθώς η συμπεριφορά τους δεν είναι γραμμική και έτσι δεν μπορούμε να προβλέψουμε τι επιπτώσεις θα έχει στο σύστημα μια αλλαγή σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του.

Ας το δούμε αυτό με ένα παράδειγμα: έστω ότι στην προσομοίωση μιας τράπεζας, όπου πελάτες έρχονται με ρυθμό που ακολουθεί την εκθετική κατανομή με μέσο τα 10 λεπτά, η προσομοίωση μας δείχνει ότι θα δημιουργηθούν ουρές της τάξης των 20 ± 2 πελατών κατά μέσο όρο στο 95% των περιπτώσεων. Τι πιστεύετε ότι θα συμβεί αν ο ρυθμός εισόδου των πελατών αλλάξει και είναι εκθετικά κατανεμημένος με μέσο τα 9 λεπτά (μείωση 10%); Θα αλλάξει και το μέσο μήκος ουρών κατά 10%, δηλαδή θα γίνει $22 \pm 2,2$ λεπτά, θα μεταβληθεί λιγότερο, περισσότερο ή μήπως καθόλου; Τι θα συμβεί αν ο ρυθμός εισόδου έχει όντως μέσο τα 10 λεπτά αλλά η κατανομή δεν είναι εκθετική αλλά, για παράδειγμα, κανονική;

Η απάντηση είναι δύσκολο να δοθεί, αν και οι πιθανότητες είναι ότι μια κατά 10% (για παράδειγμα) αύξηση του ρυθμού εισόδου πελατών δε θα οδηγήσει σε μια γραμμική, επίσης κατά 10%, αύξηση του μέσου μήκους ουρών. Αν οδηγήσει σε μεγαλύτερες αυξήσεις (για παράδειγμα, 20%), τότε λέμε ότι το μοντέλο είναι ευαίσθητο στην τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου εισόδου (δηλαδή, του ρυθμού αφίξεων). Αν οδηγήσει σε μικρότερες αυξήσεις (για παράδειγμα, 5%), τότε λέμε ότι το μοντέλο δεν είναι ευαίσθητο στην τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου.

Έτσι, στην απλούστερη μορφή της, η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται αλλάζοντας την τιμή των παραμέτρων εισόδου (ή πειραματισμού) για τις οποίες έχουν γίνει υποθέσεις (και επομένως υπάρχει αυξημένη πιθανότητα να υπάρχουν λάθη στις τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί) και παρατηρώντας τις επιπτώσεις των αλλαγών στα συνολικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αν το μοντέλο είναι ευαίσθητο σε μια τέτοια παράμετρο, τότε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πρέπει να αντιμετωπιστούν με προσοχή. Αντίθετα, αν το μοντέλο δεν είναι ευαίσθητο, τότε μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αφού, ακόμα κι αν έχουμε κάνει λάθος στις υποθέσεις μας, οι επιπτώσεις στο μοντέλο δε θα είναι μεγάλες.

7.4. Περίληψη

Στη πρώτη ενότητα του κεφαλαίου αυτού παρουσιάστηκαν βασικές έννοιες που απαιτούνται για να είναι σε θέση ο αναλυτής να εισάγει σωστά όλα εκείνα τα δεδομένα που απαιτούνται για την ορθή μοντελοποίηση ενός συστήματος. Αρχικά, είδαμε ποια είναι τα στοιχεία εκείνα τα οποία αποτελούν δεδομένα εισόδου για το σύστημα και πώς αυτά συλλέγονται. Έπειτα, παρουσιάσαμε τρόπους με τους οποίους μπορεί να γίνει δειγματοληψία από συνεχείς, αλλά και διακριτές κατανομές.

Στη δεύτερη ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάστηκαν τα βασικά ζητήματα που αφορούν στην ανάλυση της εξόδου της προσομοίωσης, δηλαδή στη φάση της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων από την εκτέλεση του μοντέλου. Αρχικά καθορίσαμε τι είναι τα δεδομένα εξόδου και διακρίναμε τα στάδια της αρχικής, σταθερής και μεταβατικής κατάστασης από τις οποίες περνάει το μοντέλο έως ότου φτάσει στο σημείο της σταθερής κατάστασης του. Έπειτα, συζητήσαμε τον πειραματισμό με μοντέλα προσομοίωσης και το πολύ σημαντικό θέμα της εκτίμησης τιμών για στοχαστικές μεταβλητές εξόδου με δεδομένο διάστημα εμπιστοσύνης και της ανάλυσης ευαισθησίας.

8. Συστημική Ανάλυση και Μοντελοποίηση Συστημάτων

8.1. Εισαγωγή

Σε συστήματα χαμηλής πολυπλοκότητας είναι σχετικά εύκολο για τον αναλυτή να συνδέει αιτιατά τα γεγονότα δημιουργώντας αλυσίδες αιτίων - αποτελεσμάτων ώστε να μπορεί ερμηνεύει το παρελθόν και σε σημαντικό βαθμό να προβλέπει το μέλλον. Η αιτιοκρατία είναι ο βασικός τρόπος λογισμού όταν η πολυπλοκότητα είναι χαμηλή. Όταν όμως η πολυπλοκότητα αυξάνει, είναι δύσκολο στον αναλυτή να κινείται με βασικό λογισμό μόνο την αιτιοκρατία. Στα περιβάλλοντα υψηλής πολυπλοκότητας, όπως είναι για παράδειγμα οι οργανισμοί, τα κοινωνικά ή οικονομικά συστήματα, οι αιτίες διαπλέκονται, δημιουργούν κυκλικούς ενισχυτικούς μηχανισμούς, παρουσιάζουν χρονικές υστερήσεις και δεν μπορούν να συσχετιστούν εύκολα με ευδιάκριτα αποτελέσματα. Επόμενο είναι να απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση η οποία θα είναι σε θέση να αντιμετωπίζει την πολυπλοκότητα. Η προσέγγιση αυτή είναι η συστημική ανάλυση η οποία αποτελείται από χρήσιμα εργαλεία διάγνωσης σχεδιασμού και ανάλυσης. Στο κεφάλαιο αυτό εστιάζουμε σε δυο εργαλεία της συστημικής ανάλυσης: τη συστημική σκέψη και τη συστημική δυναμική.

8.2. Συστημική Σκέψη στη Διοικητική Επιστήμη

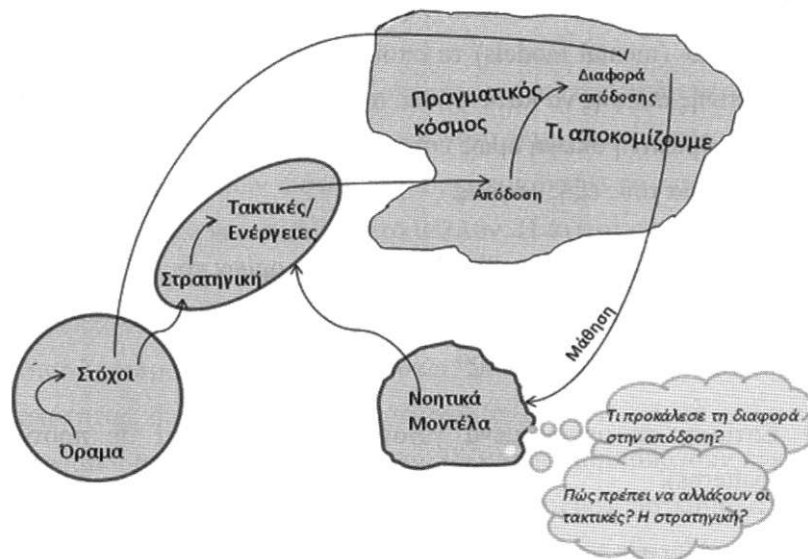
Αν και η συστημική προσέγγιση υπάρχει εδώ και 50 χρόνια περίπου, δεν είναι παρά τα τελευταία 10 χρόνια που άρχισε να διεισδύει ουσιαστικά στη διοικητική σκέψη. Οι γρήγορες και πολλές φορές ακατανόητες αλλαγές στο περιβάλλον, η τρομακτική αύξηση της πολυπλοκότητας του επιχειρησιακού περιβάλλοντος, η ανάγκη γρήγορης απόκρισης από την πλευρά των οργανισμών, πρωτοβουλίες όπως η ολική ποιότητα και η αναδιοργάνωση επιχειρηματικών διαδικασιών σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της τεχνολογίας της πληροφορικής και επικοινωνιών, οδήγησαν στην αναζήτηση εργαλείων ολιστικής θεώρησης και δυναμικής οργάνωσης και κατανόησης της πολυπλοκότητας.

Για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, η ανθρώπινη σκέψη δημιουργεί «νοητικά μοντέλα» (mental models) τα οποία αποτυπώνουν την προσπάθεια της ανθρώπινης σκέψης να κατανοήσει, απεικονίσει και αξιολογήσει αποφάσεις. Η ανθρώπινη σκέψη όμως υστερεί να δημιουργήσει επαρκώς νοητικά μοντέλα για τους εξής λόγους:

- Μη κατανόηση του προβλήματος και των ορίων που αυτό προσδιορίζεται. Τα όρια αφορούν τη δυνατότητα αξιολόγησης καταστάσεων στο χρόνο και στο χώρο.
- Εστίαση σε μεμονωμένα γεγονότα (events) αντί σε πρότυπα (patterns).
- Αδυναμία σύνδεσης παραμέτρων, υποσυνόλων και διαχείρισης των μερών και του συνόλου.
- Υποτίμηση ή αγνόηση εγγενών χρονικών υστερήσεων.
- Υπόθεση σχέσεων αιτίας-αιτιατού αντί για μηχανισμών ανατροφοδότησης.

Στοχεύοντας στην ικανοποίηση των παραπάνω αναγκών, η οργανωσιακή επιστήμη αναζητά διαρκώς τρόπους να εμπλουτίζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων με εργαλεία και μεθοδολογίες. Η μεθοδολογία της Συστημικής Σκέψης (Systems Thinking) έρχεται να καλύψει αυτή την ανάγκη, παρέχοντας στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων ένα πανίσχυρο τρόπο γραφικής αναπαράστασης των «νοητικών μοντέλων» προκειμένου να αναπαραστήσει ένα πραγματικό πρόβλημα (hypothesize causality) και να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων.

Το Σχήμα 8.1 δίνει μια καλύτερη αίσθηση των νοητικών μοντέλων και της αναγκαιότητας της Συστημικής Σκέψης για την απεικόνισή τους.



Σχήμα 8.1: Ανατροφοδότηση ενός νοητικού συστήματος (Πηγή: ISEE Systems Training)

8.2.1. Συστημική σκέψη για πολύπλοκα προβλήματα

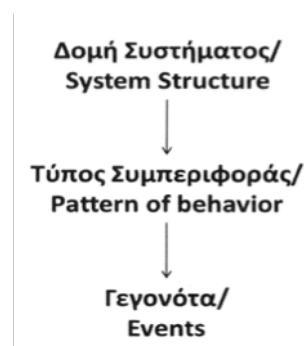
Η Συστημική Σκέψη αποτελείται από χρήσιμα εργαλεία σχεδιασμού και ανάλυσης. Αυτός ο τρόπος σκέψης χρησιμοποιείται και έχει καθιερωθεί για περισσότερα από πενήντα χρόνια (Forrester, 1961). Είναι φανερό ότι αυτή η προσέγγιση απαιτεί αλλαγή στον τρόπο και στη φιλοσοφία ανάλυσης και μοντελοποίησης διοικητικών προβλημάτων. Σε αντίθεση με τον κλασικό τρόπο σκέψης, που εξετάζει μεμονωμένα γεγονότα και τις αιτίες τους (άλλα γεγονότα συνήθως), η συστημική σκέψη εξετάζει μια επιχείρηση ως σύστημα που αποτελείται από επιμέρους αλληλεπιδρώντα στοιχεία. Βασικός της στόχος είναι να ανιχνεύει συμπεριφορές και ιδιότητες που έχουν τα συστήματα όταν τα δει κανείς συνολικά και τις οποίες χάνουν όταν τα συστήματα κατακερματιστούν στα συστατικά τους. Η συστημική σκέψη επιχειρεί να κατανοήσει τη λειτουργία των μερών όχι απομονωμένα αλλά σε συνάφεια με το «όλον» στο οποίο είναι ενσωματωμένα. Διαφέρει από την κλασική ανάλυση στο ότι εστιάζει στις σχέσεις των αντικειμένων που απαρτίζουν το σύστημα και όχι στα αντικείμενα αυτά καθ' αυτά. Επομένως, με τη συστημική σκέψη, τα αίτια αναζητώνται στο εσωτερικό του οργανισμού, στη δομή του συστήματος (system structure). Συγκεκριμένα, με τη βελτίωση της δομής επιδιώκεται η αντιμετώπιση των προβλημάτων.

Ο Πίνακας 8.1 παρουσιάζει τις βασικές διαφορές μεταξύ της αναλυτικής και της συστημικής προσέγγισης.

	Αναλυτική προσέγγιση	Συστημική προσέγγιση
Έμφαση	Στα μέρη	Στο όλον
Περιβάλλον	Αγνοείται	Εξετάζεται
Στόχοι	Συντήρηση	Αλλαγή, εξέλιξη, μάθηση
Κατάσταση	Σταθερή	Προσαρμόσιμη
Ανεξαρτησία	Επιμέρους στοιχεία μπορεί να είναι ανεξάρτητα	Υπάρχει αλληλοσυσχέτιση μεταξύ των στοιχείων
Συμπλοκότητα	Μικρή	Μεγάλη
Τρόπος σκέψης	Ανταγωνισμός, Αναζήτηση αιτίας - αιτιατού	Επαγωγή, Σύνθεση, Αναζήτηση σκοπού
Πρόβλημα	Δομημένο, ημι-δομημένο	Αδόμητο

Πίνακας 8.1: Βασικές διαφορές μεταξύ της αναλυτικής και της συστημικής προσέγγισης

Στο Σχήμα 8.2 φαίνεται ότι η συστημική προσέγγιση βασίζεται στη μελέτη τόσο της δομής του συστήματος και της συμπεριφοράς του όσο και των γεγονότων με στόχο να βρίσκει τον τρόπο με τον οποίο αυτά είναι συνυφασμένα. Έτσι, ενώ ο κλασσικός τρόπος σκέψης οδηγεί στο να πιστεύουμε ότι τα γεγονότα οδηγούν στην ανάπτυξη της κατάλληλης δομής, η συστημική προσέγγιση μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε και το αντίστροφο, πώς δηλαδή η δομή «γεννά» τις συμπεριφορές και τα γεγονότα.

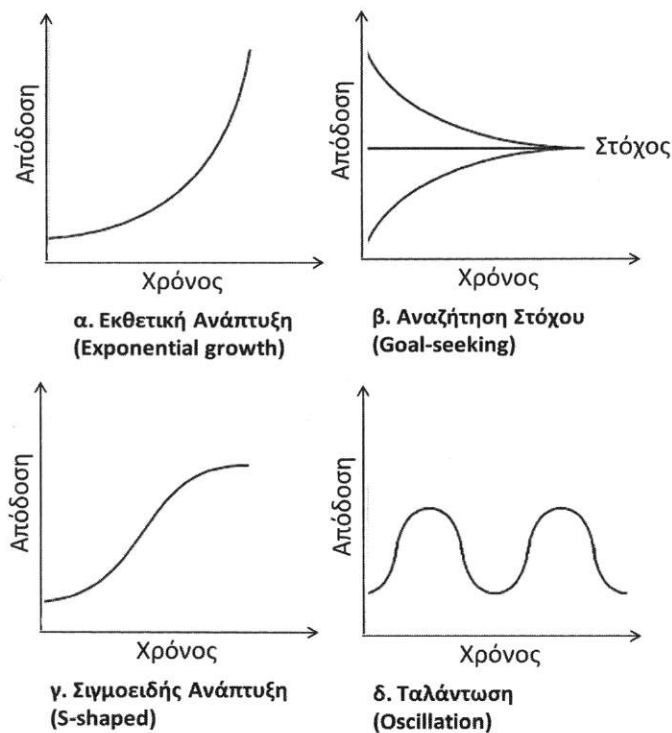


8.2.2. Βασικοί τύποι συμπεριφοράς συστήματος

Η δομή ενός συστήματος καθορίζει / δημιουργεί τη συμπεριφορά του συστήματος αυτού. Για να ξεκινήσει κανείς να εξετάζει τη δομή ενός συστήματος, θα πρέπει να μετατοπιστεί από συγκεκριμένα γεγονότα που σχετίζονται με το πρόβλημα στους τύπους συμπεριφοράς που χαρακτηρίζουν την κατάσταση. Συνήθως αυτό απαιτεί να

διερευνήσει κανείς τον τρόπο με τον οποίο μια ή περισσότερες μεταβλητές αλλάζουν στην πάροδο του χρόνου. Σε ένα εταιρικό περιβάλλον, οι μεταβλητές που απασχολούν μπορεί να είναι για παράδειγμα το κόστος, οι πωλήσεις, τα έσοδα, το κέρδος, το μερίδιο αγοράς, και ούτω καθεξής. Αυτό σημαίνει να εξετάσει κανείς τους τύπους συμπεριφοράς που παρουσιάζουν αυτές οι μεταβλητές. Η προσέγγιση της συστημικής σκέψης κερδίζει μεγάλο μέρος της δύναμής της ως μέθοδος επίλυσης προβλημάτων από το γεγονός ότι παρόμοιες συμπεριφορές εμφανίζονται σε μια ποικιλία διαφορετικών καταστάσεων και οι υποκείμενες δομές του συστήματος που προκαλούν αυτές τις χαρακτηριστικές συμπεριφορές είναι γνωστές. Έτσι, μόλις αναγνωρίσει κανείς ένα τύπο συμπεριφοράς που αποτελεί πρόβλημα, μπορεί να ψάξει για την δομή του συστήματος που προκάλεσε αυτή τη συμπεριφορά. Αναγνωρίζοντας και τροποποιώντας αυτή τη δομή του συστήματος, δίνεται η δυνατότητα να εξαλείψει κανείς μόνιμα τον προβληματικό τύπο συμπεριφοράς.

Οι τέσσερις τύποι συμπεριφοράς που φαίνονται στο Σχήμα 8.3 εμφανίζονται συχνά στα διάφορα συστήματα, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμούς. Σε αυτό το Σχήμα, η «απόδοση» αναφέρεται σε οποιαδήποτε μεταβλητή μας ενδιαφέρει κάθε φορά. Μπορεί να αναπαριστά ένα χρηματοοικονομικό δείκτη ή μια μετρική λειτουργικής απόδοσης ή αποτελεσματικότητας. Σε αυτή την ενότητα, συνοψίζουμε τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των τύπων συμπεριφοράς, ενώ στις επόμενες παραγράφους, θα εξετάσουμε τους τύπους δομής συστήματος που προκαλούν αυτές τις συμπεριφορές.



Σχήμα 8.3. Βασικοί Τύποι Συμπεριφοράς Συστήματος

Με την εκθετική ανάπτυξη (exponential growth) (Σχήμα 8.3α), μια αρχική ποσότητα αρχίζει να αυξάνεται με συνέπεια την επιτάχυνση του ρυθμού ανάπτυξης. Ο όρος «εκθετική ανάπτυξη» προέρχεται από τη στατιστική κατανομή, όπου η μεταβλητή που μελετάται ακολουθεί μια συγκεκριμένη μορφή που ονομάζεται εκθετική. Στις επιχειρηματικές διαδικασίες, η ανάπτυξη δεν μπορεί να ακολουθήσει αυτή τη μορφή ακριβώς, αλλά η βασική ιδέα της επιτάχυνσης της ανάπτυξης υφίσταται. Αυτή η συμπεριφορά είναι αυτό που θα θέλαμε να δούμε για τις πωλήσεις ενός νέου προϊόντος, παρόλο που οι πωλήσεις πιο συχνά ακολουθούν την σιγμοειδή καμπύλη (s-shaped) που αναλύεται παρακάτω.

Με τον τύπο συμπεριφοράς αναζήτησης στόχου (goal seeking), η αρχική ποσότητα υπερβαίνει ή υπολείπεται του επιθυμητού στόχου και στην πορεία συγκλίνει με αυτόν. Το Σχήμα 8.3β δείχνει δύο πιθανές περιπτώσεις: μία όπου η αρχική τιμή της ποσότητας είναι πάνω από το στόχο και μία όπου η αρχική τιμή είναι κάτω από το στόχο.

Με τη σιγμοειδή ανάπτυξη (καμπύλη S) (Σχήμα 8.3γ), η αρχική εκθετική ανάπτυξη ακολουθείται από συμπεριφορά αναζήτησης στόχου η οποία τελικά οδηγεί στη σταθεροποίηση της μεταβλητής.

Με την ταλάντωση/κυματοειδή συμπεριφορά (Σχήμα 8.3δ), η ποσότητα που μας ενδιαφέρει παρουσιάζει διακυμάνσεις γύρω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Στην ουσία η ταλάντωση φαίνεται αρχικά να είναι εκθετική ανάπτυξη, έπειτα εμφανίζεται σαν σιγμοειδή ανάπτυξη προτού υποχωρήσει προς την αντίστροφη κατεύθυνση.

Συχνά συναντούμε επίσης συνδυασμούς των διαφορετικών τύπων συμπεριφοράς, όπως:

- Εκθετική ανάπτυξη σε συνδυασμό με κυματοειδή συμπεριφορά. Με αυτό το συνδυασμό, η γενική τάση είναι ανοδική, αλλά μπορεί επίσης να παρατηρηθούν τμήματα με καθοδική πορεία. Εάν το πλάτος των ταλαντώσεων είναι σχετικά μικρό, τότε η ανάπτυξη μπορεί να πλατειάσει, αντί να μειωθεί πραγματικά, πριν συνεχίσει την ανοδική πορεία.
- Συμπεριφορά αναζήτησης στόχου σε συνδυασμό με κυματοειδή συμπεριφορά με πλάτος ταλάντωσης που μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Με αυτή τη συμπεριφορά, η μεταβλητή που μας ενδιαφέρει θα υπερβεί το στόχο στη μία πλευρά και στη συνέχεια στην άλλη. Το εύρος της υπέρβασης του στόχου μειώνεται μέχρι η ποσότητα τελικά να σταθεροποιηθεί στο στόχο.
- Σιγμοειδής ανάπτυξη σε συνδυασμό με κυματοειδή συμπεριφορά με πλάτος ταλάντωσης που μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου.

8.2.3. Μοντελοποίηση δομής συστήματος και μηχανισμός ανάδρασης (Feedback)

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις δομές του συστήματος που προκαλούν τους τύπους συμπεριφοράς που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, θα παρουσιάσουμε μια γραφική σημειογραφία για τη μοντελοποίηση της δομής ενός συστήματος. Η χρησιμότητα μιας γραφικής αναπαράστασης της δομής ενός συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 8.4. που έχει προσαρμοστεί από ένα αντίστοιχο σχήμα των Richardson και Pugh (1981). Το συγκεκριμένο παράδειγμα παρουσιάζει τη δομή ενός συστήματος παραγωγής μιας εταιρείας.

Σε αυτό το διάγραμμα, οι σύντομες περιγραφικές φράσεις αποτελούν τα στοιχεία που συνθέτουν το σύστημα, και τα βέλη αντιπροσωπεύουν τις αιτιώδεις αλληλεπιδράσεις

μεταξύ αυτών των στοιχείων. Για παράδειγμα, εξετάζοντας την αριστερή πλευρά του διαγράμματος, βλέπουμε ότι η «Παραγωγή» επηρεάζεται άμεσα από το «Εργατικό Δυναμικό» και την «Παραγωγικότητα». Με τη σειρά της, η «Παραγωγή» επηρεάζει την «Παραλαβή του αποθέματος».

Αυτό το διάγραμμα παρουσιάζει σχέσεις που είναι δύσκολο να περιγραφούν προφορικά καθώς η γλώσσα περιγράφει συσχετισμούς με μια γραμμική σχέση αιτίας-αποτελέσματος, ενώ το διάγραμμα δείχνει ότι στο πραγματικό σύστημα υπάρχουν κυκλικές αλυσίδες αιτίας - αποτελέσματος. Σκεφτείτε, για παράδειγμα, το στοιχείο «Απόθεμα» στην πάνω αριστερή γωνία του διαγράμματος. Βλέπουμε από το διάγραμμα ότι το «Απόθεμα» επηρεάζει τη «Διαθεσιμότητα του Αποθέματος» που με τη σειρά του επηρεάζει τις «Αποστολές». Μέχρι αυτό το σημείο της ανάλυσής μας, παρατηρούμε μια γραμμική αλυσίδα αιτίας-αιτιατού, αλλά συνεχίζοντας στο διάγραμμα, βλέπουμε ότι οι «Αποστολές» επηρεάζουν το «Απόθεμα». Αυτό σημαίνει ότι η αλυσίδα των αιτίων-αποτελεσμάτων αποτελεί ένα κλειστό κύκλωμα, με το «Απόθεμα» να επηρεάζει τον ίδιο του τον εαυτό έμμεσα μέσα από τα άλλα στοιχεία του βρόγχου. Το διάγραμμα δείχνει όλες αυτές τις σχέσεις πολύ πιο εύκολα από μια λεκτική περιγραφή. Βοηθά στην οπτικοποίηση και αναπαράσταση όλων αυτών των συσχετίσεων μεταξύ των στοιχείων του συστήματος.



Σχήμα 8.4. Παράδειγμα δομής ενός συστήματος παραγωγής

Όταν ένα στοιχείο του συστήματος έμμεσα επηρεάζει και τον εαυτό του, οι σχέσεις που αναπτύσσονται δημιουργούν ένα βρόγχο ανάδρασης/ανατροφοδότησης (feedback loop ή causal loop). Ένας βρόγχος ανάδρασης είναι μια κλειστή διαδοχή αιτιών-αποτελεσμάτων. Αποτελεί δηλαδή ένα κλειστό μονοπάτι ροής πληροφορίας (ή ενεργειών) (Richardson και Pugh 1981). Ο λόγος για την έμφαση στην ανάδραση είναι ότι συχνά είναι αναγκαίο να εξεταστεί τι ακριβώς προκαλεί τους τύπους συμπεριφοράς που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και φαίνονται στο Σχήμα 8.3. Δηλαδή, οι αιτίες ενός τύπου συμπεριφοράς που παρατηρείται βρίσκονται συχνά στις δομές ανάδρασης ενός συστήματος διοικητικής επιστήμης.

Για να ολοκληρωθεί η παρουσίαση της ορολογίας για την περιγραφή της δομής του συστήματος, τονίζεται ότι μια γραμμική αλυσίδα αιτιών - αποτελεσμάτων που δεν «κλείνει» πίσω στον εαυτό της ονομάζεται ανοιχτός βρόγχος. Μια ανάλυση των αιτιών και των επιπτώσεων που δεν λαμβάνει υπόψη βρόγχους ανάδρασης

ονομάζεται ανάλυση ανοιχτού βρόγχου (open loop thinking), και αυτός ο όρος συνήθως έχει μια υποτιμητική χροιά, καθώς υποδεικνύει ένα τρόπο σκέψης που δείχνει ότι δεν λαμβάνει υπόψη το πλήρες φάσμα των επιπτώσεων της προτεινόμενης δράσης.

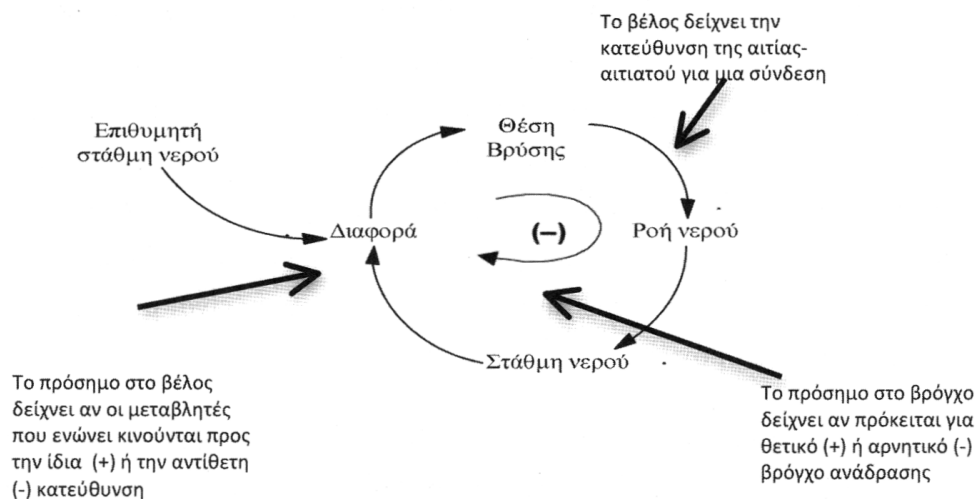
Το διάγραμμα του Σχήματος 8.4. αποτελεί ένα αρχικό σημείο αναφοράς όταν θέλουμε να αναλύσουμε πώς προκύπτει ένας συγκεκριμένος τύπος συμπεριφοράς. Ωστόσο, για μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση, επιπλέον πληροφορίες μπορεί να είναι χρήσιμες. Το Σχήμα 8.5. ορίζει το συμβολισμό για μια τέτοια επιπρόσθετη πληροφόρηση. Αυτό το σχήμα αποτελεί ένα διάγραμμα βρόγχου ανάδρασης που έχει όμως επιπρόσθετες πληροφορίες για μια απλή διαδικασία, που είναι το γέμισμα ενός ποτηριού με νερό. Αυτό το διάγραμμα αποτελείται από στοιχεία και βέλη που συνδέουν τα στοιχεία μεταξύ τους (και ονομάζονται αιτιώδεις σχέσεις) με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.4., αλλά περιλαμβάνουν επιπλέον ένα πρόσημο (είτε + ή -) σε κάθε σύνδεσμο. Αυτά τα πρόσημα έχουν την ακόλουθη ερμηνεία:

- Η σχέση αιτίου - αποτελέσματος από ένα στοιχείο A σε ένα άλλο στοιχείο B είναι **θετική** (δηλαδή, συμβολίζεται με +) αν είτε (α) το A προστίθεται στο B ή (β) μια αλλαγή στο A παράγει μια αλλαγή στο B προς την ίδια κατεύθυνση.
- Η σχέση αιτίου - αποτελέσματος από ένα στοιχείο A σε ένα άλλο στοιχείο B είναι **αρνητική** (δηλαδή, συμβολίζεται με -) αν είτε (α) το A αφαιρείται από το B ή (β) μια αλλαγή στο A παράγει μια αλλαγή στο B προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Αυτός ο συμβολισμός παρουσιάζεται στο διάγραμμα στο Σχήμα 8.5. Ξεκινώντας από το στοιχείο «Θέση βρύσης» στην κορυφή του διαγράμματος, εάν η θέση της βρύσης αυξάνεται (δηλαδή, η βρύση ανοίγει παραπάνω), τότε η «ροή του νερού» αυξάνεται. Ως εκ τούτου, το πρόσημο στο βέλος μεταξύ της «Θέσης βρύσης» και της «Ροής νερού» είναι θετικό. Ομοίως, αν η «Ροή νερού» αυξάνεται, τότε η «Στάθμη νερού» στο ποτήρι θα αυξηθεί. Επομένως, το πρόσημο στο βέλος μεταξύ αυτών των δύο στοιχείων είναι θετικό.

Το επόμενο στοιχείο στην αλυσίδα των σχέσεων αιτίας-αιτιατού είναι η «διαφορά» η οποία αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της «Επιθυμητής στάθμης νερού» και της (πραγματικής) «Στάθμης νερού» (Δηλαδή, διαφορά = επιθυμητή στάθμη νερού -

πραγματική στάθμη νερού). Από αυτό τον ορισμό προκύπτει ότι η αύξηση στη «Στάθμη νερού» μειώνει τη «Διαφορά» και ως εκ τούτου το πρόσημο για τη σύνδεση μεταξύ αυτών των δύο στοιχείων είναι αρνητικό. Τέλος, για να κλείσει ο βρόγχος στη «θέση βρύσης», μια μεγαλύτερη τιμή για τη «διαφορά» προφανώς οδηγεί σε αύξηση της «θέσης βρύσης» (να γεμίσει το ποτήρι) και επομένως το πρόσημο για τη σχέση μεταξύ αυτών των δύο στοιχείων είναι θετικό.



Σχήμα 8.5. Διάγραμμα ανάδρασης για τη διαδικασία γεμίσματος ενός ποτηριού

Υπάρχει και ένας επιπλέον σύνδεσμος σε αυτό το διάγραμμα, από την «Επιθυμητή στάθμη νερού» στη «διαφορά». Από τον ορισμό της «διαφοράς» που αναφέραμε παραπάνω, η επιρροή είναι προς την ίδια κατεύθυνση κατά μήκος αυτής της σύνδεσης, και, συνεπώς, το πρόσημο στο σύνδεσμο είναι θετικό. Εκτός από τα πρόσημα σε κάθε σύνδεσμο, ένας πλήρης βρόγχος χαρακτηρίζεται επίσης από ένα πρόσημο. Το πρόσημο για ένα συγκεκριμένο βρόγχο προσδιορίζεται μετρώντας τον αριθμό των προσήμων με μείον (-) σε όλες τις συνδέσεις που απαρτίζουν το βρόγχο. Συγκεκριμένα:

- Ένας βρόγχος ανάδρασης καλείται **θετικός** και υποδηλώνεται από ένα πρόσημο (+) σε παρένθεση, αν περιέχει ζυγό αριθμό αρνητικών συνδέσμων αιτίας-αιτιατού.
- Ένας βρόγχος ανάδρασης καλείται **αρνητικός** και υποδηλώνεται από ένα πρόσημο (-) σε παρένθεση, αν περιέχει ένα μονό αριθμό αρνητικών συνδέσμων αιτίας-αιτιατού.

Έτσι, το πρόσημο του βρόγχου είναι το αλγεβρικό αποτέλεσμα των προσήμων των συνδέσμων που τον αποτελούν. Συχνά, ένα μικρό βέλος ζωγραφίζεται γύρω από το πρόσημο ανάδρασης για να υποδηλωθεί με μεγαλύτερη σαφήνεια ότι το πρόσημο αναφέρεται στο βρόγχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5. Σημειώστε ότι σε αυτό το διάγραμμα υπάρχει ένας ενιαίος βρόγχος ανάδρασης και ότι αυτός ο βρόγχος έχει αρνητικό πρόσημο. Δεδομένου ότι οι σύνδεσμοι με αρνητικό πρόσημο που τον απαρτίζουν είναι μονός αριθμός, ολόκληρος ο βρόγχος είναι αρνητικός.

Τέλος, να τονίσουμε ότι υπάρχει και εναλλακτικός συμβολισμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα διαγράμματα βρόγχου ανάδρασης. Με βάση αυτόν τον εναλλακτικό συμβολισμό, το μικρό γράμμα s χρησιμοποιείται αντί του θετικού προσήμου (+) σε έναν σύνδεσμο, και το μικρό γράμμα o αντί του (-). Το s προέρχεται από την αγγλική λέξη same, δηλαδή «ίδια», ενώ το o προέρχεται από την αγγλική λέξη opposite δηλαδή «αντίθετη», υποδηλώνοντας ότι οι μεταβλητές στα δύο άκρα του συνδέσμου κινούνται είτε προς την ίδια κατεύθυνση είτε προς αντίθετες κατευθύνσεις. Αντίστοιχα, για τους βρόγχους, χρησιμοποιείται το κεφαλαίο γράμμα R αντί του (+), και το κεφαλαίο γράμμα B αντί του (-). Το R προέρχεται από την αγγλική λέξη «reinforcing», δηλαδή ενίσχυση και το B αντιπροσωπεύει την αγγλική λέξη «balancing», δηλαδή εξισορρόπηση. Ο λόγος για τη χρήση αυτών των συγκεκριμένων όρων θα γίνει κατανοητός όταν θα συζητήσουμε στην επόμενη ενότητα πώς οι τύποι συμπεριφοράς σχετίζονται με διαφορετικές δομές του συστήματος.

8.2.4. Σχέσεις δομής συστήματος και τύπων συμπεριφοράς

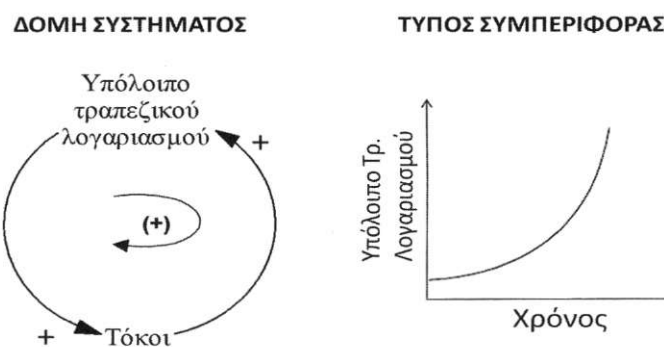
Αυτή η ενότητα παρουσιάζει απλές δομές ενός συστήματος που οδηγούν στα βασικά πρότυπα συμπεριφοράς όπως παρουσιάστηκαν νωρίτερα (Σχήμα 8.3.). Ενώ οι δομές των περισσότερων συστημάτων διοικητικής επιστήμης είναι στην πραγματικότητα πολύ πιο πολύπλοκες από αυτές που παρουσιάζονται εδώ, οι δομές αυτές μπορεί να θεωρηθούν ως θεμελιώδεις λίθοι από τους οποίους μπορούν να κατασκευαστούν πιο πολύπλοκα μοντέλα.

Θετικός/Ενισχυτικός Βρόγχος Ανάδρασης (Positive/Reinforcing Feedback Loop)

Ένας θετικός ή ενισχυτικός βρόγχος ανάδρασης ενισχύει την αλλαγή με μια ακόμη μεγαλύτερη αλλαγή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία ανάπτυξη με ένα

συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό. Αυτός ο τύπος της ανάπτυξης αναφέρεται ως εκθετική ανάπτυξη. Στα πρώιμα στάδια, η ανάπτυξη φαίνεται να είναι αργή, αλλά στη συνέχεια επιταχύνεται. Έτσι, η φύση της ανάπτυξης ενός συστήματος που έχει ένα βρόγχο θετικής ανάδρασης μπορεί να είναι παραπλανητική. Έτσι σε μια διαδικασία που εμφανίζει στα πρώτα στάδια εκθετική ανάπτυξη, κάτι τέτοιο μπορεί αργότερα να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα, διότι αυξάνεται με αργούς ρυθμούς.

Η στιγμή που επιταχύνεται η ανάπτυξη, μπορεί να είναι πολύ αργά για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος προκαλεί αυτή η ανάπτυξη. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ρύπανση που προκαλείται από την αύξηση του πληθυσμού. Το Σχήμα 8.6. δείχνει ένα πολύ γνωστό παράδειγμα θετικής ανάδρασης: της αύξησης του υπολοίπου ενός τραπεζικού λογαριασμού, όταν συσσωρεύονται οι τόκοι. Μερικές φορές οι βρόγχοι θετικής ανάδρασης ονομάζονται φαύλοι ή ενάρετοι κύκλοι, ανάλογα με τη φύση της αλλαγής που προκαλούν. Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αυτό τον τύπο συμπεριφοράς περιλαμβάνουν: φαινόμενο μόδας (bandwagon effects) ή φαινόμενο χιονοστιβάδας (snowballing).

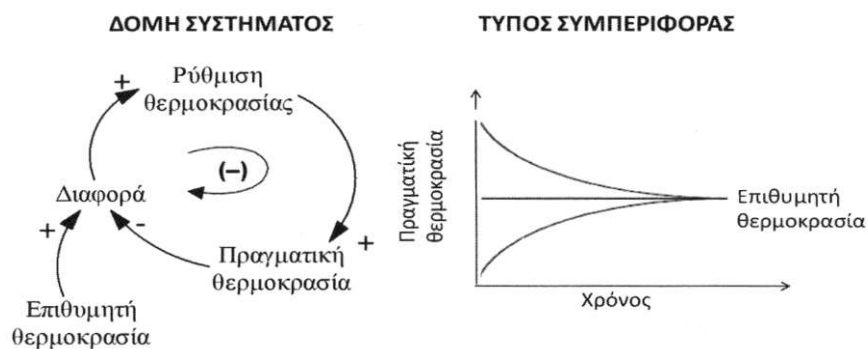


Σχήμα 8.6. Θετικός Βρόγχος Ανάδρασης και Τύπος Συμπεριφοράς

Αρνητικός/Εξισορροπητικός Βρόγχος Ανάδρασης (Negative/Balancing Feedback Loop)

Ένας αρνητικός, ή εξισορροπητικός βρόγχος ανάδρασης επιδιώκει ένα στόχο. Εάν η τρέχουσα τιμή της μεταβλητής που μας ενδιαφέρει είναι πάνω από το στόχο, τότε η δομή του βρόγχου ωθεί την τιμή της προς τα κάτω, ενώ αν η τρέχουσα τιμή είναι κάτω από το στόχο, η δομή του βρόγχου ωθεί την τιμή της

μεταβλητής προς τα πάνω. Πολλές διαδικασίες στη διοικητική επιστήμη περιέχουν βρόγχους αρνητικής ανάδρασης που παρέχουν την απαραίτητη σταθερότητα, αλλά που μπορεί να δημιουργούν και αντίσταση στις αναγκαίες αλλαγές. Όντας αντιμέτωπη με ένα εξωτερικό περιβάλλον που υπαγορεύει την αλλαγή, μια δομή συστήματος που περιέχει αρνητικό βρόγχο αντίθετα θα συνεχίσει σταθερά με παρόμοια συμπεριφορά. Αυτοί οι τύποι βρόγχων ανάδρασης είναι τόσο ισχυροί σε ορισμένους οργανισμούς που τελικά οι οργανισμοί θα οδηγηθούν στην κατάρρευση παρά στην αλλαγή. Το Σχήμα 8.7. δείχνει ένα διάγραμμα αρνητικής ανάδρασης για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μιας ηλεκτρικής κουβέρτας.

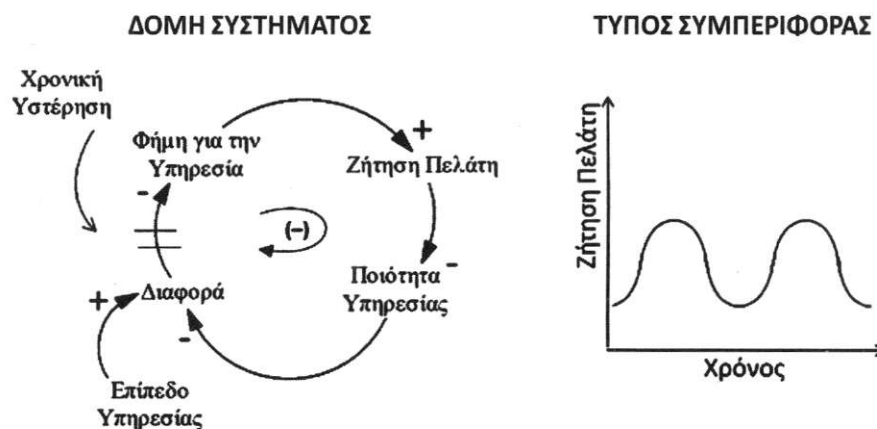


Σχήμα 8.7. Αρνητικός Βρόγχος Ανάδρασης και Τύπος Συμπεριφοράς

Αρνητικός Βρόγχος Ανάδρασης με Χρονική Υστέρηση (Negative Feedback Loop with Delay)

Ένας αρνητικός βρόγχος με σημαντική χρονική υστέρηση μπορεί να οδηγήσει σε ταλάντωση. Αυτός ο συγκεκριμένος τύπος συμπεριφοράς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου βρόγχου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η τιμή μιας μεταβλητής συνεχίζει να ταλαντεύεται επ' αόριστον. Σε άλλες περιπτώσεις, το πλάτος των ταλαντώσεων μειώνεται σταδιακά και η μεταβλητή που μας ενδιαφέρει πλησιάζει το στόχο. Το Σχήμα 8.8. παρουσιάζει μια αρνητική ανάδραση με υστέρηση στο πλαίσιο της ποιότητας των υπηρεσιών. (Αυτό το παράδειγμα υποθέτει ότι υπάρχουν σταθεροί πόροι που διατίθενται για την υπηρεσία.) Τα συστήματα παραγωγής και διανομής μπορεί να εμφανίσουν αυτό το τύπο συμπεριφοράς λόγω των χρονικών υστερήσεων ανάμεσα στη διακίνηση πληροφοριών σχετικά με τη πραγματική ζήτηση από τον πελάτη για ένα προϊόν στην εγκατάσταση παραγωγής του προϊόντος αυτού. Λόγω των

καθυστερήσεων αυτών, η παραγωγή συνεχίζεται πολύ περισσότερο από όταν έχουν παραχθεί αρκετές μονάδες του προϊόντος για να ανταποκριθούν στη ζήτηση. Στη συνέχεια, η παραγωγή διακόπτεται πολύ χαμηλότερα από ό,τι χρειάζεται για να αντικατασταθούν οι ποσότητες που πωλούνται, ενώ η υπερβάλλουσα προσφορά στο σύστημα ικανοποιείται. Αυτός ο κύκλος μπορεί να συνεχιστεί επ' αόριστον, γεγονός που δημιουργεί σημαντικές εντάσεις στη διαχείριση των διαδικασιών. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει ένα μοτίβο περιοδικών προσλήψεων και απολύσεων. Στην ουσία όμως υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι αυτά που θεωρούνται πολλές φορές ως εποχιακές διακυμάνσεις των πελατών στη ζήτηση είναι τελικά ταλαντώσεις που προκαλεί η χρονική υστέρηση στους αρνητικούς βρόγχους ανάδρασης στο πλαίσιο του συστήματος παραγωγής - διανομής.

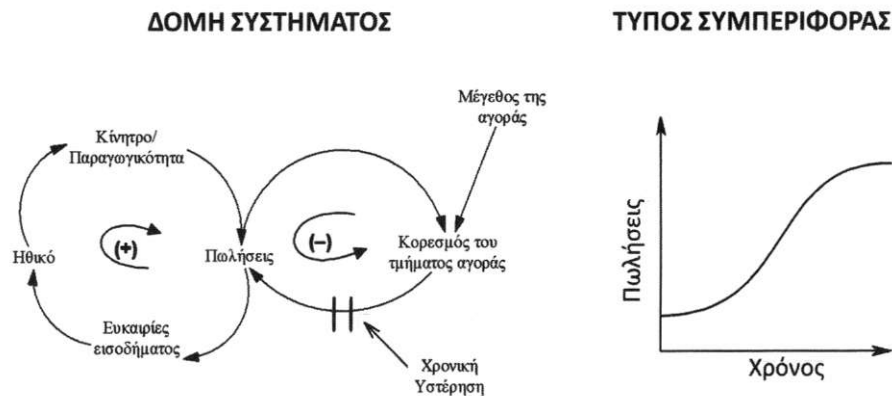


Σχήμα 8.8. Αρνητικός Βρόγχος Ανάδρασης με Υστέρηση και Τύπος Συμπεριφοράς

Συνδυασμός Αρνητικών και Θετικών Βρόγχων (Combination of Positive and Negative Loops)

Όταν συνδυάζονται στη δομή ενός συστήματος θετικοί και αρνητικοί βρόγχοι, είναι δυνατή μια ποικιλία από τύπους συμπεριφοράς. Το Σχήμα 8.9. δείχνει μια κατάσταση όπου ένας βρόγχος θετικής ανάδρασης οδηγεί στα αρχικά στάδια σε εκθετική ανάπτυξη, αλλά στη συνέχεια, μετά από μια χρονική υστέρηση, μια αρνητική ανάδραση έρχεται να κυριαρχήσει στη συμπεριφορά του συστήματος. Αυτός ο συνδυασμός οδηγεί σε μια σιγμοειδή συμπεριφορά, διότι η θετική ανάδραση οδηγεί στην αρχικά εκθετική ανάπτυξη, και στη συνέχεια, όταν ο

βρόγχος αρνητικής ανάδρασης αναλαμβάνει οδηγεί σε συμπεριφορά αναζήτησης στόχου. Το Σχήμα 8.9. απεικονίζει ένα συνδυασμό θετικών και αρνητικών βρόγχων στο πλαίσιο των πωλήσεων ενός νέου προϊόντος.



Σχήμα 8.9. Συνδυασμός Αρνητικών και Θετικών Βρόγχων Ανάδρασης και Τύπος Συμπεριφοράς

8.2.5 Μοντελοποίηση με διαγράμματα σχέσεων αιτίας/ αιτιατού (Causal Loop Diagram)

Για να αρχίσει κανείς να σχεδιάζει ένα διάγραμμα σχέσεων αιτίας-αιτιατού, θα πρέπει αρχικά να αποφασίσει ποια είναι τα γεγονότα που είναι σημαντικά για την ανάπτυξη μιας καλύτερης κατανόησης της δομής του συστήματος. Για παράδειγμα, μπορεί οι πωλήσεις ορισμένων βασικών προϊόντων να ήταν χαμηλότερες από ό,τι αναμενόταν τον περασμένο μήνα. Με βάση αυτό το γεγονός θα πρέπει κανείς να αντιληφθεί (ίσως μόνο ποιοτικά) τον τύπο συμπεριφοράς στην πάροδο του χρόνου για τις ποσότητες που ενδιαφέρουν. Για το παράδειγμα των πωλήσεων, ποιος είναι ο τύπος συμπεριφοράς των πωλήσεων κατά το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει; Έχουν αυξηθεί οι πωλήσεις; Παρουσιάζουν ταλάντωση ή σιγματοειδή συμπεριφορά; Ακόμα και όταν καθοριστεί ο τύπος της συμπεριφοράς, πώς θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει τις έννοιες των βρόγχων θετικής και αρνητικής ανάδρασης, με τα αντίστοιχα γενικά πρότυπα συμπεριφοράς, για να ξεκινήσει την κατασκευή ενός διαγράμματος σχέσεων αιτίας-αιτιατού που θα εξηγήσει την παρατηρούμενη συμπεριφορά;

Παρακάτω, δίνονται οι ακόλουθες συμβουλές για τη μοντελοποίηση της δομής ενός συστήματος χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα σχέσεων αιτίας - αιτιατού με βάση τους Richardson and Pugh (1981) και Kim (1992):

- Σκεφτείτε τα στοιχεία σε ένα διάγραμμα αιτίας-αιτιατού ως μεταβλητές που μπορούν να πάρουν τιμές προς τα πάνω ή προς τα κάτω, αλλά μην ανησυχείτε αν δεν μπορείτε εύκολα να σκεφτείτε κλίμακες μέτρησης για αυτές τις μεταβλητές.
- Χρησιμοποιήστε καλύτερα ουσιαστικά ή ονομαστικές φράσεις για να αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές, παρά ρήματα. Αυτό σημαίνει ότι οι όποιες δράσεις/ενέργειες σε ένα διάγραμμα αιτίας-αιτιατού αντιπροσωπεύονται από τις συνδέσεις (τα βέλη) και όχι από τα στοιχεία. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήστε τη λέξη «κόστος» και όχι «αυξανόμενο κόστος» ως μεταβλητή.
- Σιγουρευτείτε ότι ο ορισμός μιας μεταβλητής καθιστά σαφές προς ποια κατεύθυνση σημαίνει άνοδος για την μεταβλητή. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήστε την λέξη «ανοχή στο έγκλημα» και όχι «στάση απέναντι στο έγκλημα».
- Γενικά είναι πιο σαφές να χρησιμοποιήσετε ένα όνομα μεταβλητής για το οποίο η θετική αίσθηση είναι προτιμότερη. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήστε τη λέξη «ανάπτυξη» αντί για τη λέξη «ύφεση».
- Οι αιτιώδεις σχέσεις θα πρέπει να συνεπάγονται την κατεύθυνση μιας αιτιώδους συνάφειας, και όχι απλώς μια χρονική ακολουθία. Αυτό σημαίνει ότι μια θετική σύνδεση μεταξύ των μεταβλητών A και B δεν σημαίνει ότι πρώτα εμφανίζεται η A και μετά η B. Περισσότερο εννοείται ότι όταν αυξάνεται το A αυξάνει και το B.
- Καθώς κατασκευάζετε τις σχέσεις στο διάγραμμα σας, σκεφτείτε για πιθανές απρόβλεπτες παράπλευρες συνέπειες που μπορεί να προκύψουν επιπλέον των επιρροών που σχεδιάζετε αρχικά. Καθώς τις αναγνωρίζετε, αποφασίστε αν αυτές οι συνδέσεις θα πρέπει να προστεθούν για να αντιπροσωπεύσουν τις παρενέργειες.
- Για βρόγχους αρνητικής ανάδρασης υπάρχει ένας στόχος. Συνήθως είναι πιο σαφές εάν αυτός ο στόχος εμφανίζεται ρητά με τη «διαφορά/χάσμα/κενό» που είναι η κινητήρια δύναμη του βρόγχου προς το στόχο. Αυτό φαίνεται από τα παραδείγματα της προηγούμενης παραγράφου (σχετικά με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας και της ποιότητας υπηρεσιών).
- Η διαφορά μεταξύ μιας πραγματικής και μιας αντιλαμβανόμενης κατάστασης μιας διαδικασίας μπορεί συχνά να είναι πολύ σημαντική για την εξήγηση

τύπων συμπεριφοράς. Έτσι, μπορεί να είναι σημαντικό να συμπεριληφθούν στα στοιχεία του βρόγχου, τόσο η πραγματική αξία μιας μεταβλητής όσο και η αντιλαμβανόμενη αξία. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει μία χρονική υστέρηση πριν να γίνει αντιληπτή η πραγματική κατάσταση. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει μια πραγματική αλλαγή στην ποιότητα των προϊόντων, παίρνει συνήθως λίγο χρόνο πριν οι πελάτες να μπορούν να αντιληφθούν αυτή την αλλαγή.

- Συχνά υπάρχουν διαφορές μεταξύ των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων συνεπειών των ενεργειών μας, και αυτές μπορεί να χρειάζεται να διακριθούν με διαφορετικούς βρόγχους. Για παράδειγμα, το βραχυπρόθεσμο αποτέλεσμα της λήψης ενός φαρμάκου που επιδρά στη διάθεσή μας μπορεί να είναι να μας κάνει να αισθανθούμε καλύτερα, αλλά το μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα μπορεί να είναι εθισμός και επιδείνωση της υγείας.

Εάν ένας σύνδεσμος ανάμεσα σε δύο στοιχεία χρειάζεται πολλές επεξηγήσεις, τότε μάλλον πρέπει να προσθέσετε ενδιάμεσα στοιχεία μεταξύ των δύο υπαρχόντων που θα προσδιορίζουν με μεγαλύτερη σαφήνεια τι συμβαίνει.

- Κρατήστε το διάγραμμα όσο το δυνατόν απλούστερο, λαμβάνοντας βέβαια υπ' όψιν τις παραπάνω παρατηρήσεις. Σκοπός του διαγράμματος δεν είναι να περιγράψει κάθε λεπτομέρεια μιας διαδικασίας, αλλά να δείξει αυτές τις πτυχές της δομής του συστήματος που οδηγούν στην παρατηρούμενη συμπεριφορά.

8.3. Συστημική Δυναμική

Η μεθοδολογία που παρουσιάσαμε παραπάνω ουσιαστικά συνδέει την συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου συστήματος με την υποκείμενη δομή του. Έτσι ξεκινάμε σχεδιάζοντας την χαρακτηριστική συμπεριφορά συστήματος (reference mode), δηλαδή την μεταβολή στο χρόνο των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν. Έχοντας αναγνωρίσει τον τύπο συμπεριφοράς ενός συστήματος (pattern of behavior) μπορούμε να προσδιορίσουμε πιο εύκολα τη δομή του συστήματος που δημιουργεί τη συγκεκριμένη συμπεριφορά.

Η Συστημική Δυναμική (System Dynamics) είναι συμπληρωματικό εργαλείο στη συστημική σκέψη. Σχεδιάστηκε ώστε να δίνει μια άλλη πιο ποσοτική οπτική γωνία στον μελετητή. Παράλληλα δίνει τη δυνατότητα για μαθηματική δόμηση και

προσομοίωση ώστε να μελετηθεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, δηλαδή η συμπεριφορά με το χρόνο και σε διάφορα ενδεχόμενα. Αν και αρχικά απευθυνόταν σε στελέχη επιχειρήσεων για την κατανόηση των βιομηχανικών διαδικασιών, σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως ως τεχνική ανάλυσης και σχεδιασμού σε όλους τους τομείς, π.χ. στη βιολογία, στα οικονομικά, στη μελέτη των επιχειρήσεων και τη μελέτη του περιβάλλοντος, μεταξύ άλλων.

Η θεωρία της Δυναμικής των Συστημάτων μας βοηθά στην κατανόηση και τη μελέτη της συμπεριφοράς των πολύπλοκων συστημάτων στο χρόνο. Μελετά την εσωτερική ανάδραση (internal feedback loops) και την επίδραση του χρόνου που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Σύμφωνα με τη Δυναμική των Συστημάτων, η συμπεριφορά ενός συστήματος στο χρόνο δεν είναι γραμμική. Ως μεθοδολογία και τεχνική μοντελοποίησης χρησιμοποιείται για την απεικόνιση, κατανόηση, και ανάλυση πολύπλοκων φαινομένων.

Παρακάτω δίνουμε μια σειρά ορισμών για τη Συστημική Δυναμική. Ξεκινώντας λοιπόν, ο Jay Forrester, ο οποίος ήταν και ο ιδρυτής της θεωρίας αυτής, την όρισε ως εξής: (Forrester, 1961)

"Η έρευνα των χαρακτηριστικών της πληροφορίας - ανάδρασης (feedback) των οργανωμένων συστημάτων και η χρήση μοντέλων για τη σχεδίαση βελτιωμένων οργανωτικών δομών και καθοδηγητικών πολιτικών. "

Λίγα χρόνια αργότερα ο Coyle έδωσε τον εξής ορισμό: (Coyle, 1979)

"Μία μέθοδος ανάλυσης προβλημάτων, στην οποία ο χρόνος αποτελεί σημαντικό παράγοντα, η οποία περιλαμβάνει την μελέτη του τρόπου με τον οποίο τα συστήματα μπορούν να αμυνθούν ή να επωφεληθούν από την παρεμβολή που εμπίπτει σε αυτά από τον έξω κόσμο. "

Με τη σειρά του ο Wolstenholme (1990) αναφέρει:

"Μια αυστηρή μέθοδος για την ποιοτική περιγραφή, εξερεύνηση και ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων από την σκοπιά των διαδικασιών τους, της πληροφορίας, των οργανωτικών ορίων και των στρατηγικών, η οποία διευκολύνει τη χρήση ποσοτικών μοντέλων προσομοίωσης και ανάλυσης για το σχεδιασμό της δομής και της συμπεριφοράς του συστήματος"

Κανένας από τους παραπάνω ορισμούς δεν είναι απόλυτα ικανοποιητικός. Ο Forrester δεν περιγράφει τι είδους μοντέλα εμπλέκονται, ενώ δεν κάνει καμία αναφορά στο χρόνο, όπως και ο Wolstenholme. Από την άλλη πλευρά, ο Coyle δεν κάνει καμία αναφορά στην ανάδραση της πληροφορίας. Τέλος, ενώ ο Wolstenholme αναφέρει πολύ σωστά ότι η Δυναμική Συστημάτων είναι μια ποιοτική ανάλυση, δεν συμπεριλαμβάνει στον ορισμό του τις μεθόδους ισχυρής βελτιστοποίησης. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω ορισμούς και τις σχετικές παρατηρήσεις μπορούμε να ορίσουμε τη Δυναμική Συστημάτων ως εξής:

"Η Δυναμική Συστημάτων ασχολείται με την εξαρτημένη από το χρόνο συμπεριφορά των οργανωμένων συστημάτων με στόχο την περιγραφή του συστήματος και την κατανόηση μέσω ποιοτικών και ποσοτικών μοντέλων, του τρόπου με τον οποίο η ανάδραση της πληροφορίας (information feedback) ελέγχει τη συμπεριφορά του, καθώς και το σχεδιασμό ισχυρών δομών ανάδρασης και πολιτικών ενημέρωσης, μέσω της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης."

Με βάση τον τελευταίο αυτό ορισμό, παρατηρούμε πως το μοντέλο της Δυναμικής Συστημάτων έχει κατασκευαστεί προκειμένου να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα εναλλακτικών πολιτικών ή στρατηγικών σχεδιασμού με στόχο να βελτιώσει τη συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου πολύπλοκου συστήματος. Αυτό βέβαια είναι δυνατό μόνο αν το μοντέλο έχει μια εσωτερική δομή, η οποία αντιπροσωπεύει επαρκώς τις πτυχές του συστήματος που σχετίζονται με την προβληματική συμπεριφορά. Οι επιστήμονες επισημαίνουν πως το μοντέλο της Δυναμικής Συστημάτων θα πρέπει να παράγει "right output behavior for the right reasons", δηλαδή σωστή συμπεριφορά για τους σωστούς λόγους.

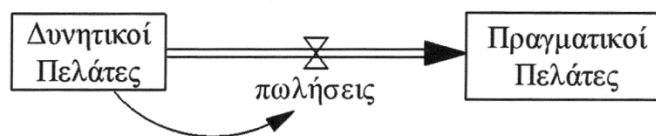
Μεγάλο μέρος της δύναμης της Δυναμικής Συστημάτων προέρχεται από την ικανότητά της να χρησιμοποιείται με δύο συσχετιζόμενους αλλά διαφορετικούς τρόπους. Από τη μια πλευρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ποιοτικά για να απεικονίσει τη λειτουργία του συστήματος στα πλαίσια της σκέψης και της κατανόησης. Ενώ από την άλλη πλευρά το διάγραμμα μπορεί να μετατραπεί σε ένα μοντέλο προσομοίωσης για ποσοτική προσομοίωση και βελτιστοποίηση, προκειμένου να υποστηρίξει τις πολιτικές σχεδίασης.

Τα θέματα που θα μας απασχολήσουν σε αυτή την ενότητα και θα μας βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση του πώς λειτουργούν οι επιχειρηματικές διαδικασίες φαίνονται στο διάγραμμα σχέσεων αιτίας - αιτιατού στο Σχήμα 8.10α. Το διάγραμμα μοντελοποιεί μια απλή περίπτωση διαφήμισης για ένα αγαθό. Υπάρχει μια ομάδα δυνητικών πελατών που μετατρέπονται σε πραγματικούς πελάτες μέσα από τις πωλήσεις. Οι πιθανοί πελάτες και οι πωλήσεις συνδέονται με ένα βρόγχο αρνητικής ανάδρασης με στόχο να οδηγηθούν οι πιθανοί πελάτες στο μηδέν.

Αν παρατηρούσαμε μια τυπική μαζική διαφήμιση, θα περιμέναμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πιθανών πελατών, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πωλήσεις, και αυτό φαίνεται στο Σχήμα 8.10α από το βέλος με το θετικό πρόσημο μεταξύ των πιθανών πελατών και πωλήσεων. Ομοίως, περισσότερες πωλήσεις οδηγούν σε λιγότερους δυνητικούς πελάτες (δεδομένου ότι οι πιθανοί πελάτες μετατρέπονται σε πραγματικούς από τις πωλήσεις), και ως εκ τούτου, υπάρχει ένα αρνητικό βέλος από τις πωλήσεις προς τους δυνητικούς πελάτες. Δεδομένου ότι παρατηρείται μόνος αριθμός αρνητικών συνδέσεων στο βρόγχο ανάδρασης μεταξύ των πιθανών πελατών και των πωλήσεων, αυτός είναι ένα βρόγχος αρνητικής ανάδρασης.



α. Διάγραμμα Σχέσεων αιτίας-αιτιατού (Causal loop diagram)



β. Διάγραμμα Αποθεμάτων- Ροών (Stock and Flow diagram)

Σχήμα 8.10. Παράδειγμα διαφήμισης

Καταλαβαίνουμε τελικά από αυτό το διάγραμμα (το όχι και τόσο προφανές) ότι τελικά οι πωλήσεις πρέπει να πάνε στο μηδέν, όταν ο αριθμός των πιθανών πελατών φτάσει στο μηδέν. Ωστόσο, αυτή η γνώση από μόνη της δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τους στόχους μιας επιχείρησης, διότι δεν υπάρχει καμία πληροφορία σχετικά με

το ρυθμό με τον οποίο οι δυνητικοί πελάτες θα πάνε στο μηδέν. Μπορεί να κάνει μεγάλη διαφορά για τη διαχείριση της παραγωγής και τις πωλήσεις του προϊόντος αυτού, αν θα πουλήσει καλά για δέκα μήνες ή δέκα χρόνια πριν ξεμείνει από πιθανούς πελάτες! Για μια απλή περίπτωση σαν αυτή, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα υπολογιστικό φύλλο για να αναπτύξουμε ένα ποσοτικό μοντέλο με στόχο να υπολογίσουμε το ρυθμό με τον οποίο οι δυνητικοί πελάτες φτάνουν στο μηδέν, αλλά όσο η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται, κάτι τέτοιο καθίσταται πολύ δύσκολο. Στο υπόλοιπο αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάζουμε μια συστηματική προσέγγιση και μοντελοποίηση που μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε απλές όσο και σε πιο σύνθετες επιχειρηματικές διαδικασίες.

8.3.1. Βασικά στοιχεία της δυναμικής συστημάτων

Το Σχήμα 8.10β παρουσιάζει μια γραφική αναπαράσταση που παρέχει κάποια δομή σε σχέση με το ρυθμό με τον οποίο ο αριθμός των πιθανών πελατών πηγαίνει στο μηδέν. Αυτή η σχηματική αναπαράσταση αποτελείται από τρεις διαφορετικούς τύπους στοιχείων: τα σημεία συσσώρευσης (stocks), τις ροές και τις πληροφορίες. Όπως θα δούμε παρακάτω, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι τα τρία αυτά στοιχεία στο διάγραμμα παρέχουν ένα γενικό τρόπο γραφικής αναπαράστασης κάθε επιχειρηματικής διαδικασίας. Επιπλέον, αυτή η γραφική αναπαράσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ανάπτυξη ενός ποσοτικού μοντέλου για τη μελέτη των χαρακτηριστικών μιας διαδικασίας.

Αυτός ο τύπος του διαγράμματος ονομάζεται διάγραμμα αποθεμάτων-ροών. Όπως και στο διάγραμμα σχέσεων αιτίας - αιτιατού, το διάγραμμα αποθεμάτων-ροών δείχνει τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών που έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου. Στο διάγραμμα του Σχήματος 8.10β, οι μεταβλητές είναι οι δυνητικοί πελάτες, οι πωλήσεις και οι πραγματικοί πελάτες. Σε αντίθεση με το διάγραμμα ανάδρασης, το διάγραμμα αποθεμάτων-ροών διακρίνει διαφορετικούς τύπους μεταβλητών. Το Σχήμα 8.10β παρουσιάζει δύο διαφορετικούς τύπους των μεταβλητών, οι οποίες διακρίνονται από διαφορετικά γραφικά σύμβολα. Οι μεταβλητές «δυνητικοί πελάτες» και «πραγματικοί πελάτες» υποδηλώνονται με ορθογώνια, και αυτός ο τύπος μεταβλητής ονομάζεται σημείο συσσώρευσης ή απόθεμα ή επίπεδο. Η μεταβλητή «πωλήσεις» εμφανίζεται δίπλα σε ένα σύμβολο βαλβίδας/παπιγιόν και αυτός ο τύπος της μεταβλητής ονομάζεται ροή, ή ρυθμός.

Για να καταλάβουμε και να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα αποθεμάτων- ροής, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τη διαφορά μεταξύ των αποθεμάτων και των ροών. Ωστόσο, πριν από την εξέταση αυτής της διαφοράς με περισσότερες λεπτομέρειες, είναι χρήσιμο να συζητήσουμε τι προσπαθούμε να πετύχουμε με αυτή τη προσέγγιση μοντελοποίησης των επιχειρηματικών διαδικασιών.

Έτσι, πιο συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση των Δυναμικών Συστημάτων περιέχει πέντε τύπους εξισώσεων (Forrester, 1985):

- **Κατάσταση ή Απόθεμα ή Συσσώρευση (Level/ Stock/ Accumulation):** Είναι η τρέχουσα τιμή των μεταβλητών που έχει προκύψει ως η διαφορά της εκροής με την εισροή σε δεδομένη χρονική στιγμή (μετρήσιμα σε διακριτό χρόνο). Παράδειγμα είναι το υπόλοιπο ενός λογαριασμού, το υπόλοιπο παραγωγής στο εργοστάσιο, ο αριθμός του εργατικού δυναμικού.
- **Ροή ή Ρυθμός (Flow/ Rate):** Είναι η ακαριαία ροή η οποία αυξάνει ή μειώνει τις τιμές των μεταβλητών (δηλ. τα αποθέματα). Ο ρυθμός δηλώνει την κίνηση της ροής, ενώ τα αποθέματα δείχνουν το αποτέλεσμα ως κατάσταση του συστήματος που μεταβλήθηκε λόγω της κίνησης. Στα φυσικά συστήματα τα rates ακολουθούν τους νόμους της φύσης. Στα υπόλοιπα συστήματα τα rates αντικατοπτρίζουν τις στρατηγικές πολιτικές που επηρεάζουν τις προσωπικές επιλογές.
- **Auxiliary:** Είναι βοηθητικές παράμετροι για τον υπολογισμό των ροών. Οι ροές και οι βοηθητικές μεταβλητές βασίζονται σε κάποιες σταθερές (constants) που δεν αλλάζουν στο χρόνο που μελετάμε το σύστημα. Μία επιπλέον παράμετρος στη συστημική δυναμική αναφέρεται ως «χρονική υστέρηση» (delay) και γίνεται εκτενής αναφορά στη συνέχεια του βιβλίου.
- **Constant:** Είναι σταθερές τιμές του συστήματος.
- **Initial Value Conditions:** Πρόκειται για αρχικές τιμές που δηλώνουν εμπειρικές τιμές που συνήθως δίνονται για διερεύνηση.

Σύμφωνα με τη μοντελοποίηση των δυναμικών συστημάτων, οι Roberts (1978), Spencer (1966) προτείνουν τα ακόλουθα βήματα:

1. Προσδιορισμός των προβλημάτων και στόχων που πρέπει να επιτευχθούν.
2. Περιγραφή του συστήματος με διαγράμματα ανατροφοδότησεων (causal loop/influence diagram).

3. Ανάπτυξη των εξισώσεων.
4. Συλλογή των αρχικών δεδομένων (initial value conditions) είτε από ιστορικά δεδομένα είτε από συνεντεύξεις με ειδικούς που γνωρίζουν το υπό αξιολόγηση σύστημα.
5. Επικύρωση του μοντέλου για ανάπτυξη αξιοπιστίας του.
6. Εξομοίωση του μοντέλου για να ελεγχθούν πολιτικές και ενέργειες που πετυχαίνουν προδιαγεγραμμένους στόχους.

8.3.2. Γενίκευση της προσέγγισης

Πιο πάνω αναφέραμε ότι η σχηματική αναπαράσταση αποθεμάτων-ροών όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.10β παρέχει ένα γενικό τρόπο για να περιγραφεί γραφικά οποιαδήποτε επιχειρηματική διαδικασία. Αυτό μπορεί να ακούγεται πολύ φιλόδοξο: οποιαδήποτε διαδικασία! Πιο συγκεκριμένα, ας πάρουμε ένα παράδειγμα διαδικασιών παραγωγής και ας σκεφτούμε πακέτα προσομοίωσης σε υπολογιστή. Τα πακέτα αυτά περιέχουν πολύ περισσότερα στοιχεία από αυτά τα δύο που παρουσιάζονται εδώ. Για παράδειγμα, ένα πακέτο προσομοίωσης διαδικασιών παραγωγής μπορεί να περιέχει ειδικά σύμβολα και χαρακτηρισμούς για μια ποικιλία διαφορετικού εξοπλισμού παραγωγής.

Αυτό το είδος λεπτομερών πληροφοριών είναι σημαντικό για τη μελέτη συγκεκριμένων λεπτομερειακών υπηρεσιών μιας συγκεκριμένης διαδικασίας παραγωγής. Εδώ δεν παρέχουμε τέτοιες λεπτομέρειες που είναι τόσο εξειδικευμένες για συγκεκριμένο εξοπλισμό (ο οποίος πιθανώς σύντομα θα είναι παρωχημένος). Αντ' αυτού, μας ενδιαφέρουν χαρακτηριστικά που είναι παρόμοια σε όλες τις επιχειρησιακές διαδικασίες και τα στοιχεία που συνθέτουν αυτές τις διαδικασίες. Είναι αξιοπρόσεκτο το γεγονός ότι όλες αυτές οι διαδικασίες μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας τους δύο τύπους μεταβλητών: τα αποθέματα (ή επίπεδα, συσσωρεύσεις) και τις ροές (ρυθμούς).

Το συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου υποστηρίζονται από πάνω από έναν αιώνα θεωρητικής και πρακτικής εργασίας. Ο Forrester (1961) εφήρμοσε συστηματικά για πρώτη φορά αυτές τις ιδέες για την ανάλυση επιχειρηματικών διαδικασιών σχεδόν πενήντα χρόνια πριν, και οι εκτεταμένες πρακτικές εφαρμογές έχουν δείξει ότι αυτός ο τρόπος εξέτασης των επιχειρηματικών διαδικασιών παρέχει σημαντική γνώση βασισμένη σε καθιερωμένη θεωρία. Όπως λέει και ένα ρητό: «δεν

υπάρχει τίποτε πιο πρακτικό από μια καλή θεωρία» και η θεωρία της δυναμικής συστημάτων που παρουσιάζεται εδώ μπορεί να εφαρμοστεί και να παρέχει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.

8.3.3. Αποθέματα (Stocks) και ροές (Flows)

Η γραφική παράσταση στο Σχήμα 8.10β υποδηλώνει τις διαφορές μεταξύ των αποθεμάτων και ροών. Τα ορθογώνια πλαίσια γύρω από τις μεταβλητές «Πιθανοί Πελάτες» και «Πραγματικοί Πελάτες» μοιάζουν με κάποιου είδους δοχεία, ή σαν μπανιέρες. Το βέλος με τη διπλή γραμμή που ενώνει του πιθανούς πελάτες με τους πραγματικούς μοιάζει με σωλήνα, και η βαλβίδα στη μέση αυτού του σωλήνα ελέγχει τη ροή μέσω του σωλήνα. Έτσι, η γραφική αναπαράσταση υπαινίσσεται την ιδέα ότι υπάρχει μια ροή από πιθανούς πελάτες προς τους πραγματικούς με ένα ρυθμό που ελέγχεται από τη «βαλβίδα» των πωλήσεων. Πράγματι, αυτή είναι η βασική ιδέα πίσω από τη διαφορά μεταξύ των αποθεμάτων και των ροών: το απόθεμα είναι σημείο συσσώρευσης μιας ποσότητας ενώ η ροή είναι η μετακίνηση της ποσότητας από το ένα σημείο στο άλλο.

Ένα πρωταρχικό συμφέρον των διευθυντών επιχειρήσεων είναι αλλαγές σε μεταβλητές όπως οι πραγματικοί πελάτες στην πάροδο του χρόνου. Εάν τίποτα δεν αλλάζει, τότε ο καθένας μπορεί να διαχειριστεί την κατάσταση όπως γινόταν πάντα. Μερικές από τις μεγαλύτερες προκλήσεις προέρχονται από την αλλαγή. Εάν οι πωλήσεις αρχίζουν να μειώνονται, ή ακόμη και να αυξάνονται, θα πρέπει κανείς να διερευνήσει γιατί έχει συμβεί αυτή η αλλαγή και πώς να το αντιμετωπίσει. Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ των επιτυχημένων διευθυντικών στελεχών και εκείνων που δεν είναι επιτυχημένοι είναι η ικανότητα τους να αντιμετωπίσουν τις αλλαγές πριν να είναι πολύ αργά. Θα επικεντρωθούμε στην έρευνα αυτών των αλλαγών, και ειδικότερα στο πώς τα στοιχεία και η δομή μιας επιχειρηματικής διαδικασίας μπορούν να επιφέρουν τέτοιες αλλαγές. Λόγω αυτής της εστίασης για τα στοιχεία που συνθέτουν μια διαδικασία (τα οποία συχνά αναφέρονται ως τα συστατικά ενός συστήματος) και στο πώς η απόδοση μιας διαδικασίας αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, η προσέγγιση που συζητάμε αναφέρεται ως δυναμική του συστήματος.

Η διάκριση μεταξύ αποθεμάτων και ροών είναι δύσκολη μερικές φορές, και γι' αυτό θα αναφέρουμε πολλά παραδείγματα παρακάτω. Ως ένα αρχικό σημείο αναφοράς, μπορείτε να σκεφτείτε ότι τα αποθέματα αντιπροσωπεύουν φυσικές οντότητες οι

οποίες μπορούν να συσσωρευτούν και να μετακινούνται. Ωστόσο, στην εποχή της τεχνολογίας και της πληροφορίας, η έννοια της φυσικής οντότητας μπορεί να γίνει αφηρημένη. Για παράδειγμα, τα χρήματα είναι συχνά ένα σημαντικό απόθεμα σε πολλές επιχειρηματικές διαδικασίες. Ωστόσο, τα χρήματα είναι πλέον πιο συχνά καταχωρήσεις σε έναν υπολογιστή και όχι φυσικοί λογαριασμοί. Παρ'όλα αυτά, τα χρήματα είναι ακόμα ένα απόθεμα, και η λειτουργία μεταφοράς των χρημάτων είναι μια ροή.

Ένας άλλος τρόπος για να διακρίνει κανείς τα αποθέματα και τις ροές είναι να ρωτήσει τι θα συνέβαινε αν μπορούσε να παγώσει το χρόνο και να παρατηρήσει τη διαδικασία. Αν συνέχιζε να βλέπει μη μηδενική τιμή για μια ποσότητα, τότε η ποσότητα αυτή είναι απόθεμα, αλλά αν η ποσότητα δεν θα μπορούσε να μετρηθεί, τότε είναι ροή. (Δηλαδή, οι ροές εμφανίζονται μόνο κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, και σε κάθε δεδομένη στιγμή, τίποτα δεν κινείται.)

8.3.4. Τύποι αποθεμάτων (Stocks) και ροών (Flows)

Οι περισσότερες επιχειρηματικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα πέντε είδη αποθεμάτων: υλικά, προσωπικό, κεφαλαιουχικό εξοπλισμό, παραγγελίες και χρήματα. Τα πιο εμφανή σημάδια της λειτουργίας μιας διαδικασίας είναι συχνά οι κινήσεις αυτών των πέντε είδη αποθεμάτων, τα οποία ορίζονται ως εξής:

- Υλικά. Αυτό περιλαμβάνει όλα τα αποθέματα και τις ροές υλικών αγαθών που είναι μέρος της διαδικασίας παραγωγής και διανομής, είτε πρόκειται για πρώτες ύλες, είτε ενδιάμεσα προϊόντα είτε τελικά.
- Προσωπικό. Αυτό αναφέρεται γενικά σε πραγματικούς ανθρώπους, σε αντίθεση, για παράδειγμα, με τις ώρες εργασίας.
- Κεφαλαιουχικός εξοπλισμός. Αυτό περιλαμβάνει πράγματα όπως ο χώρος του εργοστασίου, εργαλεία και άλλο εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για την παραγωγή αγαθών και παροχή υπηρεσιών.
- Παραγγελίες. Αυτό περιλαμβάνει πράγματα όπως οι παραγγελίες για αγαθά, εντολές για νέους εργαζομένους, και τις συμβάσεις για νέο χώρο ή κεφαλαιουχικό εξοπλισμό. Οι παραγγελίες είναι συνήθως το αποτέλεσμα κάποιας απόφασης που έχει παρθεί, αλλά δεν έχει ακόμη μετατραπεί στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

- Χρήματα. Αυτό χρησιμοποιείται με την έννοια των μετρητών. Δηλαδή, η ροή των χρημάτων είναι η πραγματική διαβίβαση των πληρωμών μεταξύ των διαφόρων αποθεμάτων του χρήματος.

Τα πρώτα τρία στοιχεία παραπάνω (υλικά, προσωπικό, εξοπλισμός) είναι σχετικά απλά εννοιολογικά, γιατί υπάρχει συνήθως μια φυσική οντότητα που αντιστοιχεί σε αυτά. Τα δύο τελευταία στοιχεία (παραγγελίες και χρήματα) είναι κάπως πιο ασαφή. Είτε είναι πραγματικά χρήματα είτε απλά πληροφορίες σχετικά με τη νομισματική είσοδο σε μια βάση δεδομένων μπορεί να μην είναι άμεσα προφανές.

8.3.5. Πληροφορία

Το τελευταίο στοιχείο στο Σχήμα 8.10β είναι η πληροφορία που υποδηλώνεται από το κυρτό βέλος που ενώνει τους πιθανούς πελάτες με τις πωλήσεις. Αυτό το βέλος σημαίνει ότι κατά κάποιο τρόπο η πληροφορία για την αξία των δυνητικών πελατών επηρεάζει την αξία των πωλήσεων. Επιπλέον, και εξίσου σημαντικό, το γεγονός ότι δεν υπάρχει βέλος πληροφορίας από τους πραγματικούς πελάτες στις πωλήσεις σημαίνει ότι οι πληροφορίες σχετικά με τους πραγματικούς πελάτες δεν επηρεάζουν την αξία των πωλήσεων.

Η δημιουργία, ο έλεγχος και η διανομή της πληροφορίας είναι μια κεντρική δραστηριότητα της διαχείρισης των επιχειρήσεων. Η καρδιά των συνεχόμενων αλλαγών στη διαχείριση των επιχειρήσεων βρίσκεται στην αλλαγή του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες. Ίσως ποτέ άλλοτε δεν ήταν τόσο δυνητικά πιο σημαντικός ο αντίκτυπος της πληροφορικής στη διαχείριση των επιχειρήσεων. Σε μια παραδοσιακή ιεραρχική οργάνωση των επιχειρήσεων, μπορεί να θεωρηθεί ότι πρωταρχικός ρόλος των μεσαίων στελεχών είναι να περάσουν τις πληροφορίες ψηλά στην ιεραρχία και τις παραγγελίες προς τα κάτω. Αυτή η δομή ήταν απαιτούμε την εποχή πριν την επικράτηση των τεχνολογιών της πληροφορικής όπου σε ένα μεγάλο οργανισμό οι επικοινωνίες ήταν ένα από τα μεγαλύτερα προ-βλήματα που είχε να αντιμετωπίσει. Με την τρέχουσα ευρεία διαθεσιμότητα τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, αυτό το μεγάλο, ακριβό και αργό σύστημα για τη μετάδοση πληροφοριών δεν είναι πλέον επαρκές για να διατηρήσει η επιχείρηση το ανταγωνιστικό της πλεονέκτημα. Οι οργανισμοί αλλάζουν ριζικά τον τρόπο που χειρίζονται την πληροφορία, και έτσι το σύνολο των συνδέσεων πληροφορίας

αποτελεί βασική συνιστώσα στα περισσότερα μοντέλα προσανατολισμένα προς τη βελτίωση των επιχειρηματικών διαδικασιών.

Οι σύνδεσμοι πληροφορίας σε μια επιχειρηματική διαδικασία μπορεί να είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν κατάλληλα λόγω του αφηρημένου χαρακτήρα αυτών των δεσμών. Υλικά, προσωπικό, εξοπλισμός, παραγγελίες και χρήματα συνήθως έχουν μια φυσική αναπαράσταση. Επιπλέον, οι ποσότητες αυτές συντηρούνται και έτσι μπορεί να μετακινηθούν σε έναν τόπο στη μονάδα του χρόνου. Οι πληροφορίες, από την άλλη πλευρά, μπορεί ταυτόχρονα να μετακινηθούν σε πολλά μέρη, και ιδίως στα έντονα υπολογιστικά περιβάλλοντα, μπορεί να το κάνουν αυτό γρήγορα και με σημαντική παραμόρφωση.

Η πρακτική εμπειρία δείχνει ότι η τροποποίηση των πληροφοριακών δεσμών σε μια επιχειρηματική διαδικασία μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην απόδοση της διαδικασίας. Επιπλέον, αυτές οι επιπτώσεις είναι συχνά μη διαισθητικές και μπορεί να είναι επικίνδυνες. Μερικές εταιρείες έχουν ανακαλύψει, για παράδειγμα, ότι τα πληροφοριακά συστήματα όχι μόνο δεν βελτίωσαν την απόδοσή τους, αλλά στην πραγματικότητα την αλλοίωσαν. Κάνοντας πειράματα μεγάλης κλίμακας, αλλάζοντας ad hoc κρίσιμες πτυχές ενός οργανισμού, όπως οι πληροφοριακές συνδέσεις μπορεί να είναι επικίνδυνο. Τα εργαλεία που συζητάμε παρακάτω παρέχουν έναν τρόπο για να διερευνήσει κανείς τις επιπτώσεις των αλλαγών αυτών πριν από την εφαρμογή τους.

Κανείς σήμερα, δεν θα κατασκεύαζε ένα αεροπλάνο χωρίς πρώτα να κάνει προσεκτική ανάλυση της απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιώντας μοντέλα σε υπολογιστή. Ωστόσο, εμείς συνήθως κάνουμε καθημερινά σημαντικές αλλαγές στους οργανισμούς, χωρίς χρήση οποιασδήποτε προσέγγισης μοντελοποίησης του προβλήματος. Συνήθως πιστεύουμε ότι μπορούμε να προβλέψουμε την απόδοση της αλλαγής του οργανισμού διαισθητικά, ακόμη και αν αυτός ο οργανισμός είναι πιθανό να είναι πολύ πιο πολύπλοκος από ό, τι ένα αεροπλάνο. Κανείς δεν θα πήγαινε μια βόλτα με το αεροπλάνο του οποίου δεν είχε εξετάσει τα χαρακτηριστικά όλων των ακραίων συνθηκών. Ωστόσο, συνήθως κάνουμε σημαντικές αλλαγές στη δομή μιας επιχειρηματικής διαδικασίας και, στη συνέχεια «πηγαίνουμε μια βόλτα» χωρίς να έχουμε κάνει κανέναν αντίστοιχο έλεγχο. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται

παρακάτω ενισχύουν την ανάγκη για τέτοιες δοκιμές πριν την εφαρμογή αλλαγών σε επιχειρηματικές διαδικασίες.

8.4. Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν δυο εργαλεία της συστημικής ανάλυσης: η συστημική σκέψη και η συστημική δυναμική.

Η **συστημική σκέψη (Systems Thinking)** βασίζεται στη μελέτη τόσο της δομής του συστήματος και της συμπεριφοράς του όσο και των γεγονότων με στόχο να βρίσκει τον τρόπο με τον οποίο είναι συνυφασμένα. Έτσι, ενώ ο κλασσικός τρόπος σκέψης οδηγεί στο να πιστεύουμε ότι τα γεγονότα οδηγούν στην ανάπτυξη της κατάλληλης δομής, η συστημική προσέγγιση μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε και το αντίστροφο, πώς δηλαδή η δομή «γεννά» τις συμπεριφορές και τα γεγονότα. Επομένως, για να ξεκινήσει κανείς να εξετάζει τη δομή ενός συστήματος, θα πρέπει να μετατοπιστεί από συγκεκριμένα γεγονότα που σχετίζονται με το πρόβλημα στους τύπους συμπεριφοράς που χαρακτηρίζουν την κατάσταση.

Με βάση αυτή την προσέγγιση, παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά τεσσάρων τύπων συμπεριφοράς που εμφανίζονται συχνά στα διάφορα συστήματα, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμούς: της εκθετικής ανάπτυξης (exponential growth), της αναζήτησης στόχου (goal seeking), της σιγμοειδής ανάπτυξης (καμπύλη S) και της ταλάντωσης/κυματοειδής συμπεριφοράς. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις δομές του συστήματος που προκαλούν τους τύπους συμπεριφοράς, παρουσιάστηκε στη συνέχεια ο μηχανισμός ανάδρασης καθώς και μια γραφική σημειογραφία για τη μοντελοποίηση της δομής ενός συστήματος: τα διαγράμματα σχέσεων αιτίας-αιτιατού (causal loop diagrams) ή διαγράμματα ανάδρασης/ανατροφοδότησης (feedback loop diagram). Τα διαγράμματα αυτά βοηθούν στην οπτικοποίηση και αναπαράσταση όλων των συσχετίσεων μεταξύ των στοιχείων του συστήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν απλές δομές ενός συστήματος που οδηγούν στα βασικά πρότυπα συμπεριφοράς. Ενώ οι δομές των περισσότερων συστημάτων διοικητικής επιστήμης είναι στην πραγματικότητα πολύ πιο πολύπλοκες από αυτές που παρουσιάστηκαν εδώ, οι δομές αυτές μπορεί να θεωρηθούν ως θεμελιώδεις λίθοι από τους οποίους μπορούν να κατασκευαστούν πιο πολύπλοκα μοντέλα. Τέλος, δόθηκαν κάποιες χρήσιμες συμβουλές για τη μοντελοποίηση της δομής ενός συστήματος χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα σχέσεων αιτίας-αιτιατού.

Η Συστημική Δυναμική (System Dynamics) είναι συμπληρωματικό εργαλείο στη συστημική σκέψη. Σχεδιάστηκε ώστε να δίνει μια άλλη πιο ποσοτική οπτική γωνία στον αναλυτή. Παράλληλα δίνει τη δυνατότητα για μαθηματική δόμηση και προσομοίωση ώστε να μελετηθεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, δηλαδή η συμπεριφορά με το χρόνο και σε διάφορα ενδεχόμενα. Αφού δόθηκε ο ορισμός της συστημικής δυναμικής, παρουσιάστηκε η γραφική αναπαράσταση που χρησιμοποιείται από αυτή τη μεθοδολογία για την περιγραφή ενός συστήματος και αποτελείται από τρεις διαφορετικούς τύπους στοιχείων: τα αποθέματα (stocks), τις ροές (flow) και την πληροφορία. Τα διαγράμματα αυτά αποθεμάτων-ροών (stock and flow diagrams) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την ανάπτυξη ενός ποσοτικού μοντέλου για τη μελέτη των χαρακτηριστικών μιας διαδικασίας. Όπως και στο διάγραμμα σχέσεων αιτίας-αιτιατού, το διάγραμμα αποθεμάτων-ροών δείχνει τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών που έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου.

9. Συστημική Δυναμική και Προσομοίωση Επιχειρηματικών Διαδικασιών

9.1. Εισαγωγή

Στο διάγραμμα αποθεμάτων - ροών που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο το βάρος δίδεται κυρίως στην οπτικοποίηση της δομής της διαδικασίας. Ωστόσο, τα διαγράμματα αποθεμάτων-ροών εξακολουθούν να μην μπορούν να δώσουν απαντήσεις σε σχέση με σημαντικά ερωτήματα για την απόδοση των διαδικασιών. Για παράδειγμα, αν δούμε το Σχήμα 8.10., δεν είναι εύκολο να απαντήσουμε πώς μεταβάλλεται στο χρόνο ο αριθμός των δυνητικών πελατών. Για να απαντήσει κανείς σε ερωτήσεις αυτού του τύπου πρέπει, πέρα από μια γραφική αναπαράσταση, να εξετάσει τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας. Στο παράδειγμά μας, τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν τον αρχικό αριθμό των δυνητικών και πραγματικών πελατών και τον τρόπο με τον οποίο εξαρτάται ο ρυθμός των πωλήσεων από τους δυνητικούς πελάτες.

Θέλοντας να μοντελοποιήσουμε ποσοτικά μια επιχειρηματική διαδικασία, είναι απαραίτητο να μελετήσουμε μια σειρά από ζητήματα. Δύο βασικά τέτοια ζητήματα είναι το πόσο λεπτομερές θα είναι το μοντέλο, και το πώς λαμβάνεται υπ' όψιν η αβεβαιότητα. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση εργαλείων που μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει για να αναπτύξει καλύτερη γνώση σχετικά με τις βασικές επιχειρηματικές διαδικασίες. Το κεφάλαιο επικεντρώνεται κυρίως στο ενδιάμεσο επίπεδο αποφάσεων σε έναν οργανισμό: δεν είναι ούτε τόσο χαμηλό ώστε να μας απασχολούν θέματα όπως η συγκεκριμένη τοποθέτηση του εξοπλισμού σε μια μονάδα παραγωγής, αλλά ούτε και τόσο υψηλό ώστε να πρέπει να εξετάσουμε αποφάσεις που θα έθεταν την εταιρεία σε κίνδυνο.

Αυτό το ενδιάμεσο επίπεδο αποφάσεων αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος που επικεντρώνονται οι προσπάθειες της διοίκησης, και επιπλέον οι βελτιώσεις σε αυτό το επίπεδο μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ανταγωνιστική θέση μιας εταιρείας. Ολοένα και περισσότερο, οι αποφάσεις αυτές απαιτούν μια δια-λειτουργική προοπτική. Παραδείγματα περιλαμβάνουν θέματα όπως η επίδραση που έχει η απόφαση επέκτασης της παραγωγικής διαδικασίας ενός νέου προϊόντος στις πωλήσεις, οι σχέσεις μεταξύ αποφάσεων χρηματοδότησης και παραγωγικής διαδικασίας, και η σχέση μεταξύ των πολιτικών προσωπικού και της ποιότητας των

υπηρεσιών. Η ποσοτική εξέταση τέτοιου είδους αποφάσεων μπορεί να μην απαιτεί ένα εξαιρετικά λεπτομερές μοντέλο για τις επιχειρηματικές διαδικασίες. Για παράδειγμα, εάν σκεφτούμε τη σχέση μεταξύ των πολιτικών που εφαρμόζονται στο προσωπικό και της ποιότητας των υπηρεσιών, δεν είναι μάλλον απαραίτητο να εξεταστούν μεμονωμένα οι εργαζόμενοι με τις αποδοχές και τα προγράμματα διακοπών. Μια πιο συγκεντρωτική προσέγγιση είναι συνήθως επαρκής.

Επιπλέον, το κεφάλαιο επικεντρώνεται στη βελτίωση των υφιστάμενων διαδικασιών που συνήθως η διαχείριση τους γίνεται διαισθητικά, με έμφαση στο να γίνουν σε εύλογο χρονικό διάστημα και με ρεαλιστικές απαιτήσεις δεδομένων. Υπάρχει μια μακρά ιστορία προσπαθειών για τη δημιουργία εξαιρετικά λεπτομερών μοντέλων, για να διαπιστωθεί τελικά ότι είτε τα δεδομένα που απαιτούνται δεν είναι διαθέσιμα, είτε ότι το πρόβλημα που προσπαθούν να λύσουν έχει προ πολλού λυθεί με άλλα μέσα, πριν την ολοκλήρωση του μοντέλου. Έτσι, επιδίωξή μας είναι μια σχετικά απλή ποσοτική προσέγγιση μοντελοποίησης που μπορεί να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα σε εύλογο χρόνο.

Η προσέγγιση που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό υιοθετεί τη συστημική δυναμική όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Βίεππη, 1994), και κάνει δύο απλουστευμένες υποθέσεις:

1. οι ροές στο πλαίσιο των διαδικασιών είναι συνεχείς, και
2. οι ροές δεν περιλαμβάνουν το στοιχείο της τυχαιότητας.

Με συνεχή ροή, εννοούμε ότι η ποσότητα που ρέει μπορεί να γίνει απείρως πολύ μικρή, τόσο όσον αφορά την ποσότητα του υλικού που ρέει όσο και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ρέει. Με το να μην υπάρχει το στοιχείο της τυχαιότητας εννοούμε ότι η ροή θα προσδιοριστεί επακριβώς αν οι τιμές των μεταβλητών στο άλλο άκρο είναι γνωστές. Μια μεταβλητή που δεν περιλαμβάνει το στοιχείο της τυχαιότητας αναφέρεται ως μια ντετερμινιστική μεταβλητή.

Σαφώς, η υπόθεση της συνεχούς ροής δεν είναι ακριβώς σωστή για πολλές επιχειρηματικές διαδικασίες: δεν μπορεί να διαιρεθούν οι εργαζόμενοι σε τμήματα και δεν μπορεί να διαιρεθούν τα μηχανήματα σε τμήματα. Ωστόσο, αν έχουμε να κάνουμε με μια διαδικασία που περιλαμβάνει ένα σημαντικό αριθμό εργαζομένων ή μηχανημάτων, η υπόθεση αυτή θα αποφέρει αρκετά ακριβή αποτελέσματα και

απλουστεύει σημαντικά την ανάπτυξη και λύση του μοντέλου. Επιπλέον, η εμπειρία δείχνει ότι ακόμη και όταν οι ποσότητες θεωρούνται μικρές, αντιμετωπίζοντάς τες ως συνεχείς είναι συχνά επαρκείς για πρακτική ανάλυση.

Η υπόθεση της μη τυχαιότητας για τη ροή είναι ίσως ακόμα λιγότερο αληθής σε πολλές ρεαλιστικές συνθήκες των επιχειρήσεων. Αλλά, παραδόξως, αυτός είναι ο λόγος που μπορεί συχνά να γίνει ανάλυση των επιχειρηματικών διαδικασιών. Επειδή η αβεβαιότητα είναι τόσο ευρέως εμφανής σήμερα στις επιχειρηματικές διαδικασίες, πολλές ρεαλιστικές διαδικασίες έχουν εξελιχθεί στο να μην είναι ευαίσθητες σε αυτή. Εξαιτίας αυτού, η αβεβαιότητα μπορεί να έχει σχετικά περιορισμένο αντίκτυπο στη διαδικασία. Επιπλέον, θα θέλαμε κάθε αλλαγή που κάνουμε σε μια διαδικασία να μας δώσει κάτι που συνεχίζει να είναι σχετικά άθικτο από τυχαιότητα. Ως εκ τούτου, είναι λογικό σε πολλές αναλύσεις να υποθέσουμε ότι υπάρχει αβεβαιότητα, και στη συνέχεια, να δοκιμάσουμε τις συνέπειες των πιθανών αβεβαιοτήτων.

Η πρακτική εμπειρία δείχνει ότι με τις δύο αυτές υποθέσεις, μπορούμε ουσιαστικά να αυξήσουμε την ταχύτητα με την οποία μπορεί να αναπτυχθεί ένα μοντέλο επιχειρηματικών διαδικασιών, κατασκευάζοντας όμως παράλληλα μοντέλα που είναι χρήσιμα για τη λήψη αποφάσεων.

9.2. Προσομοίωση Επιχειρηματικών Διαδικασιών

Με τις υποθέσεις για συνεχή και ντετερμινιστική ροή, μια επιχειρηματική διαδικασία μοντελοποιείται βασικά ως ένα «υδραυλικό» σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσαμε να φανταστούμε τα αποθέματα ως δεξαμενές γεμάτες με υγρό στοιχείο, και τις ροές ως βαλβίδες, ή, ακριβέστερα, ως αντλίες που ελέγχουν το ρυθμό της ροής μεταξύ των δεξαμενών. Αυτή η ενότητα εξετάζει πώς υπολογίζονται οι εξισώσεις για κάθε απόθεμα και για κάθε ροή και πώς προσομοιώνονται οι επιχειρηματικές διαδικασίες λύνοντας αυτές τις εξισώσεις και τελικά το μοντέλο.

9.2.1. Εξισώσεις για τα αποθέματα (Stocks)

Θα εφαρμόσουμε τώρα την προσέγγιση της προσομοίωσης με τη χρήση συστημικής δυναμικής στο διάγραμμα αποθεμάτων - ροών για το παράδειγμα της διαφήμισης (Σχήμα 8.10). Για να το κάνουμε αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε κάποιο στοιχειώδη συμβολισμό λογισμού. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι χρειάζεται να είναι κανείς σε θέση να διενεργεί πράξεις λογισμού για να χρησιμοποιήσει αυτή την προσέγγιση. Υπάρχουν υπολογιστικές μέθοδοι που είναι διαθέσιμες για να κάνουν τις

απαιτούμενες πράξεις όπως ακριβώς αναλύονται παρακάτω. Η παρουσίαση των παρακάτω εξισώσεων γίνεται κυρίως για όσους επιθυμούν να αποκτήσουν μια καλύτερη κατανόηση της θεωρίας πίσω από τις μεθόδους του υπολογιστή.

Ο αριθμός των δυνητικών πελατών, ανά πάσα χρονική στιγμή t είναι ίσος με τον αριθμό των δυνητικών πελατών την ώρα έναρξης μείον τον αριθμό που ρέει έξω λόγω πωλήσεων. Εάν οι πωλήσεις μετριοούνται σε πελάτες ανά μονάδα χρόνου, και υπήρχαν αρχικά 1.000.000 πιθανοί πελάτες, τότε:

$$\text{Δυνητικοί Πελάτες} = 1.000.000 - \int_0^2 \text{πωλήσεις}(t) dt \quad (\text{Εξίσωση 9.1.})$$

Όπου υποθέτουμε ότι ο αρχικός χρόνος είναι $t = 0$, και t είναι η ψευδο-μεταβλητή ολοκλήρωσης. Ομοίως, αν υποθέσουμε ότι υπήρχαν αρχικά μηδέν πραγματικοί πελάτες, τότε:

$$\text{Πραγματικοί Πελάτες} = \int_0^2 \text{πωλήσεις} \quad (\text{Εξίσωση 9.2.})$$

Επομένως, όπως φαίνεται από αυτές τις δύο εξισώσεις, μια τέτοια δομή μπορεί να γενικευτεί για οποιοδήποτε απόθεμα: Η τιμή του αποθέματος κατά την χρονική στιγμή t είναι ίση με την αρχική αξία του αποθέματος τη χρονική στιγμή $t = 0$ συν το ολοκλήρωμα της εισερχόμενης ροής του αποθέματος μείον την εξερχόμενη ροή του αποθέματος. Παρατηρήστε ότι από τη στιγμή που έχουμε αναπτύξει ένα διάγραμμα αποθεμάτων - ροών, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 8.10β, τότε ένα πρόγραμμα υπολογιστή θα μπορούσε να προσθέσει την εξίσωση για την αξία του κάθε αποθέματος οποιαδήποτε στιγμή χωρίς να χρειάζεται να δοθούν οποιεσδήποτε πρόσθετες πληροφορίες, εκτός από την αρχική τιμή του αποθέματος. Στην πραγματικότητα, τα πακέτα προσομοίωσης συστημικής δυναμικής εισάγουν αυτόματα αυτές τις εξισώσεις.

9.2.2. Εξισώσεις για τις ροές (Flows)

Σε αντίθεση με τις εξισώσεις για τα αποθέματα, ο αναλυτής θα πρέπει από μόνος του να εισάγει τις εξισώσεις για τις ροές. Υπάρχουν πολλές πιθανές εξισώσεις για τις ροές οι οποίες είναι σύμφωνες με το διάγραμμα αποθεμάτων - ροών (Σχήμα 8.10β). Για παράδειγμα, οι πωλήσεις μπορεί να είναι ίσες με 25.000 πελάτες ανά μήνα μέχρι ο αριθμός των δυνητικών πελατών να πέσει στο μηδέν. Δηλαδή:

$$\text{πωλήσεις } (L) = \begin{cases} 25.000, & \text{δυνητικοί πελάτες } (L) > 0 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (\text{Εξίσωση 9.3.})$$

Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο θα μπορούσε να είναι ότι αν πουλάμε ένα προϊόν από τη διαφήμιση που κάνουμε στους δυνητικούς πελάτες, τότε φαίνεται πιθανό ότι κάποιος συγκεκριμένο ποσοστό δυνητικών πελατών θα αγοράσει το προϊόν κατά τη διάρκεια κάθε μονάδας χρόνου. Εάν 2,5% των δυνητικών πελατών προβεί σε αγορά κάθε μήνα, τότε η εξίσωση για τις πωλήσεις είναι:

$$\text{πωλήσεις } (L) = 0,025 \times \text{δυνητικοί πελάτες } (L) \quad (\text{Εξίσωση 9.4.})$$

Παρατηρήστε ότι με την εξίσωση αυτή η αρχική αξία των πωλήσεων θα είναι ίση με 25.000 πελάτες ανά μήνα.

9.2.3. Λύνοντας τις εξισώσεις

Αν είστε εξοικειωμένοι με την επίλυση διαφορικών εξισώσεων, τότε μπορείτε να λύσετε τις εξισώσεις 9.1. και 9.2. σε συνδυασμό είτε με την εξίσωση 9.3. είτε με την 9.4. για να αναπτυχθεί ένα γράφημα των δυνητικών πελατών στην πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, γρήγορα γίνεται ανέφικτο να λυθούν τέτοιες εξισώσεις με το χέρι καθώς είτε ο αριθμός των αποθεμάτων και των ροών αυξάνεται, ή οι εξισώσεις για τα αποθέματα είναι πιο σύνθετες από αυτές των εξισώσεων 9.3. και 9.4. Έτσι, οι μέθοδοι λύσης στον υπολογιστή χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα.

Ας δούμε τώρα πώς γίνεται αυτό με τη χρήση του πακέτου προσομοίωσης Vensim (μια πιο αναλυτική παρουσίαση του πακέτου γίνεται σε επόμενο Κεφάλαιο). Με αυτό το πακέτο, όπως συμβαίνει και με τα περισσότερα πακέτα προσομοίωσης συστημικής δυναμικής που βασίζονται στον υπολογιστή, ο αναλυτής ξεκινάει με την προσθήκη ενός διαγράμματος αποθεμάτων - ροών για το μοντέλο. Στην πραγματικότητα, το διάγραμμα αποθεμάτων - ροών που φαίνεται στο Σχήμα 8.10β δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το Vensim. Έπειτα εισάγονται οι αρχικές τιμές για τα διάφορα αποθέματα στο μοντέλο, καθώς επίσης και οι εξισώσεις για τις ροές. Μόλις γίνει αυτό, τότε δίνεται η εντολή στο σύστημα για να λύσει το σύνολο εξισώσεων. Αυτή η διαδικασία λύσης είναι ουσιαστικά η προσομοίωση, και το αποτέλεσμα είναι η αναπαράσταση των μεταβλητών στην πάροδο του χρόνου είτε σε γραφική απεικόνιση είτε σε μορφή πίνακα.

Το Σχήμα 9.1. παρουσιάζει τις εξισώσεις στο Vensim για το μοντέλο, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 9.1. και 9.2. για τα δύο αποθέματα, και είτε την εξίσωση 9.3. (στο Σχήμα 9.1α) ή την εξίσωση 9.4. (στο Σχήμα 9.1β) για τη ροή των πωλήσεων. Αυτές οι εξισώσεις αριθμούνται και παρατίθενται με αλφαβητική σειρά.

Σημειώστε ότι η εξίσωση 9.1. είτε στο Σχήμα 9.1α ή 9.1β αντιστοιχεί στην εξίσωση 9.2 & η εξίσωση 9.4. είτε στο Σχήμα 9.1α ή 9.1β αντιστοιχεί στην εξίσωση 9.1. Αυτές είναι οι εξισώσεις για τις δύο μεταβλητές αποθέματος στο μοντέλο. Ο συμβολισμός γι' αυτά είναι απλός. Το όνομα της συνάρτησης INTEG αντιστοιχεί στην ολοκλήρωση και έχει δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα περιλαμβάνει τις ροές στο απόθεμα, όπου οι εξερχόμενες ροές εισάγονται με αρνητικό πρόσημο. Η δεύτερη συνιστώσα δίνει την αρχική αξία του αποθέματος.

Η εξίσωση 5 στο Σχήμα 9.1α αντιστοιχεί στην εξίσωση 9.3. & η εξίσωση 5 στο Σχήμα 9.1β αντιστοιχεί στην εξίσωση 9.4. Αυτές οι εξισώσεις είναι για την μεταβλητή ροής του μοντέλου και η κάθε μια είναι μια απλή μετάφραση της αντίστοιχης μαθηματικής εξίσωσης.

Η εξίσωση 3 είτε στο Σχήμα 9.1α ή 9.1β ορίζει το κατώτατο όριο για τα ολοκληρώματα. Έτσι, η εξίσωση INITIAL TIME = 0 αντιστοιχεί στα κατώτερα όρια του $t = 0$ στις εξισώσεις 9.1 και 9.2.

Η εξίσωση 2 είτε στο Σχήμα 9.1α ή 9.1β καθορίζει το τελευταίο διάστημα για το οποίο η προσομοίωση θα τρέξει. Έτσι, με FINAL TIME = 100, οι τιμές των διαφόρων μεταβλητών θα υπολογίζονται από την INITIAL TIME (που είναι μηδέν) έως το 100 (δηλαδή, $t = 100$).

Οι εξισώσεις 6 και 7 είτε στο Σχήμα 9.1α ή 9.1β θέτουν τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας προσομοίωσης.

- (1) Πραγματικοί Πελάτες= INTEG (πωλήσεις,0)
- (2) FINAL TIME = 100
- (3) INITIAL TIME = 0
- (4) Δυνητικοί Πελάτες= INTEG (-πωλήσεις,1e+006)
- (5) πωλήσεις= IF THEN ELSE(Δυνητικοί Πελάτες>0, 25000 , 0)
- (6) SAVEPER = TIME STEP
- (7) TIME STEP = 1

α. Εξισώσεις με σταθερές πωλήσεις

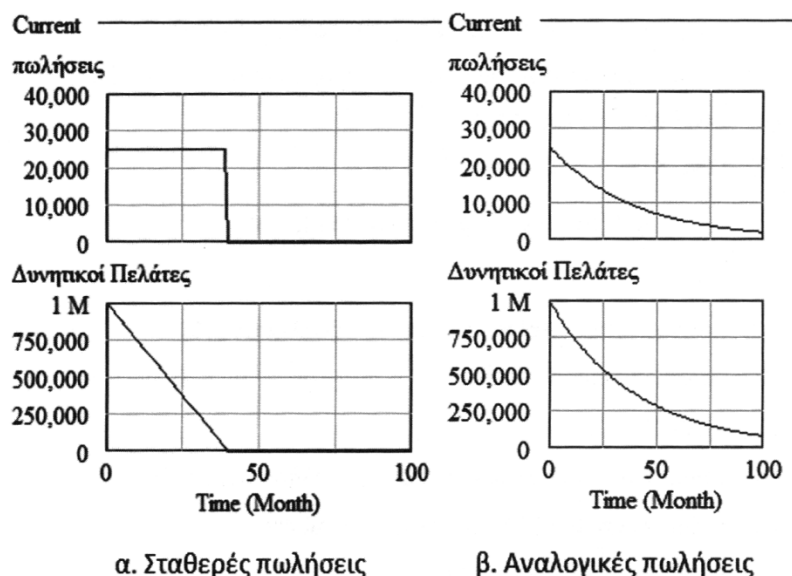
- (1) Πραγματικοί Πελάτες= INTEG (πωλήσεις,0)
- (2) FINAL TIME = 100
- (3) INITIAL TIME = 0
- (4) Δυνητικοί Πελάτες= INTEG (-πωλήσεις,1e+006)
- (5) πωλήσεις= 0.025*Δυνητικοί Πελάτες
- (6) SAVEPER = TIME STEP
- (7) TIME STEP = 1

β. Εξισώσεις με αναλογικές πωλήσεις

Σχήμα 9.1. Εξισώσεις για το Μοντέλο της Διαφήμισης στο Vensim

9.2.4. Λύνοντας το μοντέλο

Οι μεταβλητές των πωλήσεων και των δυνητικών πελατών στην πάροδο του χρόνου εμφανίζονται στο Σχήμα 9.2.



Σχήμα 9.2. Χρονοσειρές των πωλήσεων και των Δυνητικών Πελατών

Οι γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 9.2α παρήχθησαν με τη χρήση των εξισώσεων του Σχήματος 9.1α, και οι γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 9.2β παρήχθησαν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Σχήματος 9.1β.

Βλέπουμε από το Σχήμα 9.2α ότι οι πωλήσεις παραμένουν στους 25.000 πελάτες το μήνα έως ότου όλοι οι δυνητικοί πελάτες να εξαντληθούν στο χρόνο $t = 40$. Στη συνέχεια, οι πωλήσεις πέφτουν στο μηδέν. Οι δυνητικοί πελάτες μειώνονται γραμμικά από την αρχική τιμή του 1.000.000 στο μηδέν τη χρονική στιγμή $t = 40$.

Στο Σχήμα 9.2β, οι πωλήσεις μειώνονται με έναν εκθετικό τρόπο από την αρχική τιμή των 25.000 και ομοίως οι δυνητικοί πελάτες επίσης μειώνονται εκθετικά. (Στην πραγματικότητα, μπορεί να αποδειχθεί ότι αυτές οι δύο καμπύλες είναι ακριβώς εκθετικές).

9.2.5 Μερικές επιπλέον παρατηρήσεις σε σχέση με τη σημειογραφία

Στο διάγραμμα αποθεμάτων - ροών του Σχήματος 8.10β, οι δύο μεταβλητές αποθεμάτων Δυνητικοί Πελάτες και Πραγματικοί Πελάτες είναι γραμμένες με τα αρχικά γράμματα κεφαλαία. Αυτή είναι μια συνιστώμενη πρακτική. Ομοίως, η ροή πωλήσεις είναι γραμμένη με όλα τα γράμματα μικρά, και αυτή είναι μια συνιστώμενη πρακτική.

Ενώ οι μεταβλητές αποθεμάτων-ροών είναι όλα όσα χρειαζόμαστε για τη δημιουργία ενός διαγράμματος αποθεμάτων - ροών, είναι συχνά χρήσιμο να εισαγάγει κανείς επιπρόσθετες μεταβλητές για να αποσαφηνιστεί καλύτερα το μοντέλο μιας διαδικασίας. Για παράδειγμα, σε ένα διάγραμμα αποθεμάτων - ροών για το μοντέλο του Σχήματος 8.10β, μπορεί να έχει νόημα να εισάγουμε μια ξεχωριστή μεταβλητή για το κλάσμα των πωλήσεων (που δόθηκε ως 0,025 στην εξίσωση 9.4). Αυτό θα μπορούσε να αποσαφηνίσει τη δομή του μοντέλου, και να επιταχύνει επίσης την ανάλυση ευαισθησίας στα περισσότερα συστήματα προσομοίωσης συστημικής δυναμικής.

Οι συμπληρωματικές αυτές μεταβλητές ονομάζονται βοηθητικές μεταβλητές (auxiliary). Συνιστάται μία βοηθητική μεταβλητή να είναι γραμμένη με όλα τα γράμματα κεφαλαία αν είναι μια σταθερά. Διαφορετικά, θα πρέπει να είναι γραμμένη με όλα τα γράμματα μικρά ακριβώς όπως μια μεταβλητή ροής, εκτός από μια ειδική περίπτωση. Αυτή είναι η περίπτωση που η μεταβλητή δεν είναι σταθερή, αλλά είναι μια προκαθορισμένη συνάρτηση του χρόνου. Στην περίπτωση αυτή, το όνομα της μεταβλητής πρέπει να γραφτεί με τα τρία πρώτα γράμματα κεφαλαία και τα υπόλοιπα μικρά.

Αυτή η σημειογραφία μας επιτρέπει να προσδιορίζουμε γρήγορα τα σημαντικά χαρακτηριστικά μιας μεταβλητής σε ένα διάγραμμα αποθεμάτων - ροών χωρίς να χρειάζεται να εξετάσουμε τις εξισώσεις καθόλου.

9.3. Βασικές Δομές Ανάδρασης

Αυτή η ενότητα εξετάζει κάποιους βασικούς τύπους συμπεριφοράς για τις επιχειρηματικές διαδικασίες και παρουσιάζει τις δομές που μπορούν να δημιουργήσουν αυτές τις συμπεριφορές. Πολλά ενδιαφέροντα πρότυπα συμπεριφοράς προκαλούνται, τουλάχιστον εν μέρει, από την ανάδραση, που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο οι αλλαγές στην τιμή μιας μεταβλητής έμμεσα επηρεάζουν τις τιμές της ίδιας μεταβλητής στο μέλλον. Τα διαγράμματα Σχέσεων Αιτίας/Αιτιατού (Causal Loop Diagrams) (Richardson Pugh και 1981, Senge 1990) είναι ένας τρόπος γραφικής αναπαράστασης των δομών ανάδρασης σε μια επιχειρηματική διαδικασία με τα οποία είμαστε ήδη εξοικειωμένοι από το προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν μόνο τις πιθανές μορφές συμπεριφοράς για μια

διαδικασία. Με την ανάπτυξη ενός διαγράμματος αποθεμάτων-ροών και τις αντίστοιχες εξισώσεις του μοντέλου, είναι επιπλέον δυνατόν να εκτιμηθεί η πραγματική συμπεριφορά για τη διαδικασία. Το Σχήμα 8.3. του προηγούμενου κεφαλαίου απεικονίζει τους τέσσερις βασικούς τύπους συμπεριφοράς για τις μεταβλητές μιας διαδικασίας, οι οποίοι εμφανίζονται μεμονωμένα ή σε συνδυασμό και επομένως είναι χρήσιμο να κατανοήσουμε πιο αναλυτικά το είδος των δομών της διαδικασίας που οδηγεί συνήθως σε κάθε μοτίβο.

9.3.1. Εκθετική ανάπτυξη (exponential growth)

Η εκθετική ανάπτυξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3α, είναι ένας τύπος συμπεριφοράς όπου κάποια ποσότητα «αυτοτροφοδοτείται» για τη δημιουργία ολοένα αυξανόμενης ανάπτυξης.

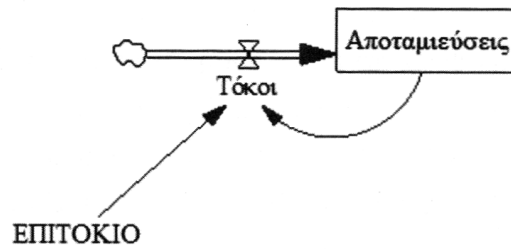
Το Σχήμα 9.3. δείχνει ένα τυπικό παράδειγμα, την αύξηση των αποταμιεύσεων ή της αποταμίευσης λόγω ανατοκισμού. Στην περίπτωση αυτή, η αύξηση των εσόδων από τόκους έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των αποταμιεύσεων, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε μεγαλύτερους τόκους, επειδή τα έσοδα από τους τόκους είναι ανάλογα με το επίπεδο της αποταμίευσης, όπως φαίνεται και στην εξίσωση 3 του σχήματος 9.3β.

Το Σχήμα 9.3c δείχνει την χαρακτηριστική καμπυλωτή προς τα πάνω γραμμή που συνδέεται με τη δομή αυτής της διαδικασίας. Αυτό αναφέρεται ως «εκθετική» καμπύλη επειδή μπορεί να αποδειχθεί ότι ακολουθεί την εξίσωση της εκθετικής συνάρτησης. (Θυμηθείτε ότι το «σύννεφο» στην αριστερή πλευρά του Σχήματος 9.3α σημαίνει ότι δεν μοντελοποιούμε ρητά την πηγή των τόκων).

Ενώ είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τυποποιημένες μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων για τις μεταβλητές σε αυτό το μοντέλο, δεν θα το κάνουμε αυτό, επειδή η δομή αυτή είναι συνήθως μόνο ένα συστατικό στοιχείο μιας πιο πολύπλοκης διαδικασίας σε ρεαλιστικές συνθήκες. Τα μοντέλα αυτά σε πιο πολύπλοκες διαδικασίες συνήθως δεν μπορούν να λυθούν σε μια κλειστή μορφή, και ως εκ τούτου έχουμε δείξει τις εξισώσεις στο λογισμικό Vensim που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση σε αυτό το μοντέλο στο Σχήμα 9.3β.

Το Σχήμα 9.3d δείχνει ένα άλλο χαρακτηριστικό του τύπου της εκθετικής ανάπτυξης. Σε αυτό το διάγραμμα, η υπό εξέταση χρονική περίοδος έχει επεκταθεί σε 200 χρόνια. Όταν γίνει αυτό, βλέπουμε ότι η εκθετική ανάπτυξη πάνω από ένα

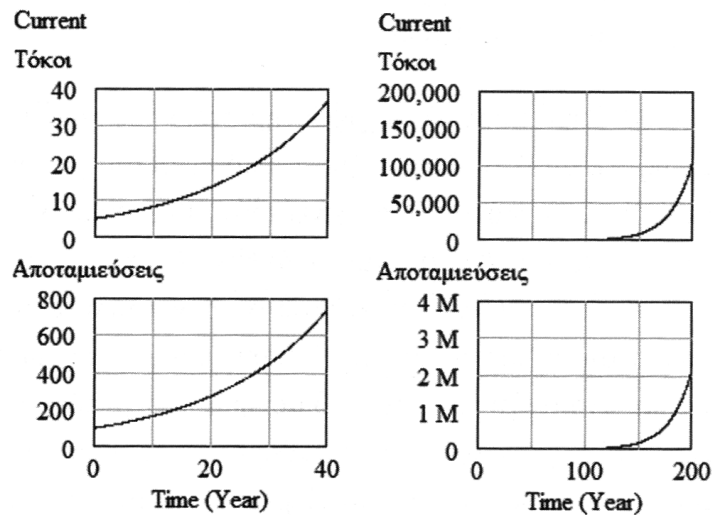
παρατεταμένο χρονικό διάστημα εμφανίζει ένα φαινόμενο όπου φαίνεται να μην υπάρχει σχεδόν καμία αύξηση για μια περίοδο, και στη συνέχεια η ανάπτυξη να εκρήγνυται. Αυτό συμβαίνει γιατί με την εκθετική ανάπτυξη το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να διπλασιαστεί η τιμή της αυξανόμενης μεταβλητής (που ονομάζεται «χρόνος διπλασιασμού») είναι μια σταθερά, ανεξάρτητα από το τρέχον επίπεδο της μεταβλητής. Έτσι, όσο χρονικό διάστημα θα πάρει για τη μεταβλητή να διπλασιαστεί από το 1 στο 2, άλλο τόσο θα πάρει να διπλασιαστεί από το 1.000 στο 2.000, ή από το 1.000.000 στα 2.000.000. Ως εκ τούτου, ενώ οι μεταβλητές στο Σχήμα 9.3d αυξάνονται με σταθερό εκθετικό ρυθμό κατά τη διάρκεια των 200 ετών, λόγω της μεγάλης κάθετης κλίμακας που απαιτείται για τη γραφική παράσταση προκειμένου να φανούν οι τιμές στο τέλος της περιόδου, δεν είναι δυνατόν να φανεί η αύξηση κατά το πρώτο μέρος της περιόδου.



α. Διάγραμμα στο Vensim

- (1) FINAL TIME = 40
- (2) INITIAL TIME = 0
- (3) Τόκοι= ΕΠΙΤΟΚΙΟ*Αποταμιεύσεις
- (4) ΕΠΙΤΟΚΙΟ= 0.05
- (5) SAVERPER = TIME STEP
- (6) Αποταμιεύσεις= INTEG (Τόκοι, 100)
- (7) TIME STEP = 0.0625

β. Εξισώσεις στο Vensim



γ. Χρονικός ορίζοντας
40 χρόνων

δ. Χρονικός ορίζοντας
200 χρόνων

Σχήμα 9.3. Διαδικασία Εκθετικής Ανάπτυξης

9.3.2. Αναζήτηση στόχου (goal seeking)

Το Σχήμα 8.3β εμφανίζει τον τύπο αναζήτησης στόχου κατά τον οποίο η μεταβλητή μιας διαδικασίας καθοδηγείται από μια συγκεκριμένη τιμή. Το Σχήμα 9.4. παρουσιάζει μια διαδικασία που εμφανίζει αυτή τη συμπεριφορά. Καθώς οι τρέχουσες πωλήσεις αλλάζουν, το μέσο επίπεδο των πωλήσεων κινείται ώστε να γίνει το ίδιο με τις τρέχουσες πωλήσεις. Ωστόσο, κινείται ομαλά από την παλιά τιμή στην τρέχουσα αξία των πωλήσεων, και αυτή είναι και η προέλευση της ονομασίας Μέσες Πωλήσεις για αυτή τη μεταβλητή.

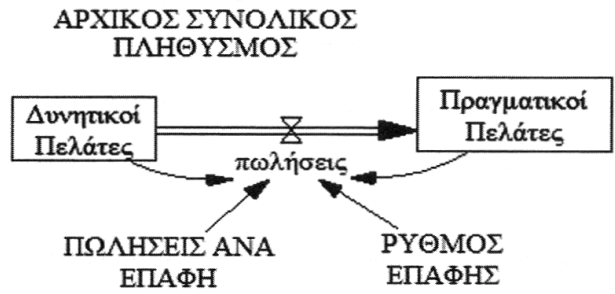
Το Σχήμα 9.4c και το Σχήμα 9.4d δείχνουν τι συμβαίνει όταν οι Τρέχουσες πωλήσεις αυξάνονται προς τα πάνω (στο Σχήμα 9.4c) ή προς τα κάτω (στο Σχήμα 9.4d). Αν και είναι κάπως δύσκολο να το δει κανείς σε αυτές τις γραφικές παραστάσεις, οι Τρέχουσες πωλήσεις αναπαριστώνται με μια σταθερή γραμμή που φτάνει στο χρόνο 10. Μέχρι τότε, οι Μέσες Πωλήσεις είναι ίδιες με τις Τρέχουσες πωλήσεις, και μετά αποκλίνουν, δεδομένου ότι χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα ώστε οι Μέσες Πωλήσεις να κινηθούν ομαλά και να φτάσουν πάλι στο ίδιο επίπεδο με τις Τρέχουσες πωλήσεις.

Η Εξίσωση 3 στο Σχήμα 9.4b δείχνει την διαδικασία που οδηγεί τις Μέσες Πωλήσεις στην αξία των τρεχουσών Πωλήσεων. Εάν οι Μέσες Πωλήσεις είναι κάτω από τις Τρέχουσες Πωλήσεις, τότε υπάρχει ροή προς τις Μέσες Πωλήσεις, ενώ αν οι Μέσες Πωλήσεις είναι πάνω από τις Τρέχουσες Πωλήσεις, τότε δεν υπάρχει εξερχόμενη ροή από τις Μέσες Πωλήσεις. Σε κάθε περίπτωση, η ροή συνεχίζεται για όσο διάστημα οι Μέσες Πωλήσεις διαφέρουν από τις Τρέχουσες Πωλήσεις.

Ο ρυθμός με τον οποίο εμφανίζεται η ροή εξαρτάται από τη σταθερά ΧΡΟΝΟΣ ΜΕΣΟΥ ΟΡΟΥ. Όσο μεγαλύτερη είναι η αξία αυτής της σταθεράς, τόσο πιο αργή είναι η εισερχόμενη ή εξερχόμενη ροή προς ή από τις Μέσες Πωλήσεις, και ως εκ τούτου, τόσο περισσότερος χρόνος χρειάζεται για να φτάσουν οι Μέσες Πωλήσεις τις Τρέχουσες Πωλήσεις.

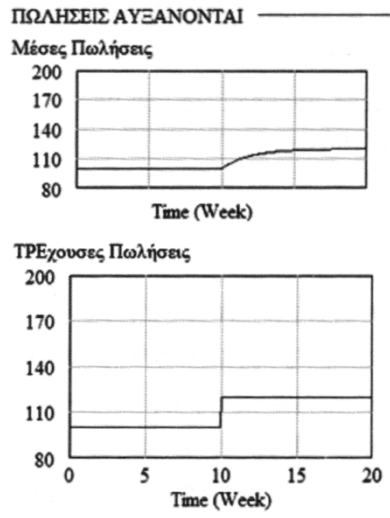
Είναι δυνατόν λύνοντας τις εξισώσεις για μια διαδικασία που ακολουθεί τον τύπο αναζήτησης στόχου να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση της καμπύλης της μεταβλητής που κινείται προς έναν στόχο (Μέσες Πωλήσεις στο Σχήμα 9.4) έχει εκθετική μορφή. Ωστόσο, όπως με την εκθετική ανάπτυξη, μια διαδικασία που επιδιώκει σε ένα στόχο είναι συχνά μόνο ένα μέρος μιας ευρύτερης διαδικασίας για την οποία δεν είναι δυνατόν να παραχθεί μια απλή λύση, και έτσι είναι απαραίτητες οι εξισώσεις προσομοίωσης για τη διαδικασία αυτή.

Παρατηρήστε ότι η διαδικασία που φαίνεται στο Σχήμα 9.4 είναι μια διαδικασία αρνητικής ανάδρασης. Καθώς η τιμή της αλλαγής στο μέσο όρο πωλήσεων αυξάνει, αυτό προκαλεί μια αύξηση της τιμής των μέσων πωλήσεων, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε μείωση της τιμής της αλλαγής στο μέσο όρο πωλήσεων.

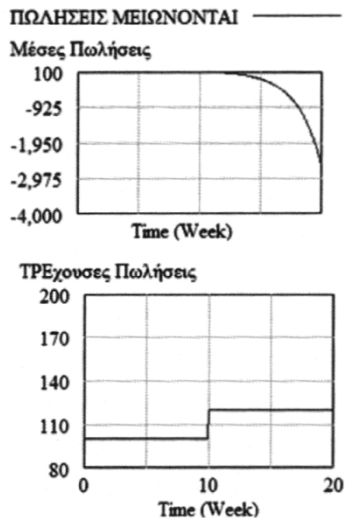


α. Διάγραμμα αποθεμάτων - ροών

- (01) Πραγματικοί Πελάτες= INTEG (πωλήσεις,10)
- (02) ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ= 0.02
- (03) FINAL TIME = 10
- (04) INITIAL TIME = 0
- (05) Δυνητικοί Πελάτες= INTEG (-πωλήσεις, ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ-Πραγματικοί Πελάτες)
- (06) πωλήσεις= ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ*ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ*Δυνητικοί Πελάτες*Πραγματικοί Πελάτες
- (07) ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ= 0.1
- (08) SAVERPER = TIME STEP
- (09) TIME STEP = 0.0625
- (10) ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ= 500



c. Πωλήσεις αυξάνονται



d. Πωλήσεις μειώνονται

Σχήμα 9.4. Διαδικασία αναζήτησης στόχου

9.3.3. Σιγμοειδής ανάπτυξη (S-shaped growth)

Η εκθετική ανάπτυξη μπορεί να είναι ενδιαφέρουσα, αν συμβαίνει κάτι που σχετίζεται με χρήματα. Οι μελλοντικές προοπτικές μπορεί να φαίνονται ατέλειωτα αισιόδοξες, με τα πράγματα να ακολουθούν ένα συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό. Ωστόσο, υπάρχουν

συνήθως περιορισμοί σε αυτήν την αύξηση που κρύβονται κάπου στο βάθος, και όταν αυτοί αποκτήσουν δύναμη, η εκθετική ανάπτυξη μετατρέπεται σε συμπεριφορά αναζήτησης στόχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.3c.

Το Σχήμα 9.5. δείχνει τη δομή της επιχειρηματικής διαδικασίας που μπορεί να οδηγήσει σε συμπεριφορά τύπου σιγμοειδούς ανάπτυξης. Αυτό δείχνει μια πιθανή δομή για την πώληση κάποιου είδους διαρκούς αγαθού για το οποίο η επικοινωνία «από στόμα σε στόμα» από τους σημερινούς χρήστες είναι η πηγή των νέων πωλήσεων. Αυτό ονομάζεται μοντέλο μετάδοσης των πωλήσεων, δηλαδή το να είναι κανείς χρήστης του προϊόντος και να μεταδίδει την αγοραστική του εμπειρία σε άλλους ανθρώπους. Υποθέτουμε ότι υπάρχει ένας ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ δυνητικών πελατών για το προϊόν. (Αυτό είναι το όριο που θα σταματήσει τελικά η ανάπτυξη σε Πραγματικούς Πελάτες). Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, υπάρχει ένα σύνολο Δυνητικών Πελατών οι οποίοι δεν έχουν αγοράσει ακόμα το προϊόν.

Φανταστείτε τη διαδικασία όπου κάποιος από τους Δυνητικούς Πελάτες μετατρέπεται σε ένα Πραγματικό Πελάτη ως εξής: Οι δύο ομάδες ανθρώπων οι οποίοι ανήκουν στο δυναμικό της ομάδας Πραγματικών Πελατών και στο δυναμικό της ομάδας Δυνητικών Πελατών κυκλοφορούν μεταξύ του μεγαλύτερου γενικού πληθυσμού και από καιρό σε καιρό έρχονται σε επαφή. Όταν έρχονται σε επαφή, υπάρχει κάποια πιθανότητα η γνώμη που έχει ένα πρόσωπο που είναι πραγματικός πελάτης να επηρεάσει ένα πρόσωπο που ανήκει στους δυνητικούς πελάτες να αγοράσει το προϊόν.

Το μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 9.5. υποθέτει ότι για κάθε τέτοια επαφή μεταξύ ενός ατόμου που ανήκει στους Πραγματικούς Πελάτες και ενός ατόμου που ανήκει στον «ευπαθή» πληθυσμό, υπάρχει ένας αριθμός πωλήσεων ίσος με τις ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ, ο οποίος πιθανότατα θα είναι λιγότερο από ένας σε ρεαλιστικές συνθήκες. Ο αριθμός των πωλήσεων στη μονάδα του χρόνου θα είναι ίσος με τις ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ επί τον αριθμό των επαφών των ανθρώπων ανάμεσα στις δύο ομάδες στη μονάδα του χρόνου. Αλλά υποθέτοντας τυχαίες επαφές μεταξύ των προσώπων στις δύο ομάδες, ο αριθμός των επαφών στη μονάδα του χρόνου θα είναι ανάλογος τόσο για τους Πραγματικούς Πελάτες όσο και για τους Δυνητικούς Πελάτες. Ως εκ τούτου, οι πωλήσεις είναι ανάλογες με το προϊόν των Πραγματικών Πελατών και των Δυνητικών Πελατών. Η σταθερά της αναλογίας ονομάζεται

ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ στο Σχήμα 9.5., και αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επαφών στη μονάδα του χρόνου όταν κάθε μία από τις δύο ομάδες έχει μέγεθος ίσο με ένα. (Δηλαδή, είναι ο αριθμός των επαφών στη μονάδα χρόνου μεταξύ οποιουδήποτε συγκεκριμένου μέλους του συνόλου των Πραγματικών Πελατών και οποιουδήποτε συγκεκριμένου μέλους του συνόλου των Δυνητικών Πελατών).

Το επιχείρημα στην τελευταία παράγραφο για μια πολλαπλασιαστική μορφή για την εξίσωση των πωλήσεων (όπως φαίνεται στην εξίσωση 6 του Σχήματος 9.5β) ήταν κάπως ανεπίσημο. Ένα πιο τυπικό επιχείρημα μπορεί να υπάρξει χρησιμοποιώντας τη θεωρία πιθανοτήτων. Επιλέγουμε ένα αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε το πολύ μία επαφή να μπορεί να προκύψει μεταξύ οποιωνδήποτε προσώπων του συνόλου των Πραγματικών Πελατών και του συνόλου των Δυνητικών Πελατών, ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλα είναι αυτά τα σύνολα. Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι η πιθανότητα να έρθει σε επαφή ένα οποιονδήποτε μέλος του ενός συνόλου με ένα άτομο του άλλου συνόλου κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου είναι κάποιος (απροσδιόριστος) αριθμός ρ . Στη συνέχεια, αν αυτή η πιθανότητα είναι αρκετά μικρή (το οποίο μπορούμε να το πετύχουμε μειώνοντας τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου), τότε η πιθανότητα ότι το συγκεκριμένο μέλος του συνόλου των Πραγματικών Πελατών να έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε μέλος του ευπαθούς πληθυσμού είναι ίση με ρ επί τους Δυνητικούς Πελάτες.

Υποθέτοντας ότι η πιθανότητα αυτή είναι αρκετά μικρή για κάθε μεμονωμένο μέλος του πληθυσμού των Πραγματικών Πελατών, τότε η πιθανότητα να έρθει σε επαφή οποιοδήποτε μέλος του πληθυσμού των Πραγματικών Πελατών με κάποιο μέλος του πληθυσμού των Δυνητικών Πελατών είναι ακριβώς αυτή η πιθανότητα επί τον αριθμό των μελών του πληθυσμού των Πραγματικών Πελατών ή:

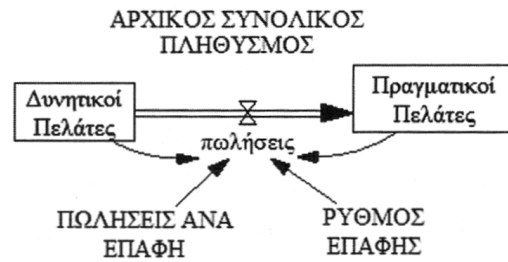
$$\rho \times \text{ευπαθής πληθυσμός} \times \text{Πραγματικοί Πελάτες}$$

Αν υποθέσουμε ότι η διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο πληθυσμών είναι μια διαδικασία Poisson και η πιθανότητα μιας επιτυχημένης αλληλεπίδρασης (δηλαδή, μια πώληση) είναι σταθερή, τότε η διαδικασία της πώλησης είναι μια τυχαία διαδικασία διαγραφής σε μια διαδικασία Poisson και ως εκ τούτου, είναι επίσης μια διαδικασία Poisson. Έτσι, ο αναμενόμενος αριθμός των πωλήσεων στη μονάδα του χρόνου είναι ανάλογος με την έκφραση της παραπάνω πιθανότητας, και ως εκ

τούτου, το προϊόν των Πραγματικών Πελατών και του ευπαθή πληθυσμού. Αυτό εκφράζεται στην εξίσωση 6 του Σχήματος 9.5β.

Το Σχήμα 9.5c δείχνει το γράφημα που προκύπτει για τον αριθμό των πραγματικών πελατών, καθώς και τις πωλήσεις. Αυτό το σιγμοειδές μοτίβο εμφανίζεται σε πολλά νέα προϊόντα. Στην αρχή η διαδικασία μεγαλώνει εκθετικά, και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Οι πωλήσεις επίσης αυξάνουν εκθετικά για λίγο, και στη συνέχεια μειώνονται. Αυτό μπορεί να είναι μια δύσκολη διαδικασία για να τη διαχειριστεί κανείς, διότι το όριο στην ανάπτυξη δεν είναι προφανές, ενώ συχνά η εκθετική ανάπτυξη βρίσκεται σε εξέλιξη. Για παράδειγμα, όταν εισάγεται ένα νέο καταναλωτικό προϊόν, όπως μια συσκευή αναπαραγωγής δίσκων, ποιος είναι ο ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ των πιθανών πελατών για το προϊόν; Η διαφορά μεταξύ ενός προϊόντος με τεράστια επιτυχία, όπως η συσκευή αναπαραγωγής δίσκων και ενός αποτυχημένου προϊόντος όπως ένα τετραφωνικό ηχητικό σύστημα υψηλής πιστότητας μπορεί να είναι δύσκολο να προβλεφθούν.

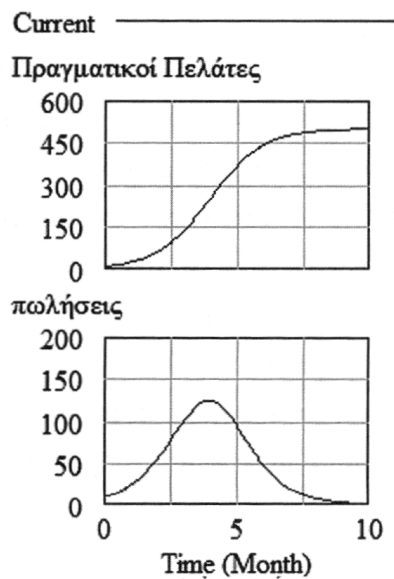
Σημειώστε ότι υπάρχουν δύο βρόγχοι ανάδρασης, ένας θετικός και ένας αρνητικός, οι οποίοι περιλαμβάνουν τη μεταβλητή των πωλήσεων στο διάγραμμα του Σχήματος 9.5α. Ο θετικός βρόγχος περιλαμβάνει τις πωλήσεις και τους Πραγματικούς Πελάτες. Ο αρνητικός βρόγχος περιλαμβάνει τις πωλήσεις και τους Δυνητικούς Πελάτες. Στην αρχή ο βρόγχος θετικής ανάδρασης κυριαρχεί, αλλά στη συνέχεια έρχεται να επικρατήσει ο βρόγχος της αρνητικής ανάδρασης. (Υπάρχει και μια άλλη ανάδραση από την αρχική κατάσταση στους Δυνητικούς Πελάτες, η οποία εξαρτάται από τους Πραγματικούς Πελάτες. Ωστόσο, αυτό παύει να ισχύει όταν αρχίζει να τρέχει η διαδικασία).



α. Διάγραμμα αποθεμάτων-ροών

- (01) Πραγματικοί Πελάτες= INTEG (πωλήσεις,10)
- (02) ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ= 0.02
- (03) FINAL TIME = 10
- (04) INITIAL TIME = 0
- (05) Δυνητικοί Πελάτες= INTEG (-πωλήσεις, ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ-πραγματικοί Πελάτες)
- (06) πωλήσεις= ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ*ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ*Δυνητικοί Πελάτες*Πραγματικοί Πελάτες
- (07) ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ= 0.1
- (08) SAVERPER = TIME STEP
- (09) TIME STEP = 0.0625
- (10) ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ= 500

β. Εξισώσεις στο Vensim



γ. Απόδοση πωλήσεων και Πραγματικών Πελατών

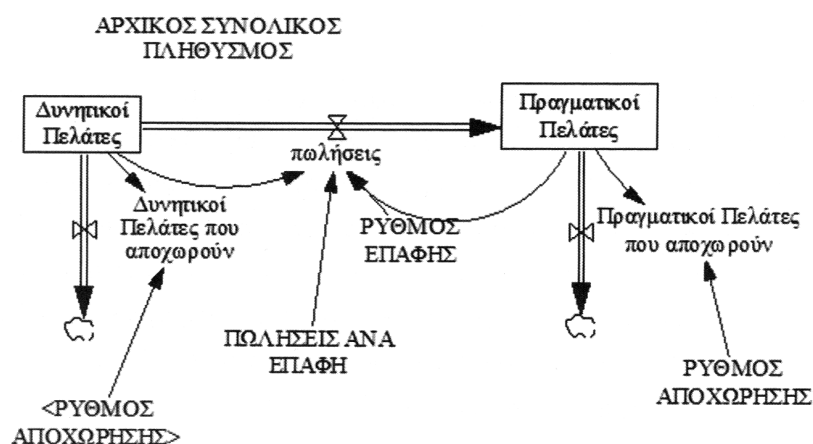
Σχήμα 9.5. Διαδικασία Σιγμοειδής Ανάπτυξης

9.3.4. Σιγμοειδής ανάπτυξη με πτώση (S-shaped Growth Followed by Decline)

Το Σχήμα 9.6. παρουσιάζει ένα μοντέλο για μια παραλλαγή της σιγμοειδής ανάπτυξης όπου η μεταβλητή αφού σταθεροποιείται έπειτα ακολουθείται από πτώση. Στη διαδικασία αυτή, θεωρείται ότι μερικοί Πραγματικοί Πελάτες και μερικοί Δυνητικοί Πελάτες εγκαταλείπουν τη διαδικασία οριστικά. Μια τέτοιου είδους συμπεριφορά θα

μπορούσε να έχει νόημα για μια νέα μόδα για ένα διαρκές αγαθό που εμφανίζεται στην αγορά. Σε μια τέτοια περίπτωση, μπορεί να υπάρχει ένα μεγάλο ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ των Δυνητικών Πελατών, αλλά κάποιοι από αυτούς που αγοράζουν το προϊόν και γίνονται Πραγματικοί Πελάτες μπορεί να χάσουν τελικά το ενδιαφέρον για το προϊόν και παύουν πλέον να το επικοινωνούν με Δυνητικούς Πελάτες. Αντίστοιχα μερικοί Δυνητικοί Πελάτες χάνουν το ενδιαφέρον τους πριν ακόμα έρθουν σε επαφή με τους Πραγματικούς Πελάτες. Σταδιακά τόσο οι πωλήσεις όσο και η χρήση του προϊόντος θα μειωθεί.

Στην εξίσωση 5 του Σχήματος 9.6., η διαδικασία της εγκατάλειψης τόσο για τους Δυνητικούς Πελάτες όσο και για τους Πραγματικούς Πελάτες εμφανίζονται ως διαδικασίες ανάποδης εκθετικής ανάπτυξης. Δηλαδή, ο αριθμός των Πραγματικών Πελατών που φεύγουν είναι ανάλογος με τον αριθμό των Πραγματικών Πελατών και όχι με τον αριθμό αυτών που έρχονται, όπως συμβαίνει στον τύπο συμπεριφοράς της εκθετικής ανάπτυξης. Ομοίως, ο αριθμός των Δυνητικών Πελατών που φεύγουν είναι ανάλογος με τον αριθμό των Δυνητικών Πελατών. Αυτός ο τύπος αναχώρησης μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως μια διαδικασία εξισορρόπησης με στόχο το μηδέν, και μερικές φορές ονομάζεται εκθετική μείωση ή εκθετική αποσύνθεση. Από το Σχήμα 9.6c, βλέπουμε ότι αυτή η εκθετική μείωση οδηγεί τελικά σε μείωση του αριθμού των Πραγματικών Πελατών.



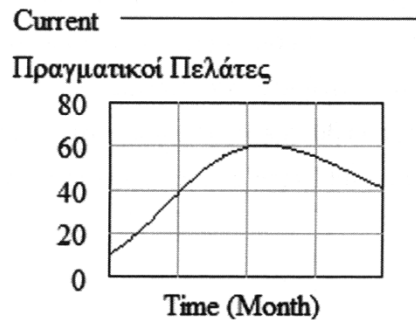
α. Διάγραμμα αποθεμάτων-ροών

```

(01) Πραγματικοί Πελάτες που αποχωρούν= ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΧΩΡΗΣΗΣ*Πραγματικοί Πελάτες
(02) Πραγματικοί Πελάτες= INTEG (πωλήσεις-Πραγματικοί Πελάτες που αποχωρούν, 10)
(03) ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ= 0.02
(04) FINAL TIME = 10
(05) INITIAL TIME = 0
(06) ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ= 500
(07) Δυνητικοί Πελάτες που αποχωρούν= ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΧΩΡΗΣΗΣ 0*Δυνητικοί Πελάτες
(08) Δυνητικοί Πελάτες= INTEG (-Δυνητικοί Πελάτες που αποχωρούν-πωλήσεις
,ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ-Πραγματικοί Πελάτες)
(09) ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΧΩΡΗΣΗΣ= 0.2
(10) πωλήσεις= ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ*ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΑΦΗΣ*Δυνητικοί Πελάτες*πραγματικοί Πελάτες
(11) ΠΩΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΕΠΑΦΗ= 0.1
(12) SAVERER = TIME STEP
(13) TIME STEP = 0.0625

```

β. Εξισώσεις στο Vensim



γ. Απόδοση Πραγματικών Πελατών

Σχήμα 9.6. Διαδικασία Σιγμοειδής Ανάπτυξης

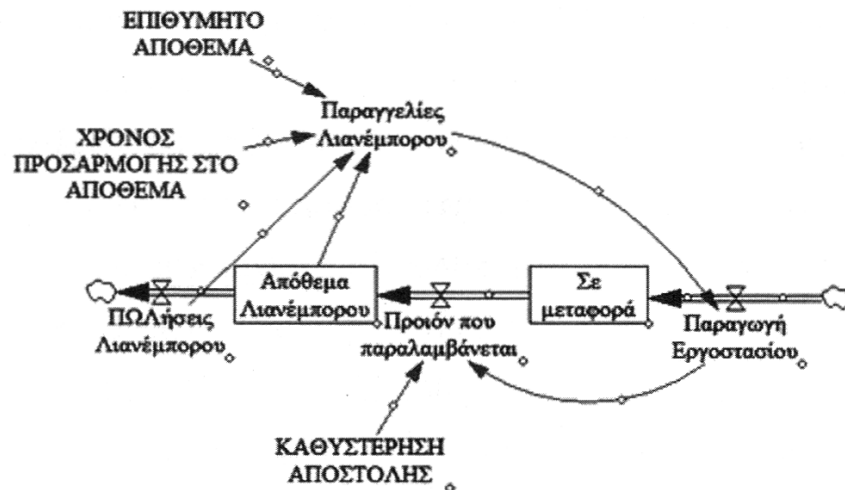
9.3.5. Διαδικασία ταλάντωσης (Oscillating Process)

Το διάγραμμα αποθεμάτων - ροών του Σχήματος 9.7α είναι μια απλοποιημένη εκδοχή της διαδικασίας παραγωγής και διανομής. Σε αυτή τη διαδικασία, οι παραγγελίες του λιανέμπορου στο εργοστάσιο εξαρτώνται τόσο από τις λιανικές πωλήσεις όσο και από το επίπεδο αποθέματος του λιανέμπορα. Η διαδικασία παραγωγής στο εργοστάσιο παρουσιάζεται ως μια άμεση διαδικασία παραγωγής για την εκπλήρωση των παραγγελιών, αλλά υπάρχει μια καθυστέρηση στο λιανέμπορα έως ότου παραλάβει το προϊόν, λόγω των καθυστερήσεων στη μεταφορά. Στο επόμενο Κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στη δομή των χρονικών υστερήσεων.

Σε αυτή τη διαδικασία, οι πωλήσεις του λιανέμπορου είναι 100 μονάδες την εβδομάδα μέχρι την εβδομάδα 5, στην οποία ανεβαίνουν στις 120 μονάδες και παραμένουν εκεί για το υπόλοιπο της προσομοίωσης. Βλέπουμε από το Σχήμα 9.7c ότι υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις σε βασικές μεταβλητές της διαδικασίας.

Για να ταλαντώνεται μια διαδικασία πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο αποθέματα, εκτός αν υπάρχουν πολύ ασυνήθιστες εξισώσεις ροών. Επιπλέον, ο βαθμός της ταλάντωσης επηρεάζεται συνήθως από τις καθυστερήσεις στη διαδικασία. Ο σημαντικός ρόλος των αποθεμάτων και των καθυστερήσεων στο να

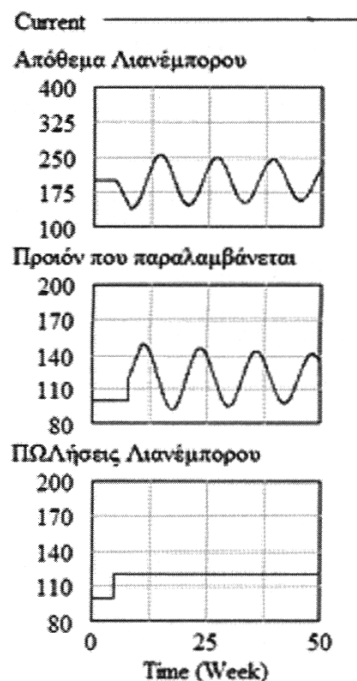
προκαλούν ταλάντωση είναι ένας από τους παράγοντες που κρύβονται πίσω από τα συστήματα παραγωγής just-in-time και τη διαδικασία παραγγελιοδοσίας που βασίζεται σε υπολογιστή. Αυτές οι προσεγγίσεις μπορεί να μειώσουν τα αποθέματα σε μια διαδικασία αλλά και τις χρονικές υστερήσεις.



α. Διάγραμμα αποθεμάτων-ροών

- (01) ΕΠΙΘΥΜΗΤΟ ΑΠΟΘΕΜΑ=200
- (02) Παραγωγή Εργοστασίου= Παραγγελίες Λιανέμπορου
- (03) FINAL TIME = 50
- (04) Σε μεταφορά= INTEG (Παράγωγη Εργοστασίου-Προϊόν που παραλαμβάνεται,300)
- (05) INITIAL TIME = 0
- (06) Προϊόν που παραλαμβάνεται= DELAY FIXED(Παράγωγη Εργοστασίου, ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ, Παραγωγή Εργοστασίου)
- (07) Απόθεμα Λιανέμπορου= INTEG (Προϊόν που παραλαμβάνεται-ΠΩΛήσεις Λιανέμπορου,200)
- (08) ΠΩΛήσεις Λιανέμπορου= 100+STEP(20, 5)
- (09) Παραγγελίες Λιανέμπορου= ΠΩΛήσεις Λιανέμπορου+(ΕΠΙΘΥΜΗΤΟ ΑΠΟΘΕΜΑ -Απόθεμα Λιανέμπορου)/ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΟ ΑΠΟΘΕΜΑ
- (10) SAVERER = TIME STEP
- (11) ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ= 3
- (12) TIME STEP = 0.0625
- (13) ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΟ ΑΠΟΘΕΜΑ= 2

β. Εξισώσεις στο Vensim



c. Διαδικασία ταλαντώσεων

Σχήμα 9.7. Διαδικασία Ταλάντωσης

Το Σχήμα 9.8. παρουσιάζει μια άλλη πτυχή των συστημάτων ταλάντωσης. Η διαδικασία στο Σχήμα 9.8. είναι πανομοιότυπη με εκείνη στο Σχήμα 9.7, με εξαίρεση ότι η συνάρτηση των πωλήσεων του λιανέμπορου έχει αλλάξει σε ημιτονοειδής. Έτσι, οι πωλήσεις είναι σταθερές σε 100 μονάδες ανά εβδομάδα μέχρι την εβδομάδα 5, και στη συνέχεια οι πωλήσεις διαφέρουν ημιτονοειδώς με πλάτος πάνω και κάτω από 100 μονάδες την εβδομάδα των 20. Τα αποτελέσματα για τα τρία διαφορετικά μήκη κύκλου φαίνονται στο Σχήμα 9.8c. Τα αποτελέσματα του RUN4 είναι για μήκος κύκλου διάρκειας 4 εβδομάδων (που είναι, ένας μηνιαίος κύκλος). Τα αποτελέσματα του RUN 13 αφορούν μια διάρκεια 13 εβδομάδων (δηλαδή, ένα τρίμηνο), και τα αποτελέσματα του RUN52 αναφέρονται σε κύκλο διάρκειας 52 εβδομάδων (δηλαδή, ετήσιο).

Παρατηρήστε ότι το εύρος των διακυμάνσεων στο Απόθεμα του Λιανέμπορου και στα προϊόντα που παραλαμβάνει είναι διαφορετικό για τους τρεις διαφορετικούς κύκλους. Το πλάτος είναι σημαντικά μεγαλύτερο για τον κύκλο 13 εβδομάδων από ό, τι είτε για το κύκλο 4 ή 52 εβδομάδων. Αυτό ισχύει ακόμα και αν το πλάτος των πωλήσεων του Λιανέμπορου είναι το ίδιο για κάθε μήκος του κύκλου.

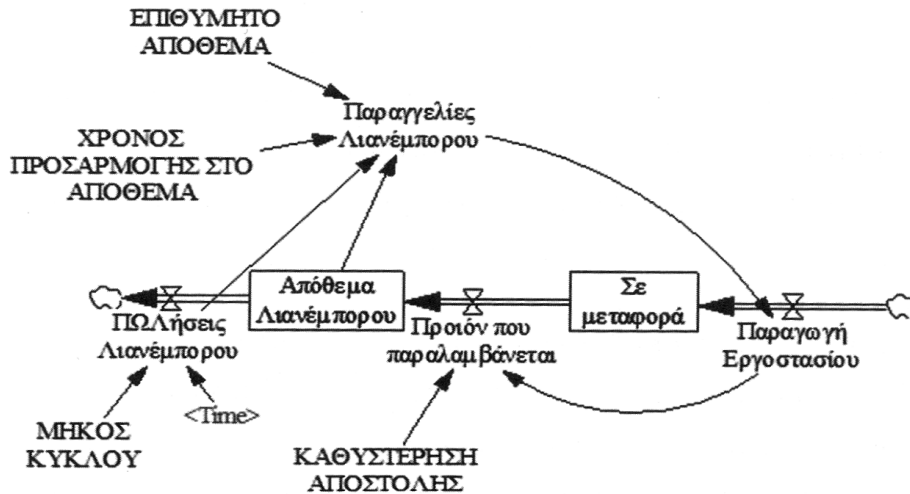
Επιπλέον, εξετάστε τις καμπύλες του Σχήματος 9.8c που δείχνει την ανταπόκριση αυτής της διαδικασίας σε μια σημαντική αλλαγή στις λιανικές πωλήσεις. Παρατηρήστε κυρίως ότι το μήκος του κύκλου για τις ταλαντώσεις είναι περίπου 12 εβδομάδες. Η διάρκεια του κύκλου κατά την οποία μια διαδικασία κυμαίνεται ως απόκριση σε μια είσοδο ονομάζεται συντονισμός της διαδικασίας, και το αντίστροφο του μήκους του κύκλου ονομάζεται συχνότητα συντονισμού. Έτσι, μια ηχηρή συχνότητα αυτής της διαδικασίας είναι $1 / 12 = 0:0833$ κύκλους την εβδομάδα.

Μια διαδικασία γενικά αντιδρά με μεγαλύτερη ένταση στις εισόδους, που ποικίλλουν με μια συχνότητα που βρίσκεται πάνω ή κοντά σε μια συχνότητα συντονισμού. Έτσι, είναι αναμενόμενο ότι η απόκριση που φαίνεται στο Σχήμα 9.8c για την ημιτονοειδή με κύκλο 13 εβδομάδων είναι μεγαλύτερη από τα αποτελέσματα για τα ημιτονοειδή των 4 και 52 εβδομάδων.

Σε συστήματα μηχανικής, γίνεται συχνά μια προσπάθεια να κρατήσει κανείς τις συχνότητες συντονισμού σημαντικά διαφορετικές από τις συνηθισμένες παραλλαγές που βρίσκονται σε λειτουργία. Αυτό γίνεται λόγω των μεγάλων αντιδράσεων που έχουν συνήθως τα συστήματα αυτά σε εισροές κοντά στις συχνότητες συντονισμού τους. Αυτό μπορεί να είναι ενοχλητικό, ή ακόμα και επικίνδυνο. (Έχετε παρατηρήσει ποτέ την σύντομη περίοδο της δόνησης που ορισμένα αεροπλάνα περνούν μόνο μετά την απογείωση; Αυτό είναι ένα φαινόμενο συντονισμού.)

Δυστυχώς, οι συχνότητες συντονισμού για πολλές επιχειρηματικές διαδικασίες βρίσκονται στο φάσμα των παραλλαγών οι οποίες συναντώνται συχνά στην πράξη. Αυτό έχει δύο ανεπιθύμητες πτυχές. Πρώτον, αυτό σημαίνει ότι το εύρος των διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερο από ό, τι θα μπορούσε να είναι διαφορετικά. Δεύτερον, μπορεί να οδηγήσει τους μάνατζερ να υποθέσουν ότι υπάρχουν εξωτερικές αιτίες για τις παραλλαγές. Ας υποθέσουμε ότι σε μια συγκεκριμένη διαδικασία αυτές οι ταλαντώσεις έχουν περιόδους που είναι παρόμοιες με κάποιο φυσικό χρονικό διάστημα όπως ένας μήνας, τρίμηνο, ή χρόνος. Σε μια τέτοια κατάσταση, μπορεί να είναι εύκολο να υποθέσουμε ότι υπάρχει κάποιος εξωτερικός τύπος που έχει μια τέτοια περίοδο, και να αρχίσουμε να οργανώνουμε τη διαδικασία σε ένα τέτοιο κύκλο. Αυτό μπορεί να χειροτερέψει τις ταλαντώσεις. Για παράδειγμα, σκεφτείτε τον παραδοσιακό ετήσιο κύκλο των πωλήσεων αυτοκινήτων. Κάτι τέτοιο

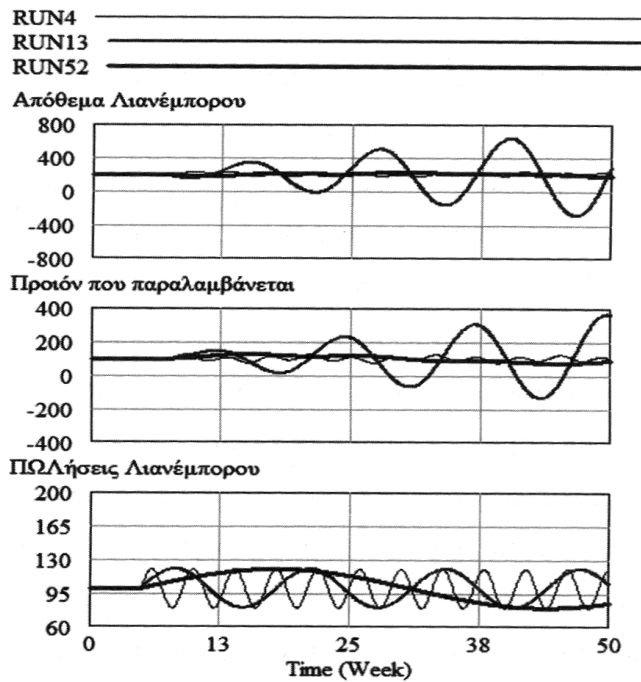
οφείλεται σε πραγματικές μεταβολές στην καταναλωτική ζήτηση, ή δημιουργήθηκε από τον τρόπο με τον οποίο οι εταιρείες διαχειρίζονται τις διαδικασίες τους;



α. Διάγραμμα αποθεμάτων-ροών

ΜΗΚΟΣ ΚΥΚΛΟΥ = 13
 ΠΩΛΗΣΕΙΣ Λιανέμπορου = $100 + \text{STEP}(20, 5) * \text{SIN}(2 * 3.14159 * (\text{Time}-5) / \text{ΜΗΚΟΣ ΚΥΚΛΟΥ})$

β. Αλλαγές στις εξισώσεις στο Vensim



γ. Διαδικασία ταλάντωσης (κύκλου 4, 13 και 52 εβδομάδων)

Σχήμα 9.8. Απόδοση με πωλήσεις που ταλαντώνονται

9.4. Περίληψη

Στο διάγραμμα αποθεμάτων - ροών που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο το βάρος δίδεται κυρίως στην οπτικοποίηση της δομής της διαδικασίας. Τα διαγράμματα αυτά δεν μπορούν να δώσουν απαντήσεις σε σχέση με την απόδοση των διαδικασιών. Επομένως, στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζουμε πώς μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τη συστημική δυναμική για να εξετάσει, πέρα από μια γραφική αναπαράσταση, τα ποσοτικά χαρακτηριστικά μιας επιχειρηματικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, εξετάζουμε πώς υπολογίζονται οι εξισώσεις για κάθε απόθεμα και για κάθε ροή και πώς προσομοιώνονται οι επιχειρηματικές διαδικασίες λύνοντας αυτές τις εξισώσεις και τελικά το μοντέλο. Στη συνέχεια το κεφάλαιο εξετάζει κάποιους βασικούς τύπους συμπεριφοράς για τις επιχειρηματικές διαδικασίες και παρουσιάζει τις δομές που μπορούν να δημιουργήσουν αυτές τις συμπεριφορές. Αρχικά παρουσιάζεται η εκθετική ανάπτυξη (exponential growth) που είναι ένας τύπος συμπεριφοράς όπου κάποια ποσότητα «αυτοτροφοδοτείται» για τη δημιουργία ολοένα αυξανόμενης ανάπτυξης. Έπειτα, παρουσιάζεται ο τύπος αναζήτησης στόχου (goal seeking) κατά τον οποίο η μεταβλητή μιας διαδικασίας καθοδηγείται από μια συγκεκριμένη τιμή. Η σιγμοειδής ανάπτυξη (S-shaped growth) εμφανίζεται όταν η διαδικασία στην αρχή μεγαλώνει εκθετικά, και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Έπειτα, παρουσιάζεται η σιγμοειδής ανάπτυξη με πτώση (S-shaped Growth Followed by Decline) που αποτελεί μια παραλλαγή της σιγμοειδής ανάπτυξης όπου η μεταβλητή αφού σταθεροποιείται έπειτα ακολουθείται από πτώση. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία ταλάντωσης (oscillating process) με δύο παραλλαγές της.