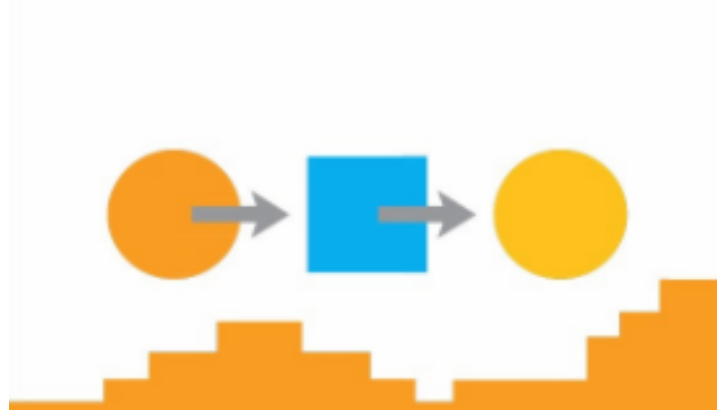


Τ.Ε.Ι ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<<ΔΙΑΚΡΙΤΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ>>



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΝΟΣΣΗΣ

ΑΜ:2012072

Επιβλέπων: Δρ ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΙΚΡΑΜΜΕΝΟΣ

ΣΠΑΡΤΗ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή εργασία σηματοδοτεί το τελικό στάδιο των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και γενικότερα της μορφωτικής μου εμπειρίας στο πρώτο πανεπιστημιακό επίπεδο. Η ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας είναι πολύ σημαντική, καθώς όχι μόνο μου διεύρυνε τους ορίζοντες σ'ένα γνωστικό αντικείμενο, αλλά με γέμισε με πολύτιμα εφόδια τα οποία ίσως μου χρειαστούν στο μέλλον.Είχα να επιλέξω ανάμεσα σε πολλά ενδιαφέροντα θέματα πάνω στον τομέα της πληροφορικής και ιδιαίτερα των δικτύων ,αλλά επέλεξα το συγκεκριμένο,διότι ήθελα να μελετήσω εκτενέστερα τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των δικτύων και ειδικότερα τα διακριτά γεγονότα. Ελπίζω η ανάλυση του θέματος αυτού ν'ανταποκρίνεται στις προσδοκίες του καθηγητή μου, ο οποίος μου εμπιστεύθηκε αυτό το θέμα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Ιωάννη Πικραμμένο για τις πολύτιμες επισημάνσεις του οι οποίες συνέβαλαν στην βελτίωση της εργασίας.Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τμήματος, οι οποίοι συνέβαλαν στην μέχρι τώρα πορεία μου, με αποκορύφωμα την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Κι όπως σε κάθε πορεία στη ζωή μας σημαντικό ρόλο έχουν οι άνθρωποι που μας τριγυρίζουν, έτσι και σ'αυτή την εργασία συνέβαλαν άτομα τα οποία μου παρείχαν γνώσεις και υλικό από τα πανεπιστημιακά τους ιδρύματα και τους ευχαριστώ πολύ για την προσφορά τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου η οποία όλα αυτά τα χρόνια με στήριζε και με εμπύχωνε, ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Η προσφορά τους ήταν καθοριστική και χωρίς αυτούς δε θα τα είχα καταφέρει.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	7
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ	7
1.1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ, ΜΕΛΛΟΝ	10
1.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	15
1.2.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ	16
1.3. ΦΑΣΕΙΣ	17
2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	20
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
2.2. ΕΝΝΟΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	21
2.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ	22
2.2.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ	24
2.2.3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ	27
2.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	31
2.3.1. ΛΟΓΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	31
2.3.2. ΤΥΠΟΙ	32
2.3.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	43
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	47
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	47
3.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ	48
3.2.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	48
3.2.2. ΜΟΝΤΕΛΑ	50
3.3. ΑΝΑΛΥΣΗ	52
3.4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	54
3.5. ΣΤΟΙΧΕΙΑ	55
3.5.1. ΟΝΤΟΤΗΤΕΣ	55
3.5.2. ΚΥΚΛΟΙ ΖΩΗΣ ΚΑΙ ΠΟΡΕΙΕΣ ΟΝΤΟΤΗΤΩΝ	59
3.5.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	62
3.6. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	63

3.6.1. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	63
3.6.2. ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΚΑΙ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	65
3.7. ΟΥΡΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΟΝΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	66
3.7.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ POISSON	67
3.7.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΡΝΟΥΛΛΙ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΤΑ GAUSS	68
3.7.3. ΑΦΙΞΕΙΣ POISSON ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΑΡΚΟΝ	69
3.7.4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΟΥΡΩΝ	72
3.7.5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΟΥΡΩΝ Μ/Μ/1	73
3.7.6. ΔΙΚΤΥΑ ΟΥΡΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ Μ/Μ/1	77
3.7.7. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ Μ/Γ/1	79
3.8. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	83
3.8.1. ΚΟΜΜΩΤΗΡΙΟ	83
3.8.2. ΣΤΑΣΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ	85
3.8.3. ΒΕΝΖΙΝΑΔΙΚΟ	87
4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	90
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	90
4.2. ΟΡΙΣΜΟΙ	92
4.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ	99
4.3.1. ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ	99
4.3.2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΕΠΟΜΕΝΟΥ ΓΕΓΟΝΟΤΟΣ	101
4.3.3. ΡΟΥΤΙΝΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	103
4.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ	110
4.4.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΚΛΟΥ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ	111
4.4.2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ	116
4.4.3. ΡΟΥΤΙΝΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	119
4.5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	124
4.5.1. ΟΡΙΣΜΟΣ	124
4.5.2. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	125
4.6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΝΤΕ CARLO	130
4.6.1. ΟΡΙΣΜΟΣ	130
4.6.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	130
4.6.3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	131
4.6.4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	131
5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΚΛΟΥ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ	134
5.1. ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΔΚΔ	134
5.1.1. ΚΑΝΟΝΕΣ ΔΟΜΗΣΗΣ	136
5.1.2. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	138
5.1.3. ΑΛΛΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	142
5.2. ΣΗΜΕΙΟΛΟΓΙΑ	143
5.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	145
5.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ	146
5.4.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ	146
5.4.2. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	147

6. ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ _____ 156

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ _____	156
6.2. ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ _____	157
6.3. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΠΟΜΕΝΟΥ ΓΕΓΟΝΟΤΟΣ _____	160
6.4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ _____	162

7.ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ _____ 163

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ _____ 167

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ

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. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ, ΜΕΛΛΟΝ

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 (ΑΤΜ) 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 κεραίας, 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. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

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. ΣΥΓΚΡΙΣΗ

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.

1.3. ΦΑΣΕΙΣ

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.

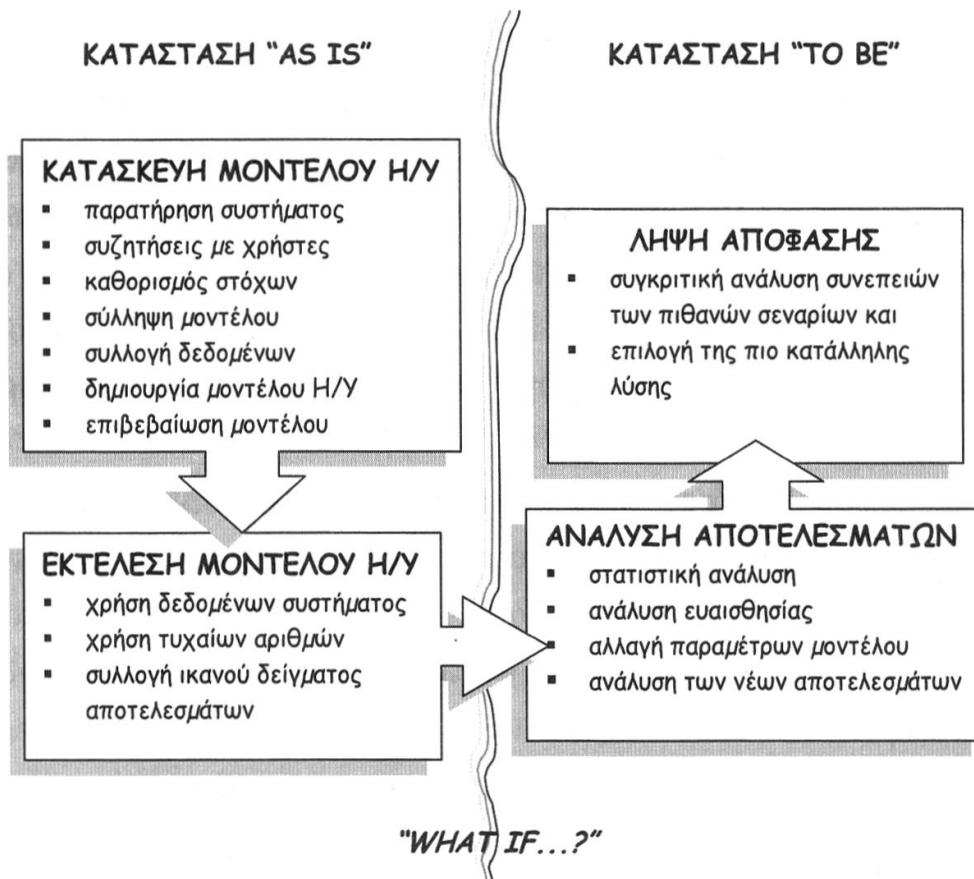
Το μοντέλο υλοποιείται σε κάποιο λογισμικό και τίθεται σε λειτουργία με σκοπό την παρατήρηση της συμπεριφοράς του. Αφού τρέξει για κάποιο χρονικό διάστημα, γίνεται σύγκριση των τιμών των μεταβλητών του μοντέλου με τις αντίστοιχες μεταβλητές του πραγματικού συστήματος. Αν οι τιμές συγκλίνουν ικανοποιητικά,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

2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 κεφαλαίου 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. ΕΝΝΟΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

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.

2.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ

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

Ορισμός 2.3.

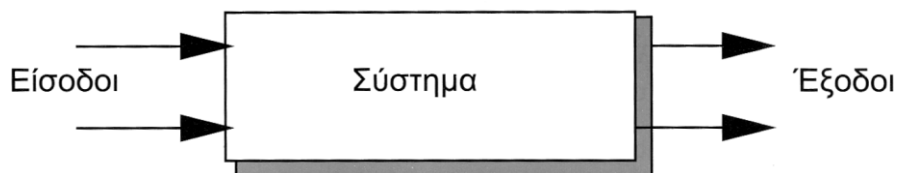
Σύστημα είναι ένα σύνολο αλληλεπιδρώντων στοιχείων τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους ή λειτουργούν συλλογικά για την επίτευξη κάποιου σκοπού.

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.



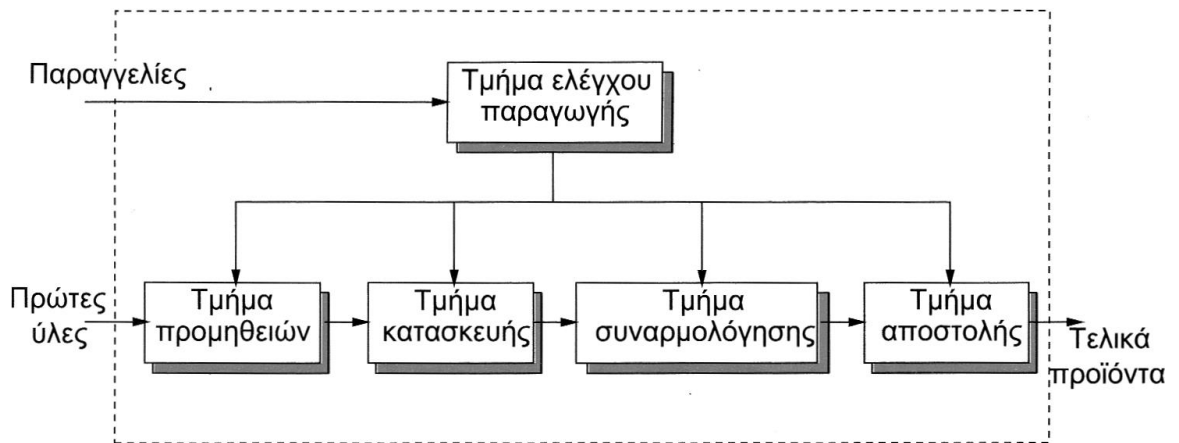
Σχήμα 2.3. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος

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.

2.2.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ

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.

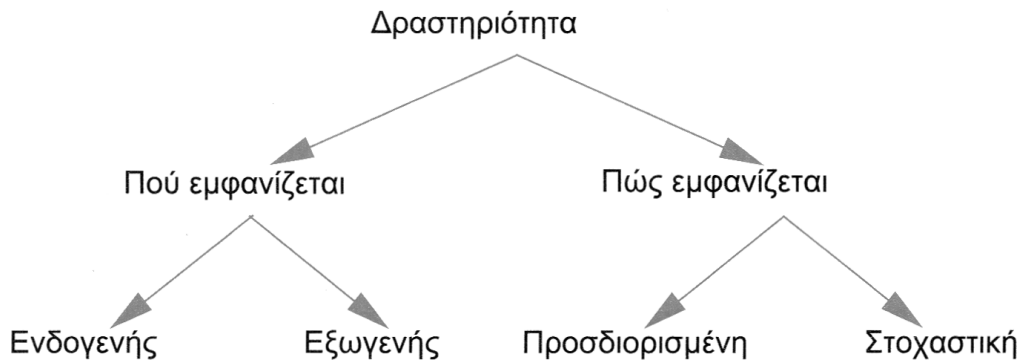
Εξωγενείς δραστηριότητες είναι αυτές οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον του συστήματος αλλά επηρεάζουν το σύστημα. Στον Πίνακα 2.1., παρατηρούμε ότι η "προμήθεια" ενός ανταλλακτικού στο σύστημα της "αποθήκης" είναι εξωγενής δραστηριότητα, γιατί το ανταλλακτικό προέρχεται από το περιβάλλον του συστήματος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

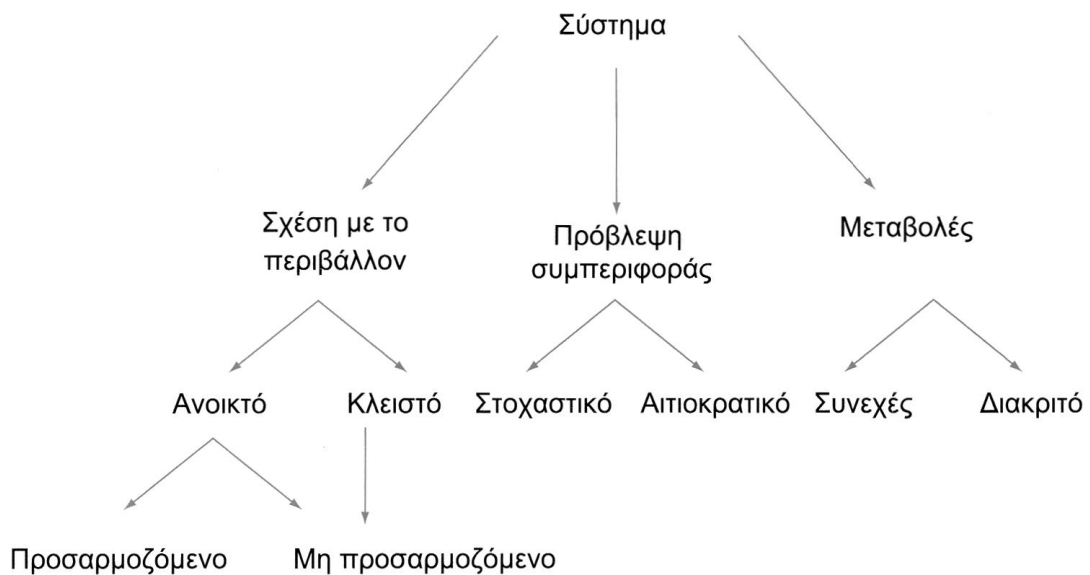
Στο Σχήμα 2.5. φαίνονται διαγραμματικά οι κατηγορίες των δραστηριοτήτων.



Σχήμα 2.5. Κατηγορίες δραστηριοτήτων

2.2.3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

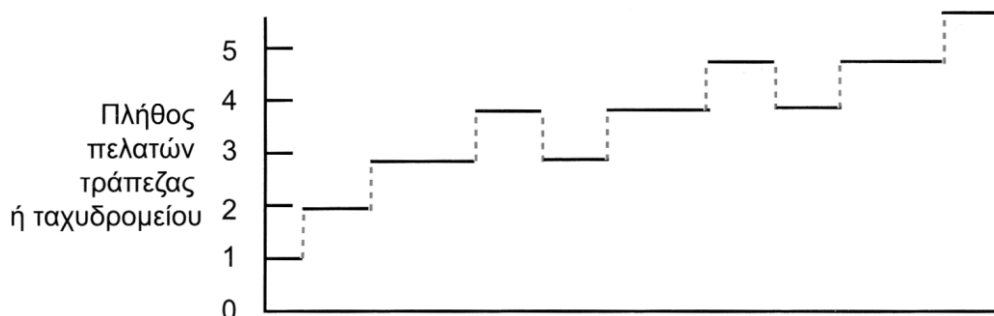
Τα συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τις μεταβολές της κατάστασής τους, τη σχέση τους με το περιβάλλον, και τον βαθμό στον οποίο είναι δυνατόν να προβλεφθεί η συμπεριφορά τους (Σχήμα 2.6.).



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.



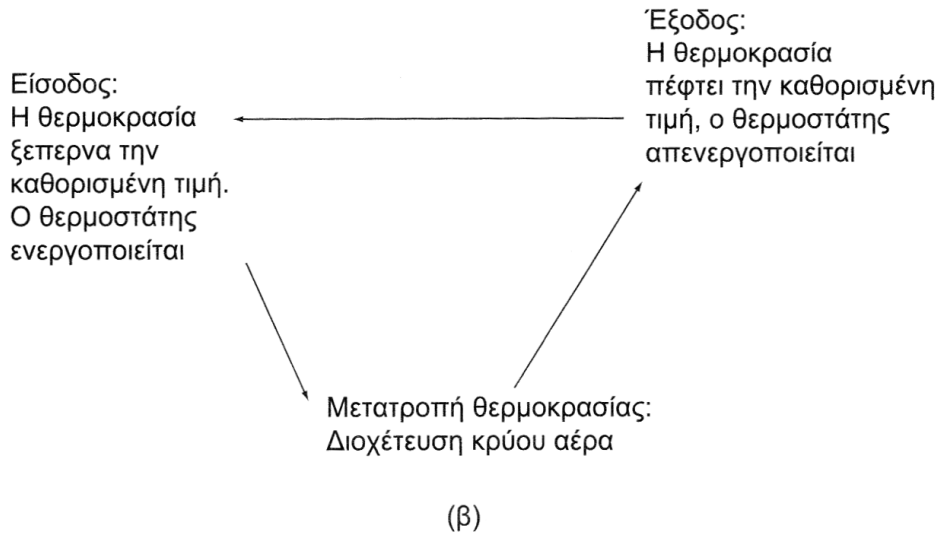
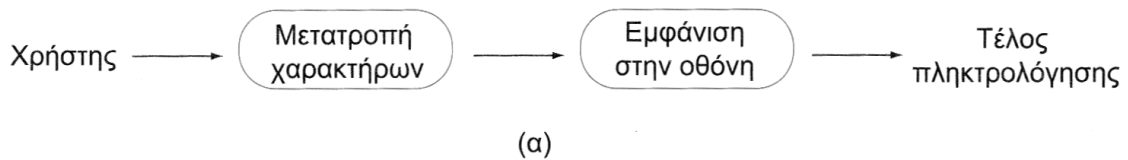
Σχήμα 2.7. Αλλαγή μίας μεταβλητής η οποία περιγράφει την κατάσταση ενός συστήματος σε διακριτά χρονικά διαστήματα

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. Ενδιαφέρει 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 τυχαιών αριθμών είναι αυτή η οποία προσδιορίζει τους χρόνους άφιξης των πελατών στην τράπεζα.

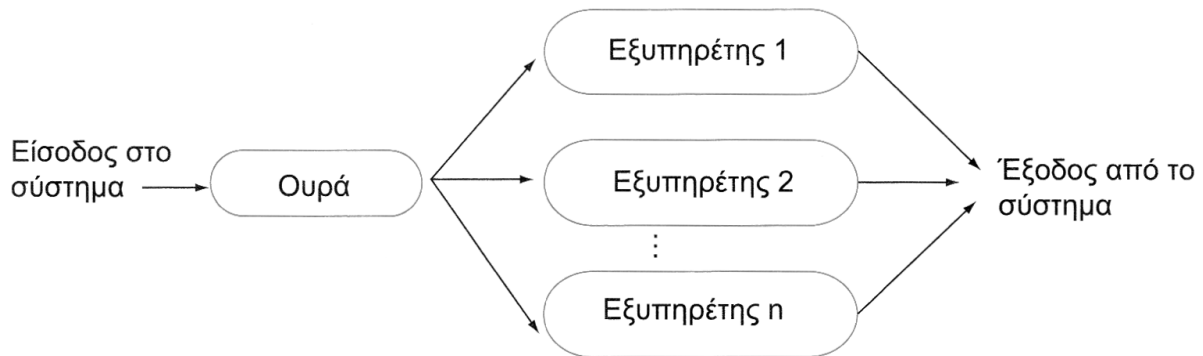
Όσον αφορά τη σχέση του συστήματος με το περιβάλλον, τα συστήματα διακρίνονται σε ανοικτά ή κλειστά. Ένα σύστημα ονομάζεται ανοικτό αν έχει εξωγενείς δραστηριότητες, ενώ αν δεν έχει εξωγενείς δραστηριότητες ονομάζεται κλειστό. Παράδειγμα ανοικτού συστήματος αποτελεί ένας επεξεργαστής κειμένου. Ένας χρήστης 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

2.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

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.

2.3.1. ΛΟΓΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

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.

2.3.2. ΤΥΠΟΙ

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.

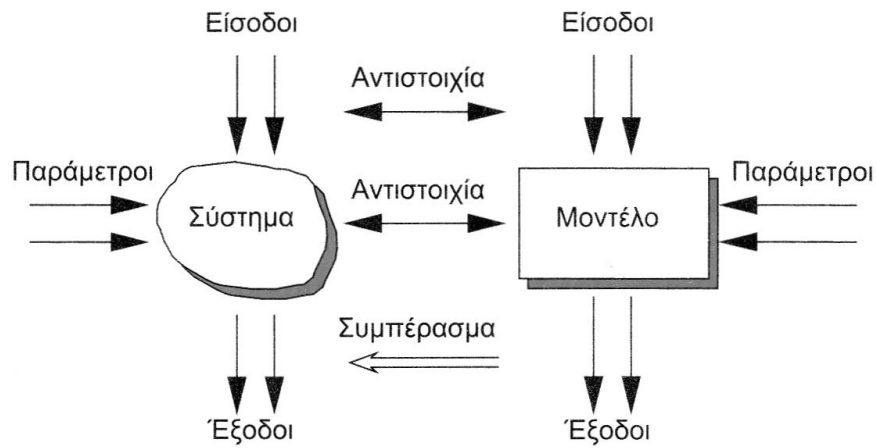
Σε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις εισόδους του συστήματος και του μοντέλου. Υπάρχει επίσης αντιστοιχία ανάμεσα στις εσωτερικές δομές του μοντέλου και του συστήματος. Η μελέτη κατόπιν συνάγει τις εξόδους του συστήματος από τις εξόδους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

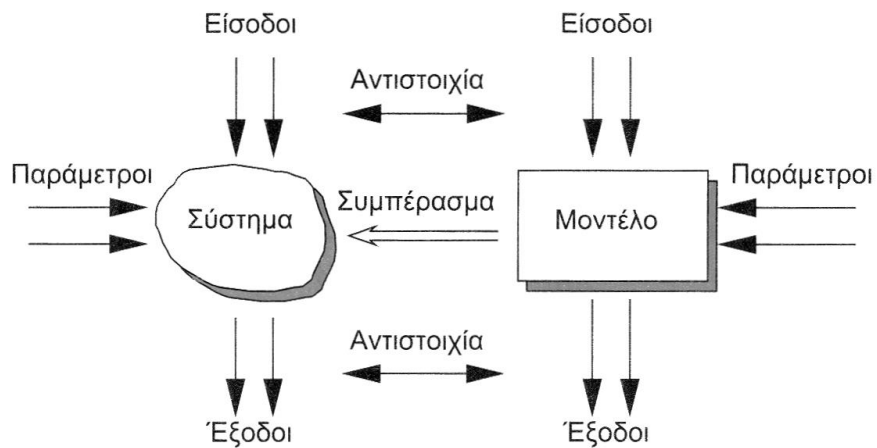
Οι παράμετροι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά ή τις ιδιότητες του μοντέλου και του συστήματος ταυτοχρόνως. Επομένως, θα πρέπει να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία των παραμέτρων που είναι απαραίτητες για τη μελέτη του συστήματος.

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 παραγγέλνει 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

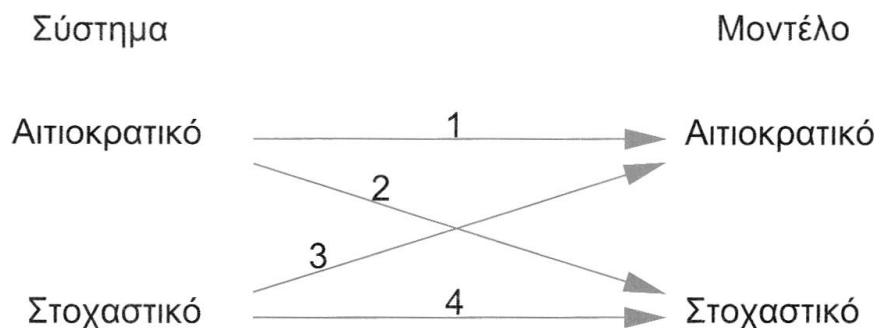
Γίνεται φανερό ότι οι δραστηριότητες δεν σχετίζονται αποκλειστικά με μια οντότητα, αλλά συνήθως με περισσότερες από μία. Για παράδειγμα, η δραστηριότητα "Τοποθέτηση ανταλλακτικού" σχετίζεται με τρεις οντότητες: το "Αυτοκίνητο" τον "Μηχανικό" και το "Ανταλλακτικό". Αντίστοιχα, η

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.

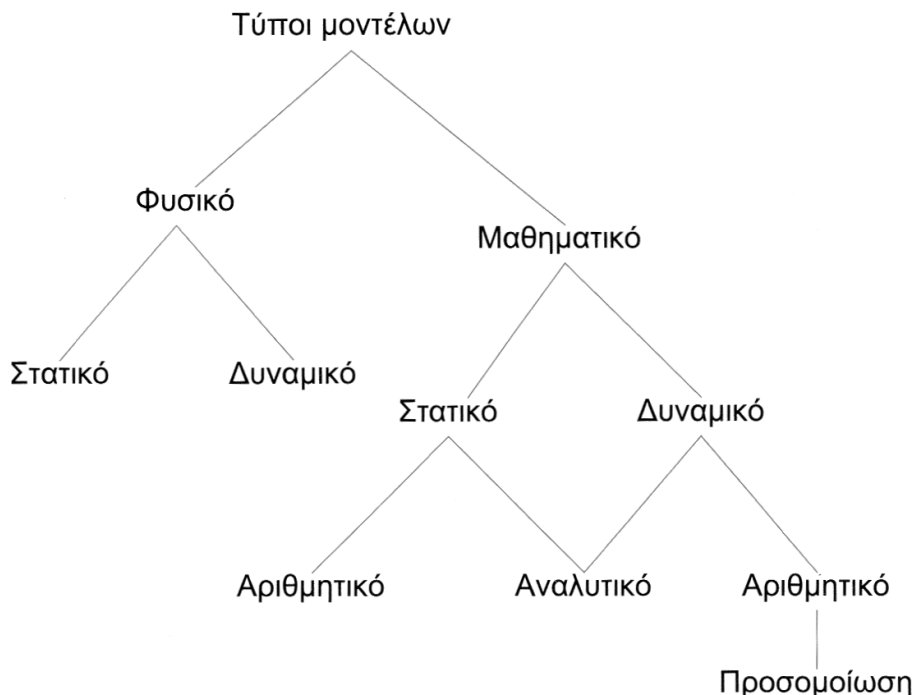


Σχήμα 2.11.: Συνδυασμοί συστημάτων - μοντέλων

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:

$$P = \frac{a - c}{b + d} = 2.4. \text{ Επίσης, } P = Q = 160.$$

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, θεωρήστε 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.

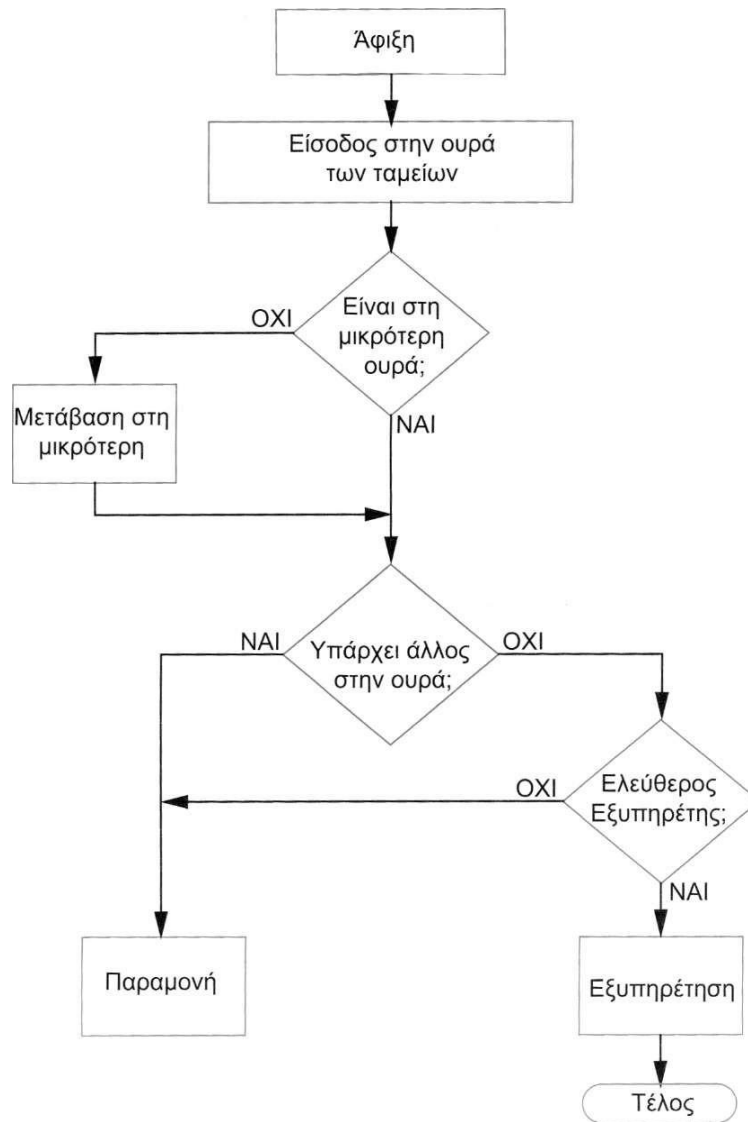
- a) Σχολιάστε το είδος του μοντέλου που θα ήταν το πιο κατάλληλο για την περίπτωση αυτή, δικαιολογώντας τις απαντήσεις σας.
- b) Δώστε τη λίστα χαρακτηριστικών: γεγονότα, οντότητες και δραστηριότητες του μοντέλου.
- c) Να σχεδιάσετε ένα διάγραμμα ροής για το γεγονός "Αφιξη στο σύστημα".

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.

2.3.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

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.

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.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ

3.2.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

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.

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 αν 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.

3.2.2. MONTEΛΑ

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 διάφορων εμπλεκομένων. 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!

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. ΑΝΑΛΥΣΗ

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. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

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. ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.5.1. ΟΝΤΟΤΗΤΕΣ

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.

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:

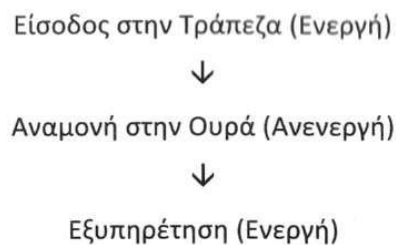
- Ανενεργές οντότητες. Περιμένουν σε πραγματικές ή νοητικές ουρές για την εκπλήρωση των συνθηκών που θα τους επιτρέψουν να συνεχίσουν την πορεία τους μέσα στο σύστημα. Η διάρκεια της αναμονής τους δεν μπορεί γενικά να προβλεφθεί γιατί εξαρτάται από την κατάσταση του υπόλοιπου συστήματος. Για παράδειγμα, 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.

3.5.2. ΚΥΚΛΟΙ ΖΩΗΣ ΚΑΙ ΠΟΡΕΙΕΣ ΟΝΤΟΤΗΤΩΝ

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 κόσμος, 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:

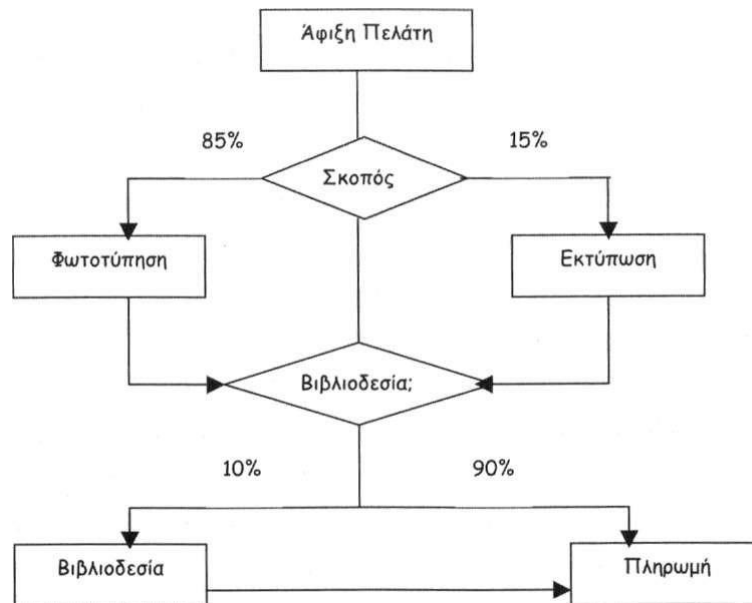
- Υπάρχει αυστηρή εναλλαγή ενεργών και ανενεργών καταστάσεων. Στην πραγματικότητα, μπορεί σε μερικά σημεία να χρειαστεί να εισάγουμε τεχνητές εικονικές ουρές για να ικανοποιείται αυτός ο περιορισμός.
- Οι πορείες των οντοτήτων είναι κλειστές (από όπου και ο όρος κύκλος ζωής), τόσο για τις προσωρινές 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

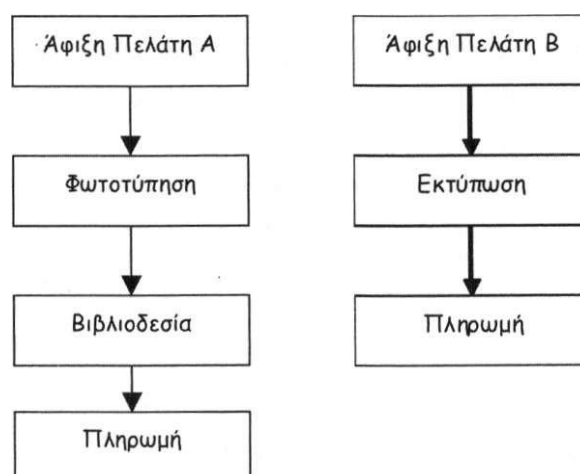
85% αντίστοιχα. Μετά από την ολοκλήρωση των εργασιών αυτών, το 10% των πελατών επιλέγουν να κάνουν και βιβλιοδεσία αυτών που εκτύπωσαν ή φωτοτύπησαν αντίστοιχα. Τελικά όλοι περνάνε από το ταμείο για να πληρώσουν για τις υπηρεσίες που τους προσφέρθηκαν.

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»).

3.5.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

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. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.6.1 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

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.ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΚΑΙ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

- 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.

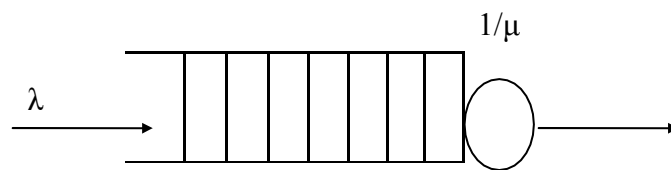
Η διάρκεια μιας δραστηριότητας είναι προβλέψιμη, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις στοχαστική και συνήθως παίρνει τιμές από δειγματοληψία σε κάποια στατιστική κατανομή. Έτσι, για παράδειγμα, η δραστηριότητα «Σερβίρισμα Ποτού» μπορεί να διαρκεί από 1 έως 3 λεπτά ομοιόμορφα ή κανονικά κατανεμημένα.

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. ΟΥΡΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΟΝΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Το βασικό σύστημα που εξετάζεται στη θεωρία ουρών αποτελείται από μία ουρά άπειρης χωρητικότητας και έναν ή περισσότερους εξυπηρετητές.



Τα πακέτα φθάνουν στην ουρά με ρυθμό λ , ενώ ο ρυθμός εξυπηρέτησης είναι μ πακέτα/sec. Είναι φανερό ότι τα πακέτα θα πρέπει να αποθηκεύονται προσωρινά σε περίπτωση όπου τα πακέτα που φθάνουν στην ουρά σε κάποιο χρονικό διάστημα είναι περισσότερα από αυτά που μπορούν να εξυπηρετηθούν. Έτσι, η κατάσταση του εξυπηρετητή του συστήματος θα εναλλάσσεται στο χρόνο μεταξύ δύο καταστάσεων: “ενεργή”, όταν υπάρχει κάποιο πακέτο το οποίο εξυπηρετείται, ή “ανενεργή”. Στην πρώτη περίπτωση, μπορεί να υπάρχουν ή όχι πακέτα στην ουρά (δεν υπάρχουν πακέτα στην ουρά όταν το πακέτο που εξυπηρετείται είναι το μοναδικό στο σύστημα), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η ουρά είναι σίγουρα άδεια.

Η θεωρία ουρών επιτρέπει το καθορισμό των στατιστικών της ουράς, όπως:

- Μέσος αριθμός πακέτων στο σύστημα (τόσο στην ουρά, όσο και στον εξυπηρετητή).
- Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο (καθυστέρηση αναμονής στην ουρά και χρόνος επεξεργασίας).

Η πληροφορία στην οποία βασίζεται η ανάλυση είναι συνήθως:

- Τα στατιστικά της διαδικασίας αφίξεων.
- Ο ρυθμός εξυπηρέτησης - κατανομή του μήκους των πακέτων.
- Ο αριθμός των εξυπηρετητών και η πολιτική εξυπηρέτησης.

Αυτός είναι ο λόγος που για τη περιγραφή των συστημάτων έχει καθιερωθεί ο συμβολισμός $A/B/m$, όπου το πρώτο γράμμα αναφέρεται στη διαδικασία αφίξεων (M για διαδικασία Poisson, G για γενική διαδικασία, D για ντετερμινιστικές αφίξεις), το δεύτερο γράμμα στη κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης (M, G, και D για εκθετικό, γενικό και ντετερμινιστικό χρόνο, αντίστοιχα) και ο αριθμός στον αριθμό των εξυπηρετητών. Όσον αφορά την πολιτική εξυπηρέτησης, αυτή μπορεί να είναι FIFO (First In First Out), LIFO (Last In First Out) ή με επίπεδα προτεραιότητας.

Στην ακόλουθη ανάλυση, με C_n θα συμβολίζεται το n -οστό πακέτο που εισέρχεται στο σύστημα, με $N(t)$ ο αριθμός των πακέτων στο σύστημα τη χρονική στιγμή t , με t_n τη χρονική στιγμή άφιξης του C_n και με t_n το χρονικό διάστημα μεταξύ των αφίξεων C_{n-1} και C_n .

3.7.1.ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ POISSON

Μία διαδικασία απαρίθμησης γεγονότων $N(t)$ ακολουθεί την κατανομή Poisson, όταν:

- Η $N(t)$ παίρνει μόνο ακέραιες τιμές, μεγαλύτερες ή ίσες από 0.
- Η $N(t)$ είναι μη φθίνουσα (δηλαδή, $N(s) \leq N(t)$ για $s < t$).
- Ο αριθμός γεγονότων στο διάστημα $(s,t]$ είναι ίσος με $N(t) - N(s)$.

Η πιθανότητα να υπάρξουν k γεγονότα στο διάστημα $(0, t)$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Pr[N(t) = k] = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

ενώ η μέση τιμή του αριθμού αφίξεων είναι:

$$E[N(t)] = \sum_0^{\infty} k \Pr[N(t) = k] = \lambda t \quad (15)$$

Μερικές από τις πιο σημαντικές ιδιότητες μιας διαδικασίας Poisson είναι οι ακόλουθες:

- Οι χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων είναι ανεξάρτητοι και εκθετικά κατανομημένοι, με παράμετρο λ .
- Η άθροιση ανεξάρτητων διαδικασιών Poisson δίνει και πάλι διαδικασία Poisson
- Εάν μία διαδικασία Poisson χωριστεί σε δύο άλλες διαδικασίες, αναθέτοντας ανεξάρτητα κάθε γεγονός σε μία από τις δύο νέες διαδικασίες με σταθερές πιθανότητες p και $1-p$ αντίστοιχα, οι διαδικασίες που προκύπτουν είναι και πάλι Poisson.

3.7.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ BERNOULLI ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΤΑ GAUSS

Μία διαδικασία Bernoulli είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα από N ανεξάρτητες ρίψεις νομίσματος (ή δοκιμές Bernoulli) ενός “άδικου νομίσματος”. Άδικο νόμισμα είναι αυτό που η πιθανότητα να έρθει κεφαλή είναι άνιση με την πιθανότητα να έρθουν γράμματα, με p την πιθανότητα να έρθει κεφαλή και $(1-p)$ η πιθανότητα να έρθουν γράμματα. Η πιθανότητα να έρθει k φορές κεφαλή (και συνεπώς $N-k$ φορές γράμματα) ως αποτέλεσμα N διαδοχικών δοκιμών Bernoulli (ρίψεις νομισμάτων) καλείται *διωνυμική κατανομή*, και δίνεται από τον τύπο:

$$\Pr(k \text{ “κεφαλές” σε } N \text{ “ρίψεις”}) = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k}$$

$$\binom{N}{k} = \frac{N!}{(N-k)!k!}$$

Η κατανομή κατά Gauss, ή Κανονική κατανομή, είναι μία συνεχής προσέγγιση της διωνυμικής κατανομής όταν το Np είναι ένας μεγάλος αριθμός. Οι

κατανομές έχουν βασικά το ίδιο σχήμα, και για μεγάλες τιμές του Np , στην περιοχή του $Np(1-p)$ γύρω από το Np , η κατανομή κατά Gauss είναι μία λογική προσέγγιση της διωνυμικής κατανομής.

Αυτό βοηθά στην ανάλυση σχετικής επίδοσης στο ότι η περιοχή πιθανότητας κάτω από την ουρά της κατανομής κατά Gauss είναι εκτεταμένα ταξινομημένη και εφαρμοσμένη σε πολλά συστήματα μαθηματικού προγραμματισμού. Προσεγγίζουμε την ουρά της διωνυμικής κατανομής με την αθροιστική κατανομή της κανονικής πυκνότητας, $Q(\alpha)$. Θα χρησιμοποιήσουμε την ακόλουθη προσέγγιση για να υπολογίσουμε την πιθανότητα απώλειας ή το κέρδος της στατιστικής πολυπλεξίας:

$$\Pr(k > x) \cong Q\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) = Q(\alpha) \cong \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right)$$

$$\text{όπου } Q(\alpha) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

3.7.3. ΑΦΙΞΕΙΣ POISSON ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ MARKOV

Οι διαδικασίες τυχαίας άφιξης περιγράφονται γενικά, και η διαδικασία Poisson (ή Markov) ιδιαίτερα. Οι αφίξεις Poisson συμβαίνουν έτσι ώστε για κάθε αύξηση του χρόνου (T), αδιάφορο του πόσο μεγάλη ή μικρή, η πιθανότητα των αφίξεων είναι ανεξάρτητη από κάθε προϋστορία. Αυτά τα γεγονότα μπορούν να είναι είτε μεμονωμένα στοιχειώδη πακέτα, μία έκρηξη (πυκνή ομάδα) από στοιχειώδη πακέτα, ολοκληρώσεις υπηρεσίας πακέτου ή πλαισίου, ή άλλα, αυθαίρετα γεγονότα σε μοντέλα.

Η πιθανότητα ότι το μεσολαβών διάστημα (t) μεταξύ γεγονότων καλείται *πυκνότητα πιθανότητας μεσολαβούντος χρόνου*. Ο ακόλουθος τύπος δίνει σαν αποτέλεσμα την πιθανότητα ότι ο μεσολαβών χρόνος t ισούται με μία ποσότητα x όταν ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι λ γεγονότα ανά δευτερόλεπτο:

$$\Pr ob(t = x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

Αυτή καλείται *διαδικασία χωρίς μνήμη*, γιατί η πιθανότητα ο μεσολαβών χρόνος

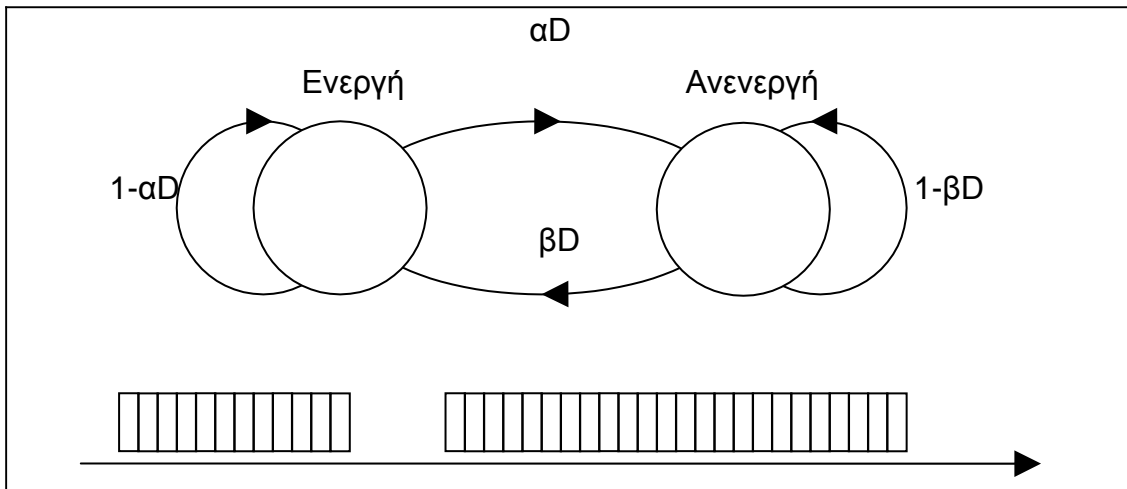
να είναι x δευτερόλεπτα είναι ανεξάρτητη από την *μνήμη* της ποσότητας του χρόνου που έχει ήδη εκπνεύσει. Αυτό το γεγονός απλοποιεί πάρα πολύ την ανάλυση τυχαίων διαδικασιών αφότου δεν πρέπει να κρατηθεί προϊστορία ή μνήμη. Αυτών των ειδών οι διαδικασίες είναι ευρύτερα γνωστές σαν *διαδικασίες Markov*, από το όνομα του Ρώσου μαθηματικού του δέκατου ένατου αιώνα.

Η πιθανότητα n ανεξάρτητες αφίξεις να συμβούν σε T δευτερόλεπτα δίνεται από τη διάσημη *κατανομή Poisson*:

$$\text{Prob}(n, T) = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T}$$

Συνδυάζουμε αυτές τις δύο ιδέες σε ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο που καλείται Διαδικασία Poisson Διαμορφωμένη κατά Markov (Markov Modulated Poisson Process, MMPP). Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι αυτής της διαδικασίας: ο *διακριτός* (που αντιστοιχεί σε κύτταρα ATM) και ο *συνεχής* (που αντιστοιχεί καλύτερα σε Μονάδες Δεδομένων Πρωτοκόλλου (Protocol Data Units, PDUs) υψηλότερου στρώματος) οι οποίες δημιουργούν εκρήξεις στοιχειωδών πακέτων. Τα επόμενα δύο σχήματα δίνουν ένα ισοδύναμο παράδειγμα για το διακριτό και το συνεχές μοντέλο.

Οι ετικέτες στα βέλη στο πρώτο σχήμα δείχνουν την πιθανότητα η μετάβαση της πηγής μεταξύ της ενεργής και ανενεργής εκρηκτικής κατάστασης, ή διαφορετικά παραμένει στην ίδια κατάσταση για το χρόνο κάθε κυττάρου. Με άλλα λόγια, κατά τη διάρκεια του χρόνου κάθε κυττάρου η πηγή κάνει μία μετάβαση κατάστασης, είτε στην άλλη κατάσταση, είτε πίσω στον εαυτό της, με πιθανότητα για κάθε ενέργεια ίση με αυτή που αναγράφεται στα βέλη του διαγράμματος.



Η εκρηκτικότητα, ή ο λόγος μέγιστου προς μέσου, του διακριτού μοντέλου πηγής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

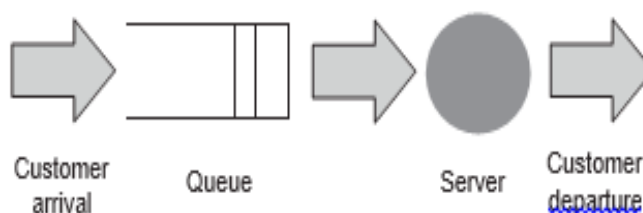
$$b = \frac{\alpha + \beta}{\beta}$$

όπου α είναι ο μέσος αριθμός εκρήξεων που καταφθάνουν ανά δευτερόλεπτο, και β είναι ο μέσος ρυθμός ολοκληρώσεων των εκρήξεων. Συχνά χρησιμοποιούμε το β^{-1} , που έχει μονάδες και είναι ο μέσος αριθμός δευτερολέπτων ανά έκρηξη. Ορίζουμε το D ως τον χρόνο κβαντισμού του κυττάρου εκφρασμένο σε δευτερόλεπτα ανά κύτταρο. Έτσι, το αD ορίζει την πιθανότητα μία έκρηξη να αρχίζει μέσα στον χρόνο ενός συγκεκριμένου κυττάρου, και το βD ορίζει την πιθανότητα μία έκρηξη να τελειώνει μέσα στον χρόνο ενός συγκεκριμένου κυττάρου. Η μέση διάρκεια της έκρηξης d (σε κύτταρα) υπολογίζεται τότε από τις βασικές γεωμετρικές σειρές όπως ακολουθεί:

$$d = \frac{1}{\beta D}$$

3.7.4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΟΥΡΩΝ

Ορισμένα απλοποιημένα μοντέλα δικτύων μπορούν να αναλυθούν με μαθηματικές μεθόδους. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αναλυτικά αποτελέσματα μπορεί είναι πολύτιμα, ακόμη και αν οι μέθοδοι δεν επιτρέπουν την αξιολόγηση λεπτομερών μοντέλων πραγματικών συστημάτων. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι *συστήματα ουρών αναμονής (queueing systems)*. Ένα σύστημα αναμονής ενός εξυπηρετητή περιλαμβάνει ένα απλό, αλλά αντιπροσωπευτικό μοντέλο, όπου εμφανίζονται οι βασικές αρχές προσομοίωσης διακριτών γεγονότων. Σε αυτό το σημείο, θα καταστήσουμε κατανοητά τη λογική και τη μηχανική αυτού του βασικού μοντέλου: Το σύστημα αναμονής είναι ένα τραπεζικό ίδρυμα με μόνο έναν υπάλληλο, όπου οι πελάτες έρχονται κι εξυπηρετούνται από τον μοναδικό υπάλληλο και μετά αποχωρούν. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει αυτή τη σκέψη. Αν ο πελάτης έρθει και βρει τον υπάλληλο αδρανή, τότε ο υπάλληλος ξεκινά αμέσως, αν όχι, τότε ο πελάτης περιμένει στην ουρά σύμφωνα με την αρχή «ο πρώτος στη σειρά εξυπηρετείται πρώτος» (FCFS). Οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων είναι τυχαίες, ανεξάρτητες και ταυτόσημα κατανομημένες μεταβλητές και δεν εξαρτώνται από τους χρόνους μεταξύ των αφίξεων. Η προσομοίωση θα αναλύσει 20 λεπτά του χρόνου λειτουργίας της τράπεζας, αμέσως μετά το άνοιγμά της στις 9 π.μ. Με την εκκίνηση της προσομοίωσης στον χρόνο 0, η ουρά είναι άδεια (δεν υπάρχει κανείς πελάτης) και ο υπάλληλος είναι αδρανής. Αν και η άφιξη του πρώτου πελάτη θα γίνει μετά τον χρόνο 0, σε αυτό το σενάριο εισέρχεται στην τράπεζα με το άνοιγμά της. Κατά την περίοδο προσομοίωσης των 20 λεπτών, πελάτες θα έρθουν και, είτε θα εξυπηρετηθούν, είτε θα περιμένουν στην ουρά και θα εξυπηρετηθούν, είτε θα φύγουν. Στην ενότητα αυτή γίνεται μία ανασκόπηση των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων αποτελεσμάτων.



Σύστημα ουράς αναμονής τράπεζας

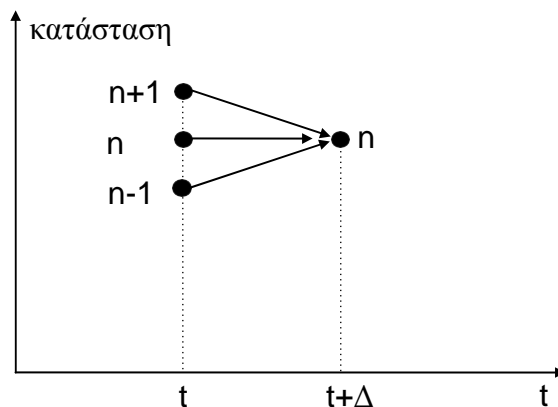
3.7.5.ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΟΥΡΩΝ M/M/1

Το σύστημα ουρών αναμονής M/M/1 είναι το πλέον απλό σύστημα, το οποίο αποτελείται από μία ουρά άπειρης χωρητικότητας στην οποία φτάνουν πακέτα μέσω μιας διαδικασίας αφίξεων Poisson και των οποίων ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένος. Η αρχή σύμφωνα με την οποία ο μοναδικός εξυπηρετητής του συστήματος εξυπηρετεί τα πακέτα είναι FIFO.

Η ιδιότητα έλλειψης μνήμης της εκθετικής κατανομής, μαζί με την υπόθεση ότι οι χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων και οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι ανεξάρτητοι, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, εάν είναι γνωστός ο αριθμός των πακέτων $N(t)$ στο σύστημα τη χρονική στιγμή t , οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες φτάνουν ή αναχωρούν (δηλαδή, ολοκληρώνεται η εξυπηρέτησή τους) πακέτα είναι ανεξάρτητες τόσο των χρονικών στιγμών άφιξης των πακέτων που βρίσκονται τη δεδομένη στιγμή στο σύστημα, όσο και του χρόνου που υπολείπεται για την εξυπηρέτηση του πακέτου (εάν υπάρχει) στον εξυπηρετητή.

Στόχος της ανάλυσης που ακολουθεί είναι σε πρώτη φάση ο προσδιορισμός της κατανομής πιθανοτήτων $p_n(t)$ να βρίσκονται n πακέτα στο σύστημα τη χρονική στιγμή t . Με βάση τη κατανομή αυτή και κάποιες βοηθητικές σχέσεις, όπως για παράδειγμα ο νόμος του Little, θα εξαχθούν στη συνέχεια τα στατιστικά του συστήματος.

Το σύστημα θα εξετασθεί σε δύο πολύ κοντινές χρονικές στιγμές, t και $t+\Delta t$ ($\Delta t \rightarrow 0$). Έστω ότι τη στιγμή $t+\Delta t$ η ουρά βρίσκεται στη κατάσταση n . Λόγω των υποθέσεων για το σύστημα, είναι προφανές ότι τη στιγμή t το σύστημα θα μπορούσε να βρίσκεται μόνο σε μία από τις τρεις καταστάσεις $n-1$, n , $n+1$. Η μετάβαση αυτή φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Για τον υπολογισμό της κατανομής των πιθανοτήτων χρειάζεται πρώτα να υπολογιστούν οι πιθανότητες μετάβασης κατάστασης σε δύο πολύ κοντινές χρονικές στιγμές.

Έστω, λοιπόν, ότι το σύστημα βρίσκεται σε μια κατάσταση $i \geq 1$. Η πιθανότητα να μην υπάρξει καμία άφιξη σε ένα πολύ μικρό διάστημα Δt είναι, με βάση τη σχέση (14): $(e^{-\lambda \Delta t}) \approx 1 - \lambda \Delta t$, όπως προκύπτει από την ανάλυση σε δυναμοσειρές. Δηλαδή εάν κρατήσουμε μόνο τους δύο πρώτους σημαντικούς όρους δεδομένου ότι τους υπόλοιπους όρους, οι οποίοι περιλαμβάνουν ύψωση σε δύναμη μικρών ποσοτήτων, μπορούμε να τους αγνοήσουμε, χωρίς σημαντική βλάβη. Εντελώς αντίστοιχα, η πιθανότητα να μην υπάρξει σε διάστημα Δt καμία αναχώρηση είναι $(e^{-\mu \Delta t}) \approx 1 - \mu \Delta t$. Θεωρώντας τώρα το διάστημα Δt πολύ μικρό ώστε να έχουμε περισσότερες από μία αφίξεις ή αναχωρήσεις, συνάγεται ότι οι πιθανότητες μιας άφιξης και μιας αναχώρησης στο Δt είναι αντίστοιχα $(1 - e^{-\lambda \Delta t}) \approx \lambda \Delta t$ και $(1 - e^{-\mu \Delta t}) \approx \mu \Delta t$. Εξαιτίας της ανεξαρτησίας μεταξύ αφίξεων και αναχωρήσεων, η πιθανότητα κάθε συνδυασμού αφίξεων και αναχωρήσεων ισούται με το γινόμενο των επιμέρους αναχωρήσεων.

Γυρίζοντας τώρα στις πιθανές μεταβάσεις του ανωτέρω σχήματος, μπορεί να γραφεί:

$$\begin{aligned}
 p_n(t+\Delta t) &= p_n(t) [(1 - \mu \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) + (\mu \Delta t) (\lambda \Delta t)] \\
 &+ p_{n+1}(t) [\mu \Delta t (1 - \lambda \Delta t)] \\
 &+ p_{n-1}(t) [\lambda \Delta t (1 - \mu \Delta t)], \quad n \geq 1
 \end{aligned}$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης αναφέρεται στη πιθανότητα να υπήρχαν n πακέτα και κατά τη χρονική στιγμή t και είτε να μην υπήρξε στο χρονικό διάστημα Δt άφιξη ή αναχώρηση (πρώτος όρος στην αγκύλη), είτε να υπήρξε μία άφιξη και μία αναχώρηση (δεύτερος όρος της αγκύλης). Ο δεύτερος όρος αναφέρεται στη πιθανότητα να υπήρχαν $n + 1$ πακέτα κατά τη χρονική στιγμή t και να υπήρξε μία αναχώρηση και καμία άφιξη (έτσι, ώστε τη στιγμή $t + \Delta t$, να υπάρχουν στο σύστημα n πακέτα) και ο τρίτος όρος αναφέρεται στη πιθανότητα να υπήρχαν $n - 1$ πακέτα κατά τη χρονική στιγμή t και να υπήρξε μία άφιξη και καμία αναχώρηση (έτσι, ώστε και πάλι, τη στιγμή $t + \Delta t$, να υπάρχουν στο σύστημα n πακέτα).

Η εξίσωση μπορεί να λυθεί ως προς $p_n(t)$ εάν αντικατασταθεί ο όρος $p_n(t+\Delta t)$ με τους δύο πρώτους όρους του αναπτύγματός του σε σειρά Taylor:

$$p_n(t+\Delta t) = p_n(t) + [d p_n(t)/dt] \Delta t$$

Λύνοντας καταλήγουμε στη σχέση:

$$(\lambda + \mu) p_n = \mu p_{n+1} + \lambda p_{n-1} \quad n \geq 1$$

Για να καταλήξουμε εδώ θεωρήσαμε ότι οι όροι δεύτερης τάξης ως προς Δt είναι αμελητέοι, ότι οι πιθανότητες κάθε κατάστασης είναι ανεξάρτητες του χρόνου (θεωρήσαμε δηλαδή ότι το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία μεγάλο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα τα μεταβατικά φαινόμενα να είναι αμελητέα). Η τελευταία παρατήρηση οδηγεί και στο μηδενισμό του όρου $d p_n(t)/dt$.

Όσον αφορά τη κατάσταση p_0 η αντίστοιχη εξίσωση γράφεται:

$$p_0(t+\Delta t) = p_0(t) [(1 - \lambda \Delta t) + (\mu \Delta t) (\lambda \Delta t)] + p_1(t) [\mu \Delta t (1 - \lambda \Delta t)]$$

από την οποία εντελώς ανάλογα με πιο πάνω, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

Με βάση τις σχέσεις και εισάγοντας τον όρο παράμετρος χρησιμοποίησης του συστήματος: $\rho = \lambda / \mu$, καταλήγουμε στη σχέση:

$$p_n = \rho^n p_0$$

Η παράμετρος χρησιμοποίησης του συστήματος δείχνει επίσης και τη πιθανότητα να είναι κατειλημμένος ο εξυπηρετητής του συστήματος. Για να είναι το σύστημα ευσταθές πρέπει να ισχύει $\rho < 1$ (ο ρυθμός αφίξεων να είναι μικρότερος από το ρυθμό εξυπηρέτησης), και όλες οι πιθανότητες να

αθροίζονται στη μονάδα. Έτσι:

$$\sum_{n=0}^{\infty} p_n = 1 = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n = \frac{p_0}{1-\rho} \Rightarrow p_0 = (1-\rho)$$

με βάση την οποία καταλήγουμε στη σχέση:

$$p_n = (1-\rho)\rho^n$$

Με βάση τώρα τη πιθανότητα κάθε κατάστασης, μπορούμε να υπολογίσουμε τα στατιστικά του συστήματος. Έτσι, ο μέσος αριθμός πακέτων στο σύστημα είναι:

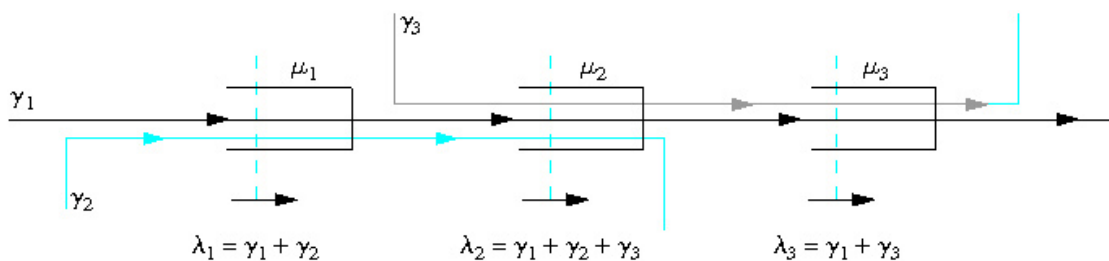
$$\bar{N} = \sum_{n=0}^{\infty} np_n = (1-\rho) \sum_{n=0}^{\infty} n\rho^n = (1-\rho)\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n = (1-\rho)\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{1}{1-\rho}$$

και επομένως :

$$\bar{N} = \frac{\rho}{1-\rho}$$

3.7.6. ΔΙΚΤΥΑ ΟΥΡΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ Μ/Μ/1

Τα περισσότερα δίκτυα έχουν περισσότερους από έναν καταχωρητές. Στην ενότητα αυτή θα εξηγήσουμε μερικούς απλούς τύπους οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέσης καθυστέρησης ανά πακέτο σε ένα δίκτυο με πολλαπλούς καταχωρητές. Θα αρχίσουμε εξετάζοντας το δίκτυο που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Από το δίκτυο αυτό διέρχονται τρεις ροές πακέτων. Υποθέτουμε ότι οι ροές των αφίξεων είναι διαδικασίες Poisson με ρυθμούς αυτούς που αναγράφονται στο σχήμα. Υποθέτουμε επίσης ότι οι χρόνοι εξυπηρέτησης στους τρεις καταχωρητές είναι ανεξάρτητοι και εκθετικά κατανομημένοι με ρυθμούς αυτούς που υποδεικνύονται στο σχήμα.



Ένα δίκτυο με τρεις καταχωρητές

Είναι αξιοσημείωτο ότι το δίκτυο αυτό μπορεί να αναλυθεί αναλύοντας κάθε ουρά αναμονής ξεχωριστά. Δηλαδή, μπορεί να αποδειχθεί ότι ο μέσος αριθμός πακέτων σε κάθε καταχωρητή δίνεται από τη σχέση που περιγράφει την απλή Μ/Μ/1 ουρά. Συγκεκριμένα, για $i = 1, 2, 3$, ο μέσος αριθμός πακέτων στον καταχωρητή i είναι $L_i = \lambda_i / (\mu_i - \lambda_i)$.

Στον τύπο αυτό, λ είναι ο μέσος ρυθμός των πακέτων που διέρχονται από τον

καταχωρητή i . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, $\lambda = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$ και $\lambda = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$

$$\lambda = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$$

Το εύλογο επιχείρημα που παρατέθηκε για το αποτέλεσμα του Little σε ουρές που δεν είναι FIFO (first in - first out) επεκτείνεται και στα δίκτυα ουρών

αναμονής. Για την ακρίβεια, μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέση καθυστέρηση T ανά πακέτο στο δίκτυο σχετίζεται με το μέσο αριθμό L πακέτων στο δίκτυο με τη σχέση $L = \gamma T$, όπου γ είναι ο μέσος συνολικός ρυθμός άφιξης πακέτων στο δίκτυο. Για το δίκτυο του παραπάνω σχήματος προκύπτει ότι $L = L_1 + L_2 + L_3$ και $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$.

Αποδεικνύεται ότι η μέση καθυστέρηση T ανά πακέτο σε ένα δίκτυο (σε δευτερόλεπτα) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{j=1}^J \frac{\lambda_j}{\mu_j - \lambda_j}$$

όπου γ είναι ο μέσος ρυθμός της ροής που εισέρχεται στο δίκτυο, λ_j είναι ο

μέσος ρυθμός της ροής που διέρχεται από την ουρά j και μ_j είναι ο μέσος

ρυθμός μετάδοσης της ουράς j . Όλοι αυτοί οι ρυθμοί εκφράζονται σε πακέτα ανά δευτερόλεπτο και οι ρυθμοί λ_j προκύπτουν με επίλυση των εξισώσεων

που εκφράζουν τη διατήρηση των ροών διαμέσου των κόμβων.

Οι υποθέσεις που απαιτούνται ώστε να ισχύει ο τύπος είναι:

1. Οι ροές αφίξεων που εισέρχονται στο δίκτυο αποτελούν ανεξάρτητες διαδικασίες Poisson.
2. Οι χρόνοι μετάδοσης των πακέτων σε όλες τις ουρές είναι ανεξάρτητοι και εκθετικά κατανομημένοι.

Στην πράξη, η υπόθεση 1 μπορεί να επιβεβαιωθεί, όχι όμως και η υπόθεση 2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαδοχικοί χρόνοι μετάδοσης ενός δεδομένου πακέτου στους διάφορους κόμβους είναι όλοι ανάλογοι προς το

μήκος του πακέτου και επομένως δεν μπορούν να είναι ανεξάρτητοι. Παρόλα αυτά, πειράματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι ο τύπος παρέχει μία ικανοποιητική εκτίμηση της μέσης καθυστέρησης ανά πακέτο σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων με αποθήκευση και προώθηση.

3.7.7. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ M/G/1

Θεωρούμε τώρα ένα σύστημα αναμονής με ένα επεξεργαστή, στο οποίο φτάνουν πακέτα ακολουθώντας κατανομή Poisson, αλλά ο χρόνος επεξεργασίας των πακέτων αυτών ακολουθεί μία γενική κατανομή. Υποθέτουμε ότι η σειρά εξυπηρέτησης των πακέτων είναι ίδια με τη σειρά άφιξης (FIFO) και έστω X_i ο χρόνος επεξεργασίας του i -οστού πακέτου. Υποθέτουμε ότι οι τυχαίες μεταβλητές (X_1, X_2, \dots) ακολουθούν την ίδια κατανομή, είναι αμοιβαία ανεξάρτητες και ανεξάρτητες των χρόνων μεταξύ των αφίξεων.

Έστω:

$$\bar{X} = E\{X\} = \frac{1}{\mu} = \text{ο μέσος χρόνος επεξεργασίας}$$

$$\bar{X}^2 = E\{X^2\} = \text{η ροπή δεύτερης τάξης}$$

Σκοπός της ανάλυσης που θα ακολουθήσει είναι να καταλήξουμε στη σχέση Pollaczek-Khinchin (P-K):

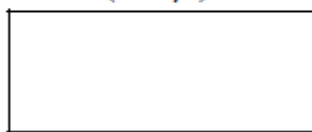
$$W = \frac{\lambda \bar{X}^2}{2(1 - \rho)}$$

όπου W ο χρόνος αναμονής των πακέτων στην ουρά και $\rho = \lambda / \mu$. Ο συνολικός χρόνος ενός πακέτου στο σύστημα θα ισούται προφανώς με το άθροισμα του χρόνου αναμονής στην ουρά συν το χρόνο εξυπηρέτησης, δηλαδή:

$$T = \bar{X} + \frac{\lambda \bar{X}^2}{2(1 - \rho)}$$

Με εφαρμογή του νόμου του Little, έχουμε για το μέσο αριθμό πακέτων στην ουρά, N_Q , και στο σύστημα, N :

$$N_Q = \frac{\lambda^2 \bar{X}^2}{2(1 - \rho)}$$



W_i = Ο χρόνος αναμονής στην ουρά του i -οστού πακέτου.

$R_i = 0$ υπολειπόμενος χρόνος εξυπηρέτησης που βλέπει το i -οστό πακέτο.

Με τον όρο αυτό εννοούμε το χρόνο που απομένει μέχρι να ολοκληρωθεί η εξυπηρέτηση του πακέτου που εξυπηρετείται όταν το i -οστό πακέτο εισέρχεται στο σύστημα. Εάν δεν εξυπηρετείται τη δεδομένη χρονική στιγμή κάποιο πακέτο, τότε προφανώς ο R_i είναι 0.

$X_i = 0$ χρόνος εξυπηρέτησης του i -οστού πακέτου.

$N_i = 0$ αριθμός των πακέτων που βρίσκονται ήδη στην ουρά όταν φτάνει το i -οστό πακέτο.

Από τους παραπάνω ορισμούς γίνεται φανερό ότι:

$$W_i = R_i + \sum_{j=i-N_i}^{i-1} X_j$$

Παίρνοντας μέσες τιμές στα δύο μέλη της σχέσης και δεδομένου ότι οι τυχαίες μεταβλητές N_i και $X_{i-1}, \dots, X_{i-N_i}$ έχουμε:

$$E\{W_i\} = E\{R_i\} + E\left\{\sum E\{X_j / N_i\}\right\} = E\{R_i\} + \bar{X} E\{N_i\}$$

Παίρνοντας τώρα το όριο $i \rightarrow \infty$, έχουμε:

$$W = R + (1/\mu) N_Q$$

όπου R ο μέσος υπολειπόμενος χρόνος.

Από το νόμο του Little, έχουμε:

$$N_Q = \lambda W$$

και αντικαθιστώντας στη σχέση παίρνουμε:

$$W = R + \rho W$$

όπου ρ η παράμετρος χρησιμοποίησης. Έτσι τελικά:

$$W = R / (1-\rho)$$

Ο υπολογισμός του R μπορεί να γίνει γραφικά, ως εξής: στο σχήμα απεικονίζεται ο υπολειπόμενος χρόνος εξυπηρέτησης $r(\tau)$ σε συνάρτηση του τ . Όταν αρχίζει μια καινούργια εξυπηρέτηση, διάρκειας X , το $r(\tau)$ ξεκινάει από τη τιμή X και μειώνεται γραμμικά. Θεωρούμε τώρα μια χρονική στιγμή t , για την οποία $r(t) = 0$. Η χρονική μέση τιμή του $r(\tau)$ στο διάστημα $[0, t]$, είναι:

$$\frac{1}{t} \int_0^t r(\tau) d\tau = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{M(t)} \frac{1}{2} X_i^2$$

όπου $M(t)$ ο αριθμός των εξυπηρετήσεων στο διάστημα $[0, t]$ και X_i ο χρόνος εξυπηρέτησης του i -οστού πακέτου. Η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{1}{t} \int_0^t r(\tau) d\tau = \frac{1}{2} \frac{M(t)}{t} \frac{\sum_{i=1}^{M(t)} X_i^2}{M(t)}$$

και υποθέτοντας ότι τα όρια υπάρχουν:

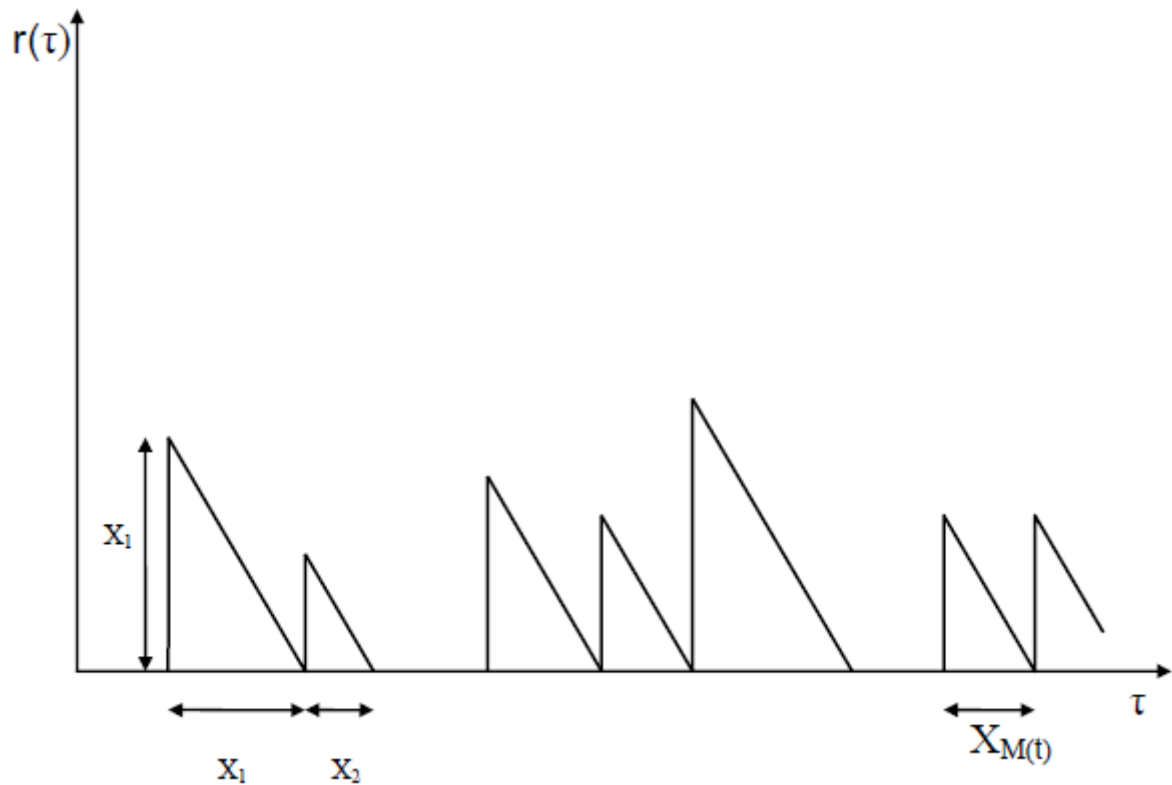
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t r(\tau) d\tau = \frac{1}{2} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{M(t)}{t} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^{M(t)} X_i^2}{M(t)}$$

Τα όρια στο δεξί σκέλος της εξίσωσης είναι οι χρονικές μέσες τιμές του ρυθμού αναχωρήσεων και της δεύτερης ροπής του χρόνου εξυπηρέτησης, ενώ το όριο στο πρώτο σκέλος είναι η χρονική μέση τιμή του υπολειπόμενου χρόνου εξυπηρέτησης. Έτσι καταλήγουμε στη σχέση:

$$R = \frac{1}{2} \lambda \bar{X}^2$$

και τελικά, καταλήγουμε στη σχέση P-K:

$$W = \frac{\lambda \bar{X}^2}{2(1-\rho)}$$



Μία απλή εφαρμογή του συστήματος αναμονής M/G/1 είναι το σύστημα M/D/1, όπου ο χρόνος εξυπηρέτησης των πακέτων είναι ντετερμινιστικός. Στην περίπτωση αυτή:

$$\bar{X}^2 = \frac{1}{\mu^2}$$

οπότε, με αντικατάσταση:

3.8. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

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.ΚΟΜΜΩΤΗΡΙΟ

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

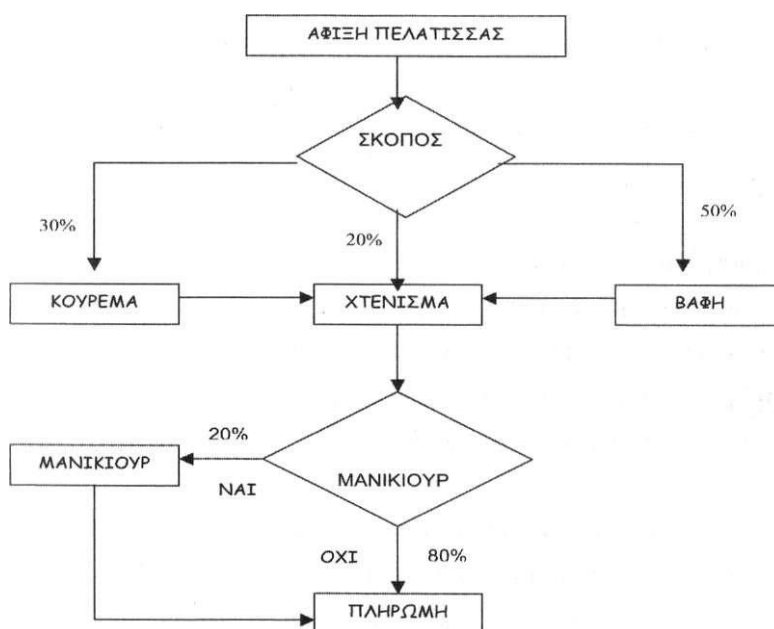
Πίνακας 3.1. Λίστα περιγραφής συστήματος «Κομμωτήριο» (1η περίπτωση)

- 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
Μανικιουρίστα	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.ΣΤΑΣΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ 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 βρίσκονταν 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 βρίσκονταν ήδη στο λεωφορείο και αποβιβάζονται ως ένα ενιαίο σύνολο και όχι ως οντότητες. Έτσι, θεωρούμε την αποβίβαση ως δραστηριότητα με διάρκεια που πρέπει μεν 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»

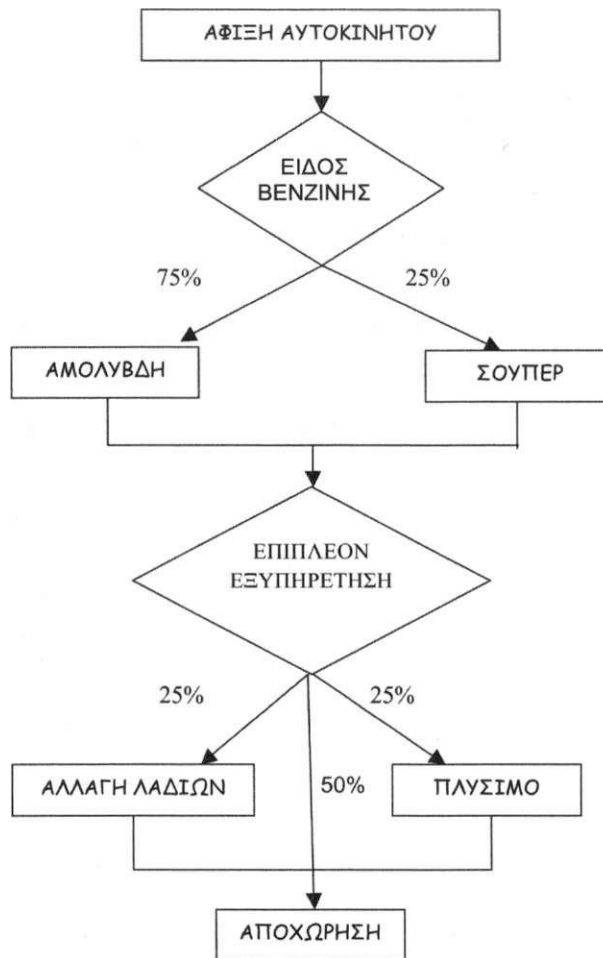
3.8.3.BENZINAΔΙΚΟ

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	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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)

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 αφιχθεί 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 βαγόني 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. ΟΡΙΣΜΟΙ

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

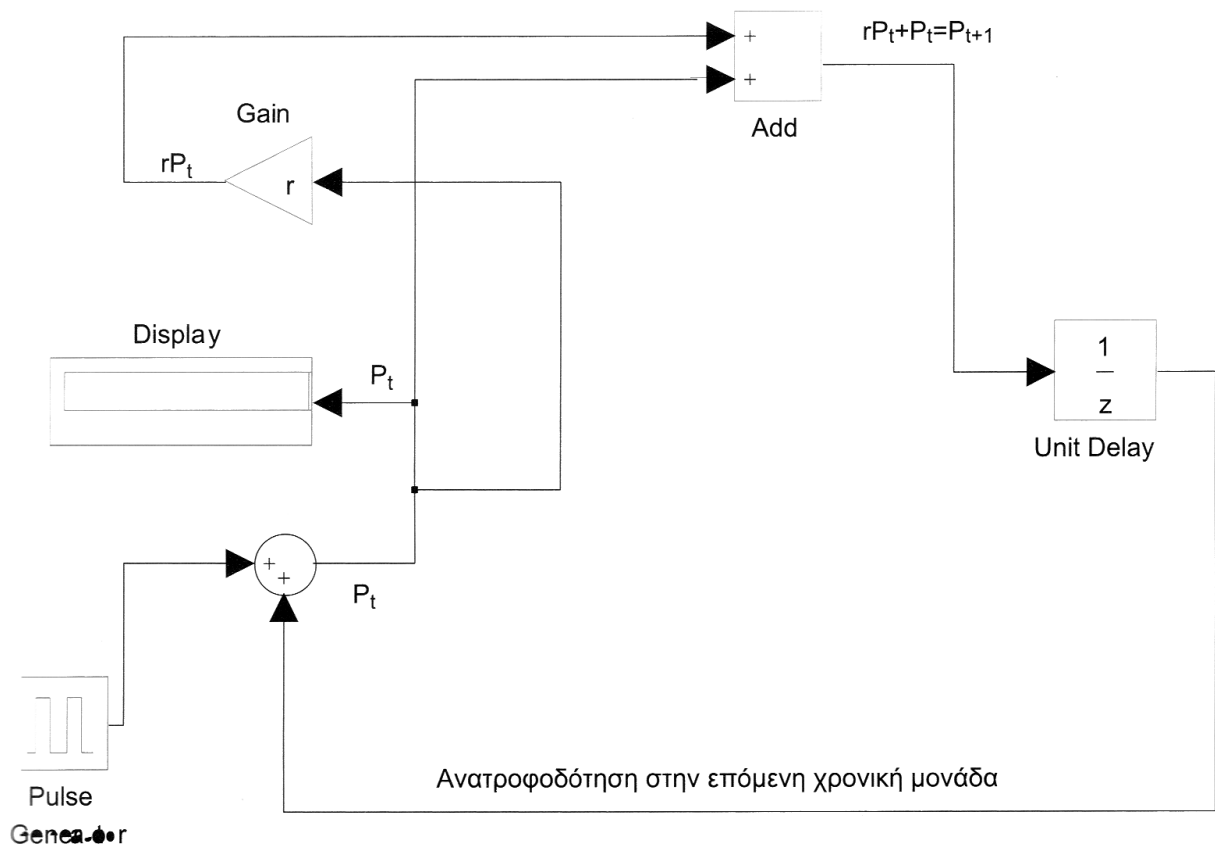
δραστηριότητες, ενώ, τέλος, η προσομοίωση διεργασιών χρησιμοποιεί ρουτίνες που υλοποιούν τις διεργασίες που εκτελούνται κατά την επεξεργασία του μοντέλου.

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:

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

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 $if (t \geq \text{Phase Delay}) \text{ AND Pulse is on}$ θα είναι αληθής και η τιμή του παλμού θα είναι ίση με Amplitude. Στο παράδειγμα, $\text{Amplitude} = P_0$. 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 περιγράφηκαν αναφορικά με το τμήμα Pulse Generator, η τιμή του παλμού έχει μηδενιστεί, επειδή δεν ισχύει πλέον η συνθήκη $if (t \geq \text{Phase Delay}) \text{ AND Pulse is on}$ (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. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

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. ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ

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 εξυπηρέτησή τους, τελειώνει η εξυπηρέτησή 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. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΕΠΟΜΕΝΟΥ ΓΕΓΟΝΟΤΟΣ

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

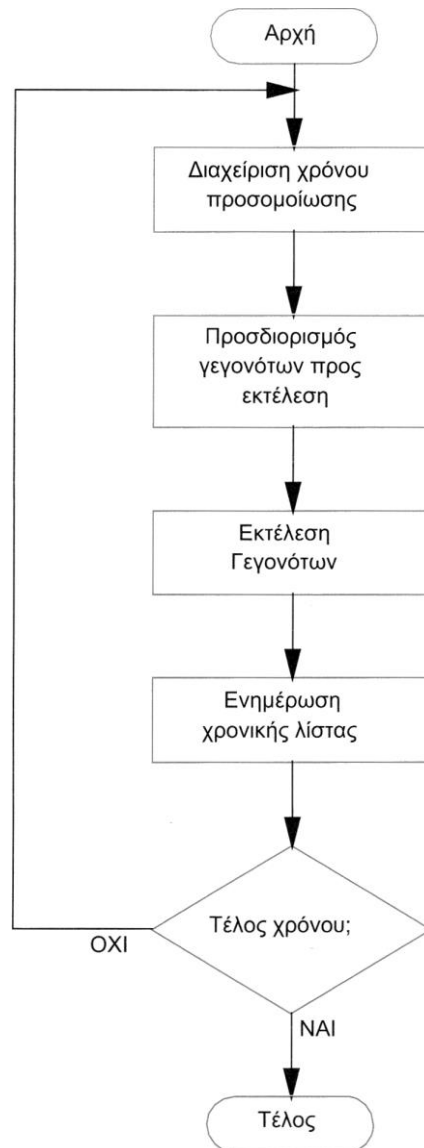
θα συμβεί αυτό το γεγονός προϋπολογίζεται ή υπολογίζεται όταν συμβεί κάποιο άλλο γεγονός και η χρονική αυτή στιγμή τοποθετείται μέσα στη λίστα. Επίσης, η λίστα μπορεί να περιέχει και τις τιμές που πρόκειται να λάβουν κάποια από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου όταν εκτελεστεί το γεγονός. Αυτό είναι συνηθισμένο 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	→	1	0	0+δ
b	→	1	200	200+δ
x	→	0	200	200+2δ
a	→	1	250	250+δ
x	→	1	250	250+2δ

Σχήμα 4.3. Λίστα μελλοντικών γεγονότων για τα σήματα α, 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).

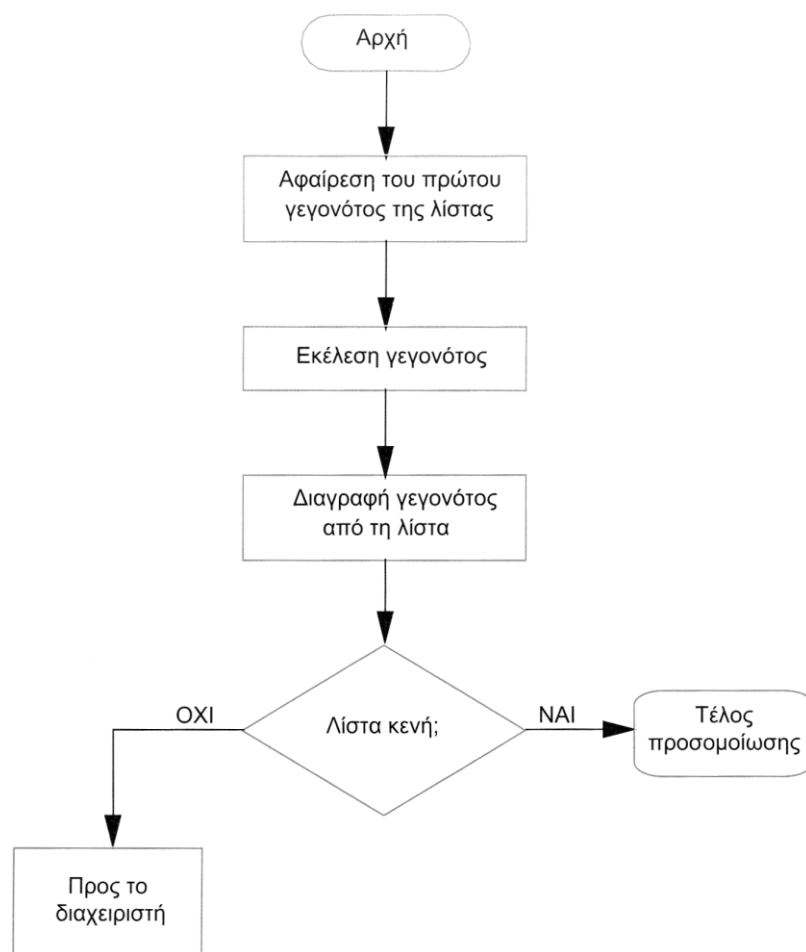
4.3.3. ΡΟΥΤΙΝΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

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:

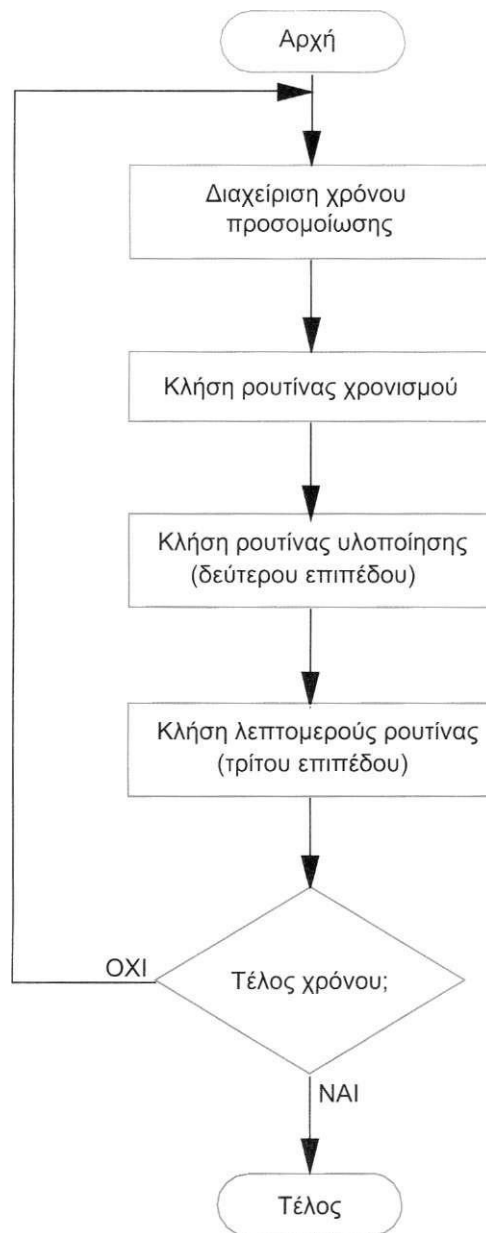
Ρολόι	Γεγονός	Πελάτης
1	Αφιξη	1
1	Έναρξη εξυπηρέτησης	1
4	Αφιξη	2
5	Αφιξη	3
5	Τέλος Εξυπηρέτησης	1
5	Έναρξη Εξυπηρέτησης	2
8	Αφιξη	4
10	Τέλος Εξυπηρέτησης	2

10	Έναρξη Εξυπηρέτησης	3
12	Αφιξη	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)

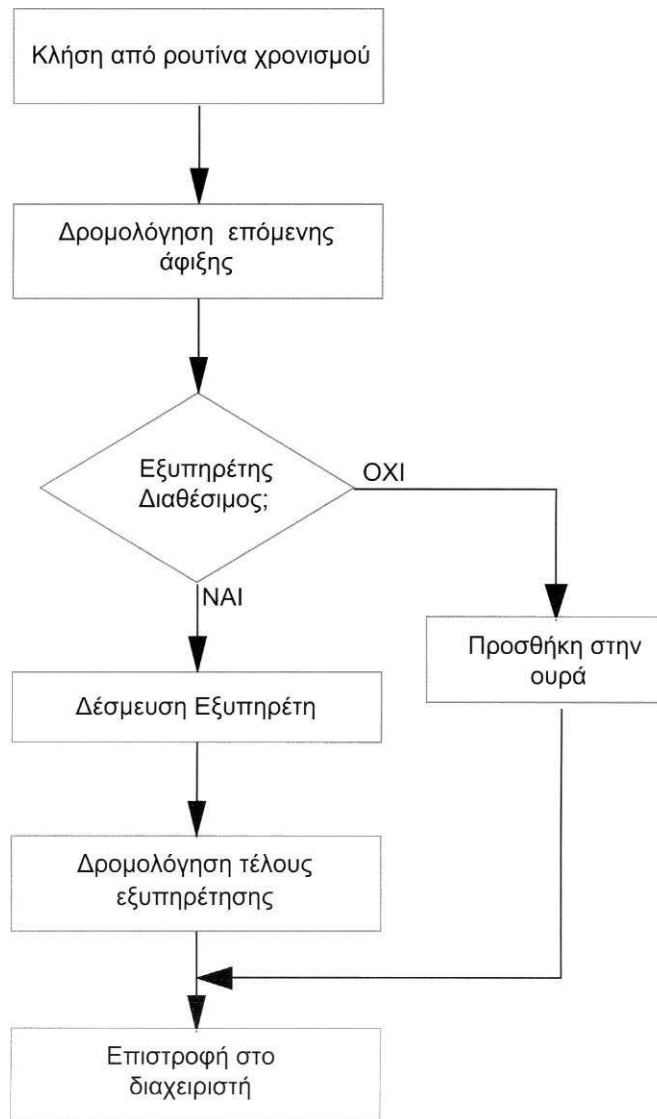
Βήμα 2: Έλεγχος αν ο εξυπηρέτης είναι διαθέσιμος. Αν ναι μετάβαση στο Βήμα 3. Αν όχι, προσθήκη στην ουρά και μετάβαση στο βήμα 5

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.

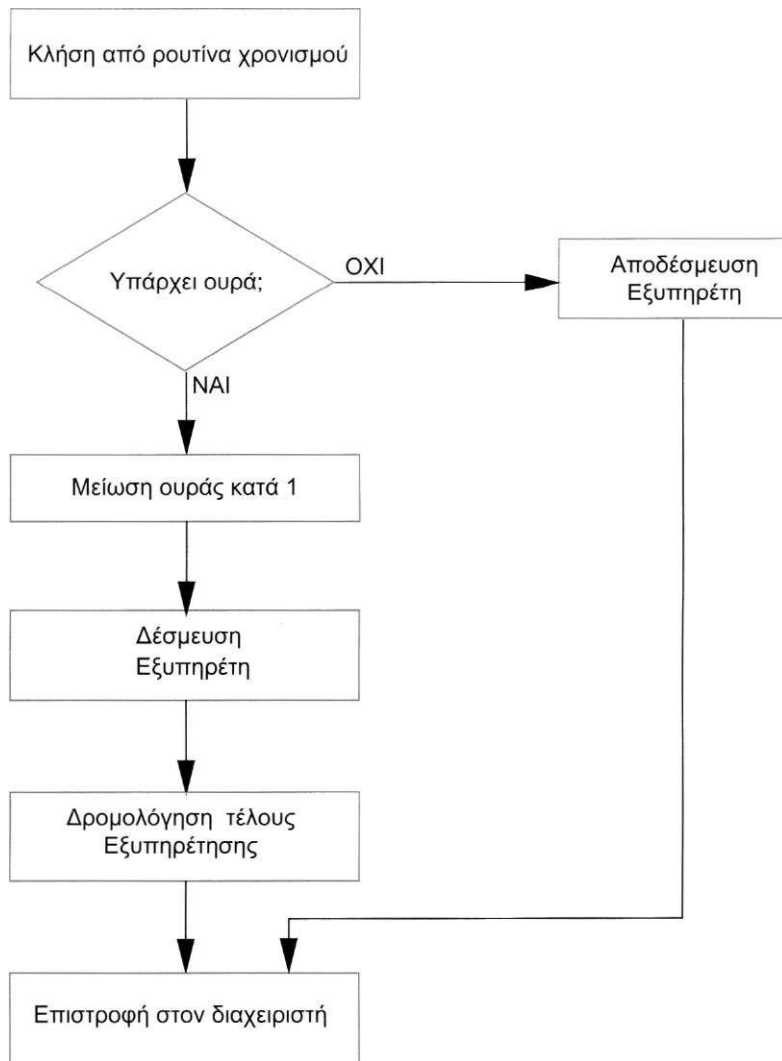
Βήμα 2: Μείωση της ουράς κατά 1

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

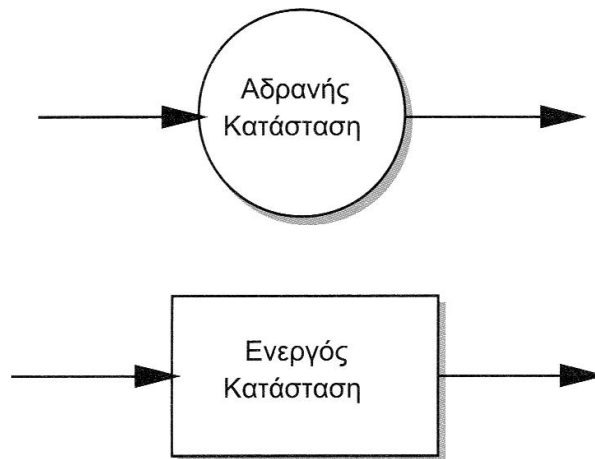
4.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ

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. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΚΛΟΥ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ

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.

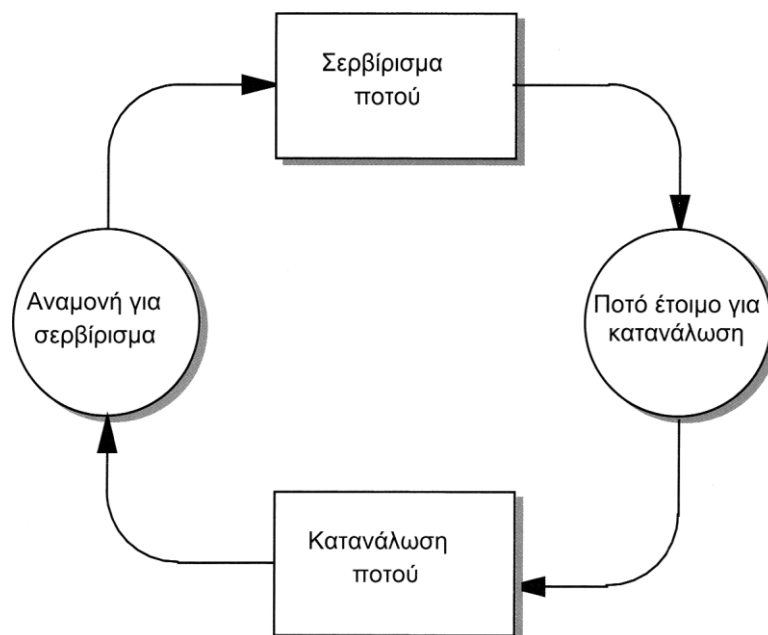
Παράδειγμα 4.4.

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.



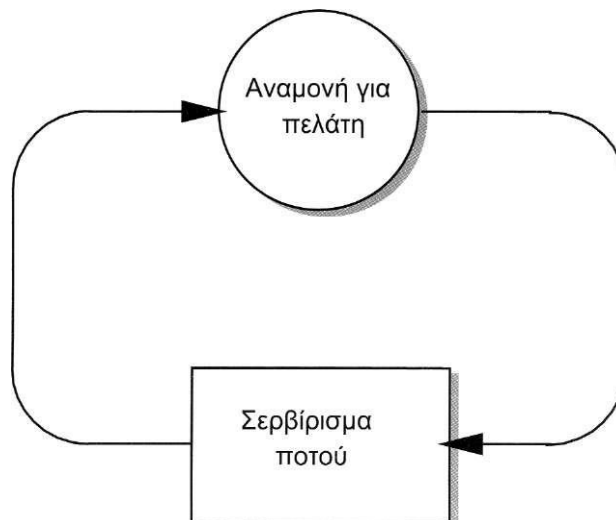
Σχήμα 4.12. Διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του κάθε πελάτη

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.

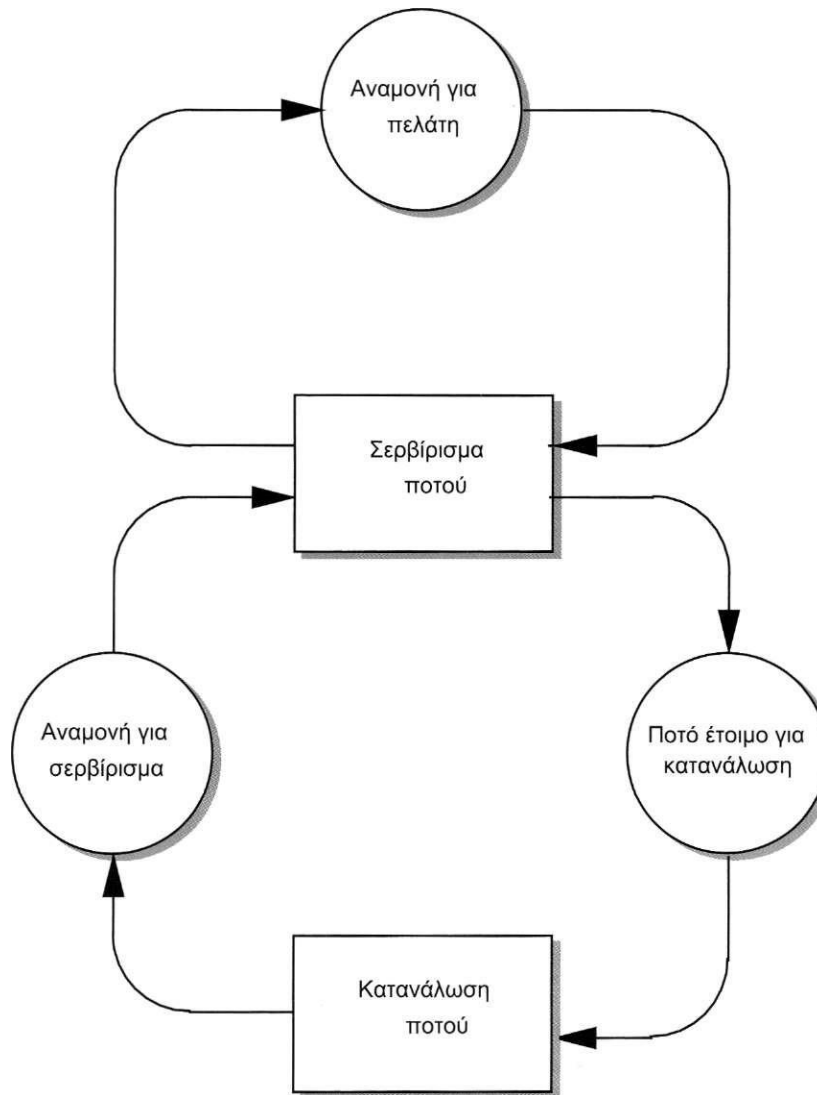
Όσον αφορά τον μπάρμαν, αυτός μπορεί να βρίσκεται σε κάποια από τις δύο καταστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13.:

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.



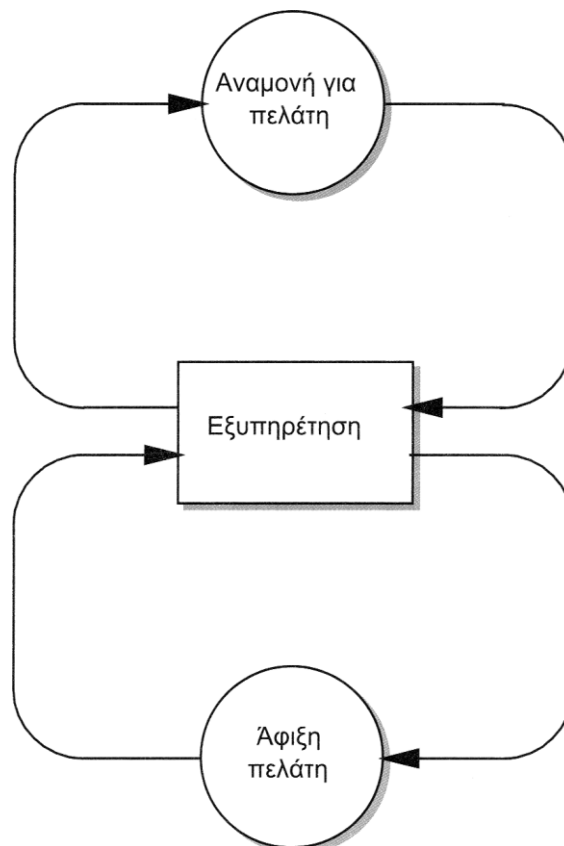
Σχήμα 4.14. Διάγραμμα κύκλου δραστηριοτήτων του μπαρ

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. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ

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

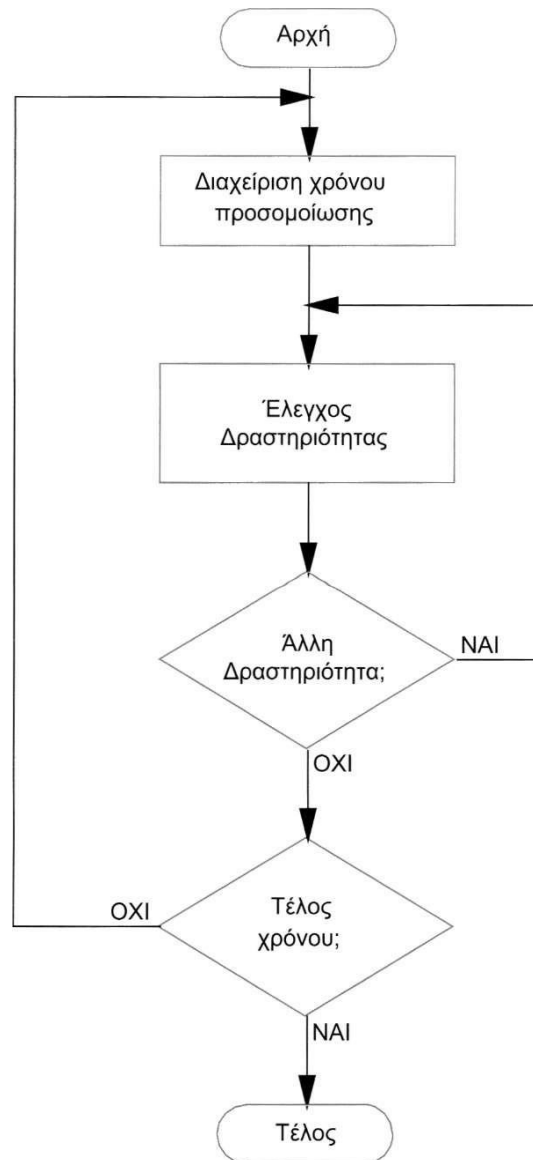
Ο έλεγχος του χρόνου γίνεται και πάλι μέσω του ρολογιού της προσομοίωσης, το οποίο δείχνει σε κάθε χρονική στιγμή το χρόνο της προσομοίωσης. Η διαχείριση όμως του ρολογιού, γίνεται στην περίπτωση αυτή με βάση την αρχή και το τέλος κάθε

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. ΡΟΥΤΙΝΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

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 ενέργειες. 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

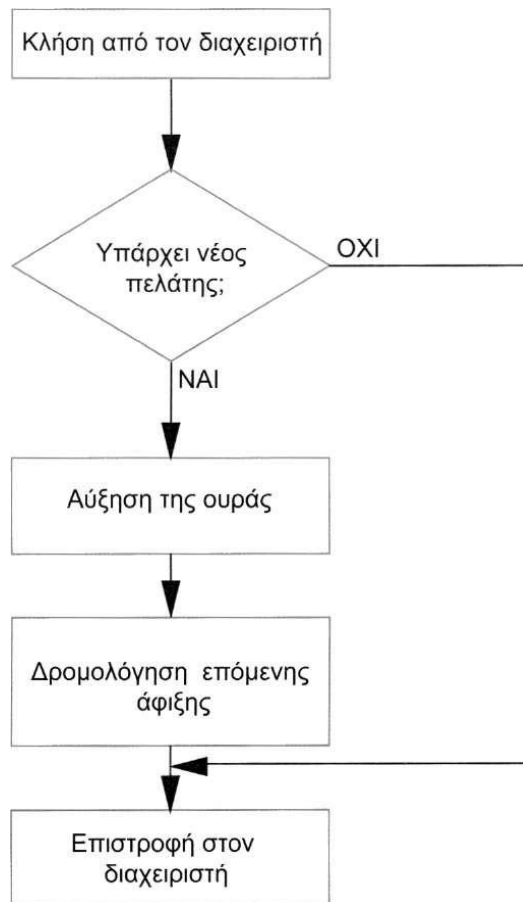
Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε τον ορισμό της δραστηριότητας που δόθηκε στην αρχή της Ενότητας 4.2.: Δραστηριότητα είναι μία λειτουργία η οποία μεταβάλλει την κατάσταση μίας οντότητας. Επομένως, στο παράδειγμα της απλής ουράς υπάρχουν τρεις δραστηριότητες, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο:

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 "Αφιξη πελάτη" δίνεται στο Σχήμα 4.17.

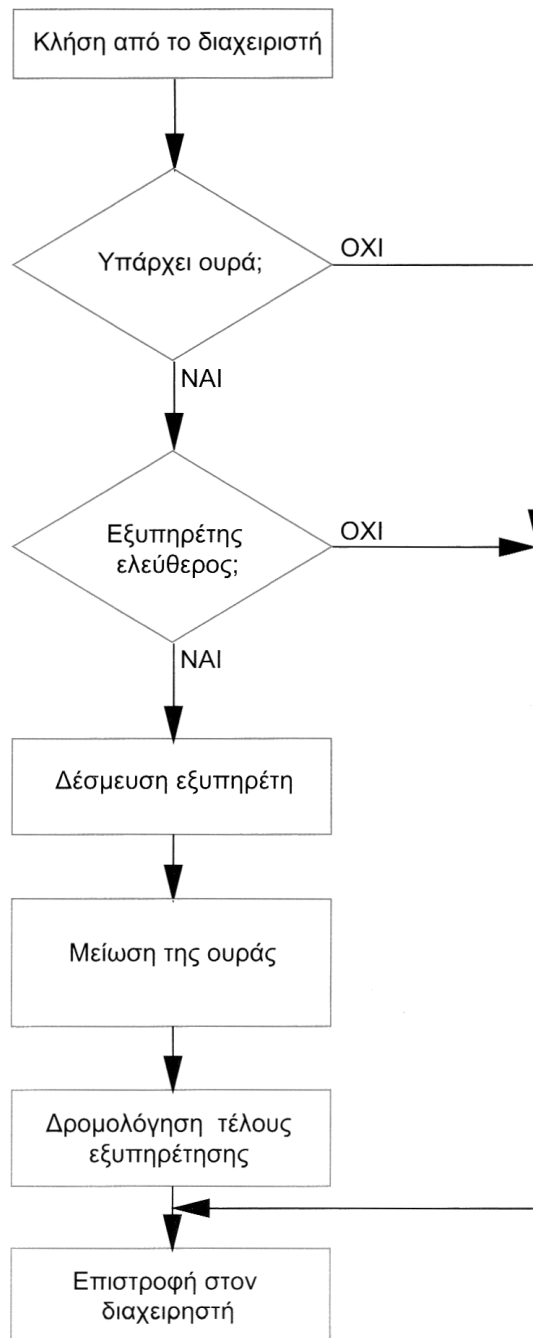


Σχήμα 4.17. Διάγραμμα της ρουτίνας υλοποίησης της "Αφιξη πελάτη"

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

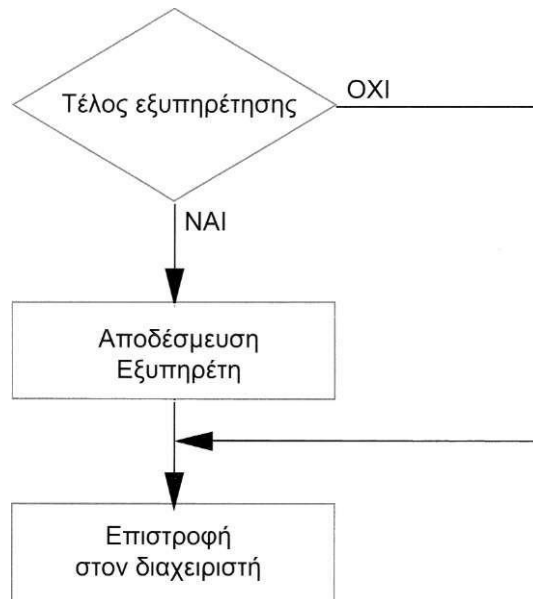
1. Τη δέσμευση του εξυπηρέτη
2. Τη μείωση της ουράς (αφαίρεση του πελάτη από την ουρά)
3. Τη σχεδίαση του τέλους της εξυπηρέτησης

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.

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. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

4.5.1. ΟΡΙΣΜΟΣ

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.

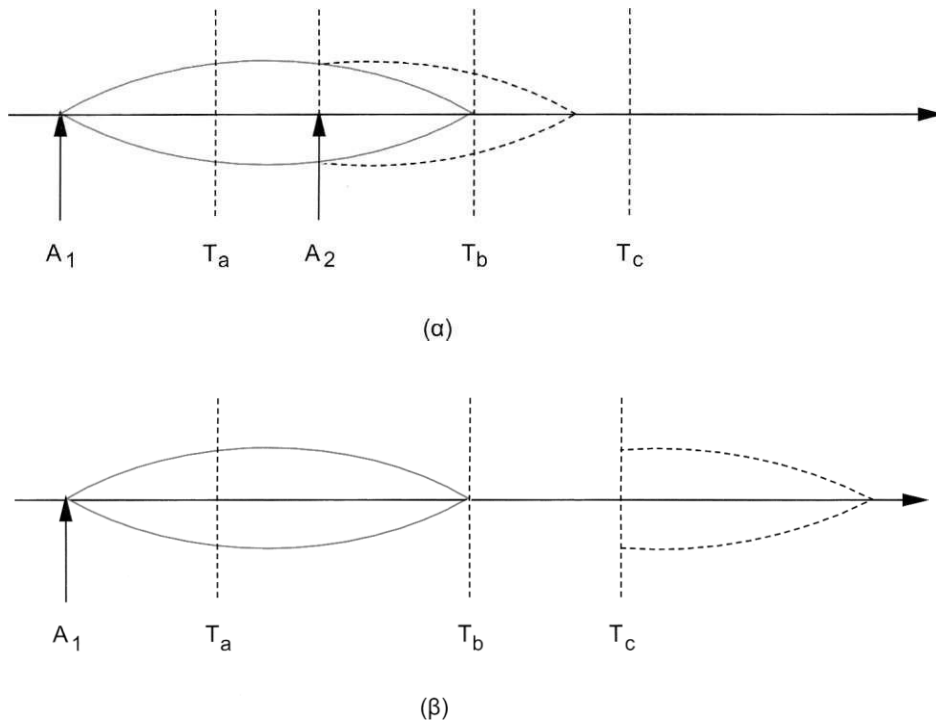
Στην προσομοίωση διεργασιών, κάθε τμήμα του μοντέλου έχει τη δική του χρονική λίστα γεγονότων, τα οποία εκτελούνται από το τμήμα σε χρονική σειρά. Η γενική χρονική λίστα, την οποία διαχειρίζεται το πρόγραμμα ελέγχου, περιέχει τα σήματα διατμηματικής επικοινωνίας, επίσης σε χρονολογική σειρά. Τα γεγονότα 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. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

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 .

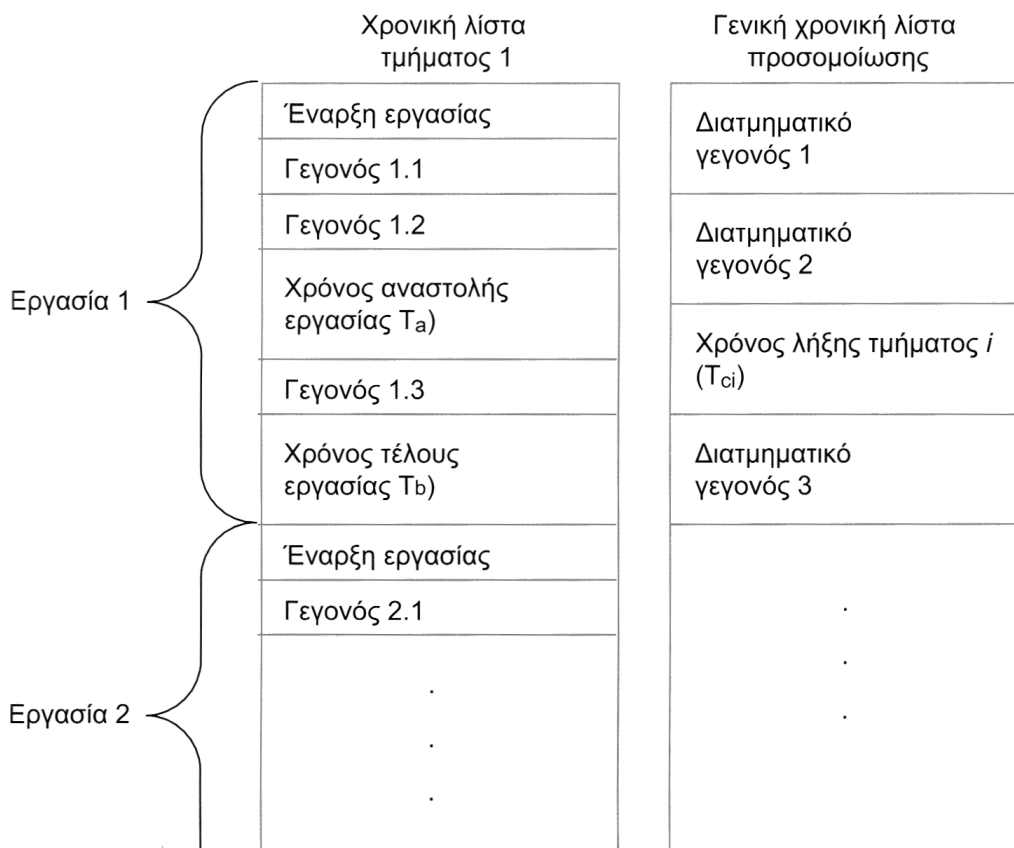


Σχήμα 4.20. Χρονικό διάγραμμα προσομοίωσης διεργασιών

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.

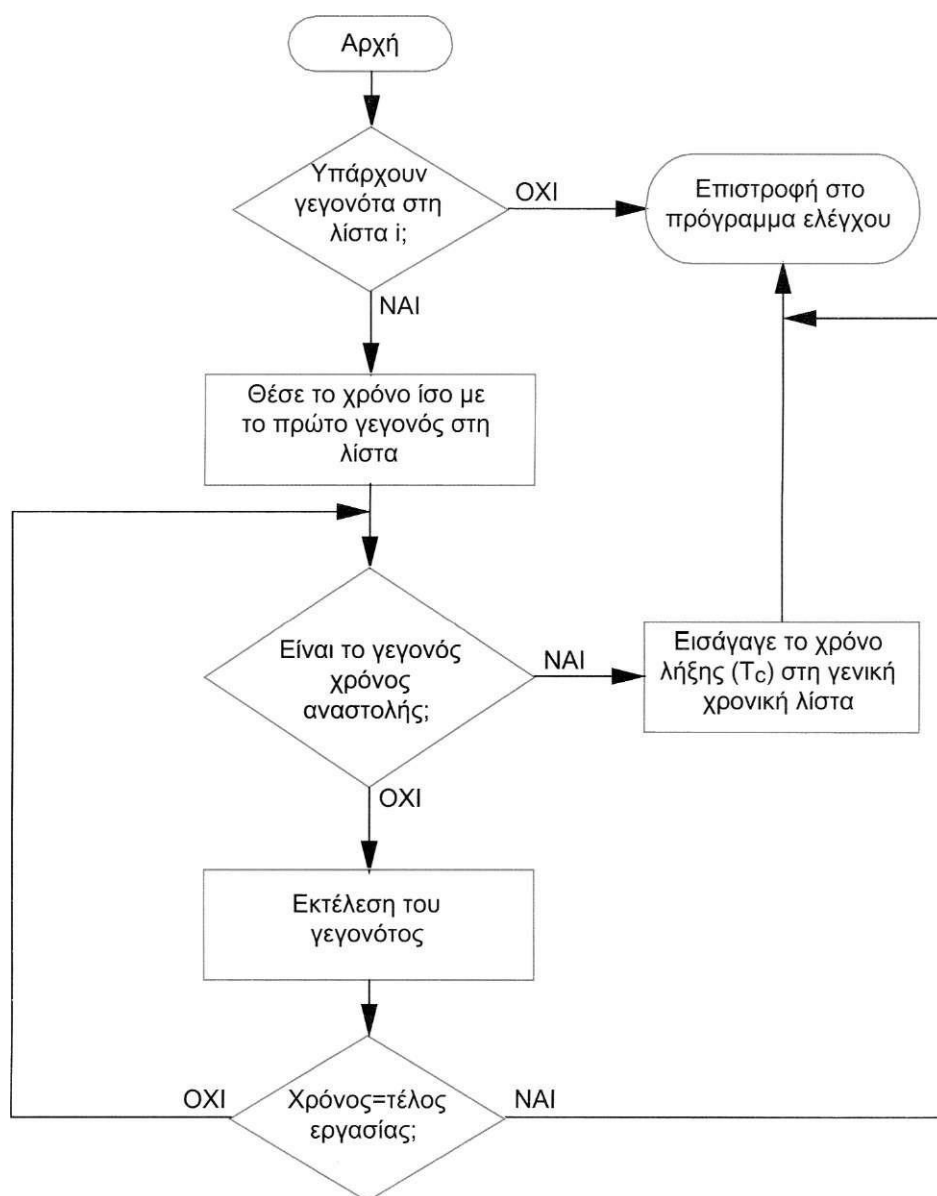
Με βάση αυτούς τους ορισμούς των χρόνων των εργασιών, δίνεται στο Σχήμα 4.21. μία αναπαράσταση της χρονικής λίστας ενός τμήματος του μοντέλου και της γενικής χρονικής λίστας της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.21. Χρονική λίστα τμήματος μοντέλου και γενική χρονική λίστα

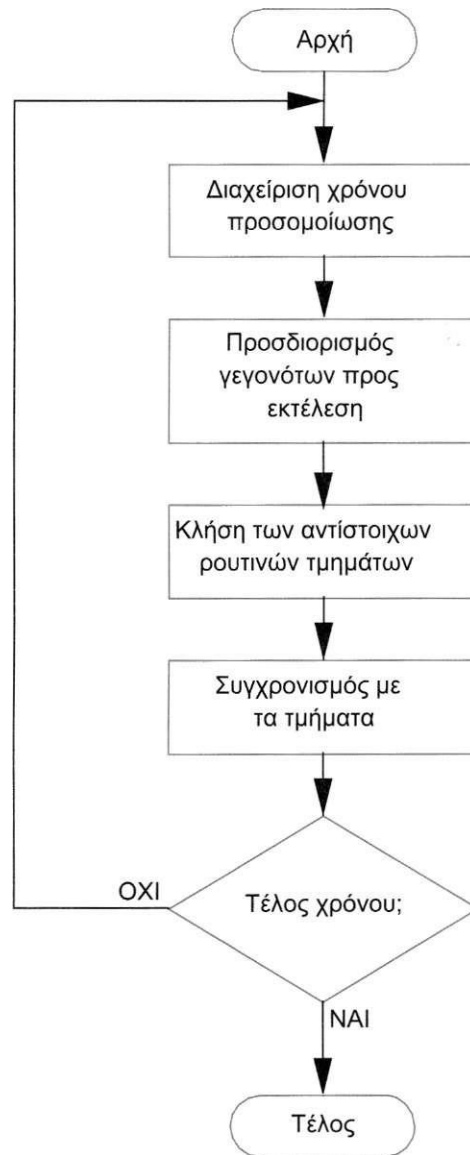
Όπως γίνεται αντιληπτό από τον ορισμό των εργασιών και τις χρονικές λίστες των γεγονότων, η διαχείριση του χρόνου της προσομοίωσης είναι αρκετά πολύπλοκη στην προσομοίωση διεργασιών γιατί πρέπει να γίνεται ταυτόχρονα και από το πρόγραμμα ελέγχου (διαχειριστή) της προσομοίωσης και από κάθε ρουτίνα προσομοίωσης 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).

4.6. ΜΕΘΟΔΟΣ MONTE CARLO

4.6.1. ΟΡΙΣΜΟΣ

Γενικά ως τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo ονομάζονται όλες εκείνες τις τεχνικές που χρησιμοποιούν την παραγωγή τυχαίων αριθμών από μια ομοιόμορφη κατανομή πώς για την επίλυση προβλημάτων μέσω κάποιου μοντέλου (Rubinstein & Kroese, 2007). Υπό αυτήν την έννοια, τα μοντέλα προσομοίωσης συστημάτων στοχαστικών, διακριτών γεγονότων τα οποία χρησιμοποιούν γεννήτριες τυχαίων αριθμών θα μπορούσαν να θεωρηθούν ότι υπάγονται στην κατηγορία αυτή (Kleijnen, 1974; Zimmermann, 2008). Εμείς θα θεωρούμε ως μέθοδο Monte Carlo κάθε προσομοίωση ενός στατικού συστήματος με τη χρήση γεννητριών τυχαίων αριθμών, ενώ όταν έχουμε προσομοίωση ενός δυναμικού, διακριτού στοχαστικού συστήματος θα αναφερόμαστε σε προσομοίωση διακριτών γεγονότων. Άλλες εφαρμογές της Monte Carlo προσομοίωσης εντοπίζονται στην επίλυση προσδιοριστικών προβλημάτων όπως είναι, για παράδειγμα, ο υπολογισμός ενός ολοκληρώματος ή στην παραγωγή τιμών από κατανομές πιθανοτήτων με μεγάλο εύρος σημαντικών εφαρμογών στην επίλυση προβλημάτων ανάλυσης ρίσκου.

4.6.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την επίλυση επιχειρησιακών προβλημάτων –και κατ' επέκταση, η ανάπτυξη του γνωστικού αντικείμενου της Επιχειρησιακής Έρευνας– έχει τις ρίζες της στις έρευνες που έλαβαν χώρα κυρίως από τις συμμαχικές δυνάμεις κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο με σκοπό την επίλυση σημαντικών επιχειρησιακών προβλημάτων στρατιωτικής υφής (military operations research). Η ιστορία της προσομοίωσης– κυρίως με τη χρήση υπολογιστών– ανάγεται στη δουλειά δύο σπουδαίων μαθηματικών του 20ού αιώνα, του Jon Von Neumann και του Stanislaw Ulam οι οποίοι εργάστηκαν στο σχέδιο Manhattan. Το σχέδιο αυτό αφορούσε την ανάπτυξη ατομικών αντιδραστήρων και πυρηνικών όπλων Στην προσπάθειά τους να μοντελοποιήσουν τη συμπεριφορά των νετρονίων (υπο-σωματιδίων), ανέπτυξαν μια τεχνική που έμοιαζε με τις επαναλήψεις του παιχνιδιού της ρουλέτας. Η πρώτη αυτή προσέγγιση ονομάστηκε μέθοδος Monte Carlo (από το γνωστό πριγκιπάτο που εκείνη την εποχή δέσποζε με το ομώνυμο καζίνο). Μέχρι σήμερα, η εν λόγω μέθοδος αναφέρεται στη χρήση μιας στοχαστικής πειραματικής διαδικασίας (random experiment) με σκοπό την επίλυση ενός προβλήματος, κάτι που συμβαίνει συχνά στη λεγόμενη στατική προσομοίωση ενός συστήματος, δηλαδή, ενός συστήματος του οποίου η συμπεριφορά δεν εξαρτάται από τον πραγματικό χρόνο, αλλά κυρίως αφορά την

εκτίμηση παραμέτρων που στηρίζονται σε κατανομές πιθανοτήτων και ιδίως στην ανάλυση ρίσκου.

4.6.3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η μέθοδος Monte Carlo συνοψίζεται στα εξής:

1. Εκφράζουμε την άγνωστη ποσότητα ως συνάρτηση γνωστών ποσοτήτων και πιθανοτήτων
2. Υπολογίζουμε τις πιθανότητες με κάποια επαναληπτική μέθοδο ή με μία από τις μεθόδους δειγματοληψίας που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο αυτό.
3. Αντικαθιστούμε τις πιθανότητες στη συνάρτηση και υπολογίζουμε την άγνωστη ποσότητα.

4.6.4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Θα αναφέρουμε μία εφαρμογή της, τον υπολογισμό του ολοκληρώματος

$$C = \int_{\alpha}^{\beta} h(x) dx, \quad (1)$$

όπου $h(x)$ μία συνάρτηση της οποίας το ολοκλήρωμα δεν μπορεί να υπολογισθεί αναλυτικά. Αυτό το πρόβλημα προφανώς είναι αιτιοκρατικό. Θα το λύσουμε με εργαλεία από τη θεωρία πιθανοτήτων.

Εστω X μία ομοιόμορφη τ.μ. στο διάστημα (α, β) (συμβολικά γράφουμε $X \sim U(\alpha, \beta)$), και Y μία άλλη τ.μ. που δίνεται από τον τύπο

$$Y = (\beta - \alpha) h(X) \quad (2)$$

Η X έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_X(x) = (\beta - \alpha)^{-1}$ για $x \in (\alpha, \beta)$. Η

αναμενόμενη τιμή της Y είναι

$$\begin{aligned} E\{Y\} &= E\{(\beta-\alpha)h(X)\} = (\beta-\alpha) E\{h(X)\} = (\beta-\alpha) \int_{\alpha}^{\beta} h(x) f_X(x) dx \\ &= (\beta-\alpha) \int_{\alpha}^{\beta} h(x) \frac{1}{(\beta-\alpha)} dx = \int_{\alpha}^{\beta} h(x) dx = C. \end{aligned} \quad (3)$$

Γιά τον υπολογισμό του ολοκληρώματος C παράγουμε μία ακολουθία n ανεξάρτητων τυχαίων αριθμών $x_1, \dots, x_n \sim U(\alpha, \beta)$. Εφαρμόζοντας την Εξ. (2) για $X = x_i$, ευρίσκουμε την ακολουθία y_1, \dots, y_n . Αποδεικνύεται ότι η δειγματική μέση τιμή $Y(n)$ των y_i είναι αμερόληπτη εκτιμήτρια της C , δηλ. $E\{Y(n)\} = C$. Πράγματι, ορίζουμε

$$Y(n) \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

οπότε

$$E[Y(n)] = E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(y_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C = \frac{1}{n} nC = C.$$

Βλέπουμε ότι η μέση τιμή της $Y(n)$ είναι ίση με την ποσότητα που ζητάμε. Αλλά όμως και η μέση τιμή ενός μόνον αποτελέσματος y_i ισούται με την ίδια ποσότητα, C . Τότε γιατί προτιμάμε το μέσο όρο $Y(n)$ αντί μίας μόνο δειγματικής τιμής y_i που έχει λιγότερο υπολογιστικό βάρος; Οι διασπορά μίας εκτιμήτριας $Y(n)$ ή y_i είναι το μέτρο της απόστασής της από τη μέση τιμή C . Παρατηρούμε ότι

$$\text{Var}(y_i) = \text{Var}(Y) \stackrel{\Delta}{=} E[(Y - C)^2]$$

ενώ, λόγω του ότι οι x_i είναι ανεξάρτητες τ.μ., οι y_i είναι επίσης ανεξάρτητες οπότε

$$\text{Var}[Y(n)] = \text{Var}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \text{Var}(y_i) = \frac{1}{n^2} n \text{Var}(Y) = \frac{\text{Var}(Y)}{n}$$

Συνεπώς για $n \rightarrow \infty$, η διασπορά της $Y(n)$ τείνει στο 0, οπότε $Y(n) \rightarrow C$ κατά μέσο τετράγωνο. Μπορούμε επομένως να προσεγγίσουμε το C με μεγάλη ακρίβεια επιλέγοντας μεγάλο n .

5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΚΛΟΥ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ

5.1. ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΔΚΔ

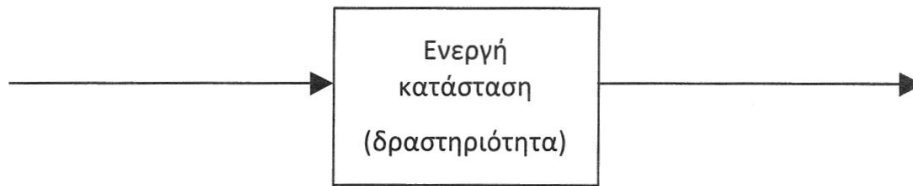
Τα Διαγράμματα Κύκλου Δραστηριοτήτων είναι ένα είδος λογικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για τη γραφική αναπαράσταση μοντέλων προσομοίωσης. Αναπτύχθηκαν αρχικά σαν μια πρόχειρη μέθοδος που χρησιμοποιούσε μόνο δυο σύμβολα: ένα ορθογώνιο για τις δραστηριότητες και ένα κύκλο για τις ουρές. Το ορθογώνιο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

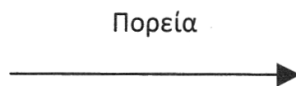
Ο κύκλος (Σχήμα 5.1.) δείχνει την ανενεργή κατάσταση ή ουρά και αφορά συνήθως την αναμονή της οντότητας μέχρι να συμβεί ένα γεγονός. Η διάρκεια της κατάστασης αυτής δεν μπορεί να οριστεί από την αρχή, αφού ο χρόνος αναμονής στην ουρά δεν είναι προκαθορισμένος.



Σχήμα 5.2. Ενεργή κατάσταση (δραστηριότητα)

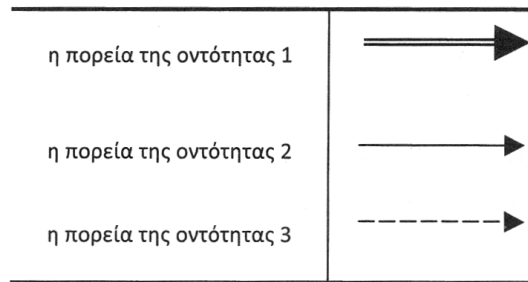
Από την άλλη, η ενεργή κατάσταση ή δραστηριότητα, αναφέρεται στην πιθανή αλληλεπίδραση μιας οντότητας με οντότητες που ανήκουν σε κάποια άλλη κατηγορία. Η διάρκεια μιας ενεργούς κατάστασης μπορεί πάντα να προσδιορίζεται εξ αρχής, συνήθως με δειγματοληψία από κάποια κατανομή πιθανοτήτων.

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.):

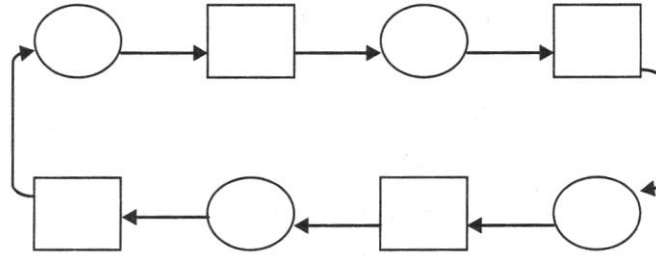


Πίνακας 5.1. Ίχνη διαφορετικών οντοτήτων

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.

5.1.1. ΚΑΝΟΝΕΣ ΔΟΜΗΣΗΣ

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

5.1.2. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

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).

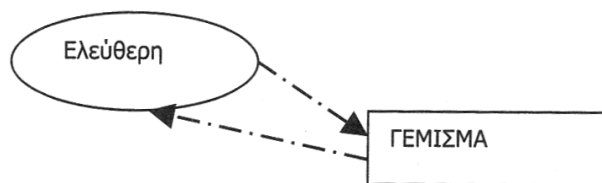
Πρώτο βήμα λοιπόν είναι να εντοπίσουμε τις οντότητες και τις δραστηριότητες που αφορούν στο σύστημα, ώστε να εξάγουμε τον κύκλο ζωής και το ΔΚΔ κάθε οντότητας. Όπως συμπεράναμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, όταν παρουσιάσαμε το σύστημα αυτό, οντότητες είναι το αυτοκίνητο, ο υπάλληλος, το πλυντήριο και 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.

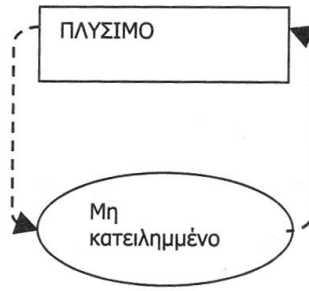
Το ΔΚΔ της είναι λοιπόν:



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

Πλυντήριο:

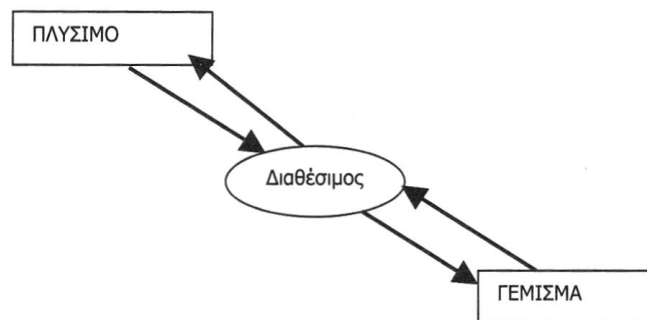
μη κατειλημμένο (Ο) → πλύσιμο (Δ) → μη κατειλημμένο (Ο) κοκ.



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.



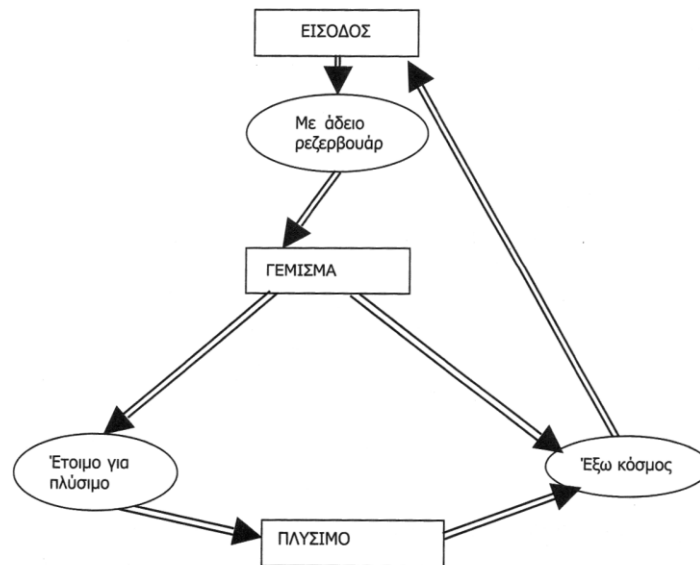
Προσοχή: Η παραπάνω απεικόνιση του κύκλου ζωής σημαίνει ότι ο υπάλληλος μπορεί κάποια στιγμή που είναι ελεύθερος να πρέπει να επιλέξει αν θα εμπλακεί σε δραστηριότητα πλυσίματος ή γεμίσματος, αν και οι δυο μπορούν να ξεκινήσουν. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να καθοριστούν προτεραιότητες μεταξύ των σχετικών 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

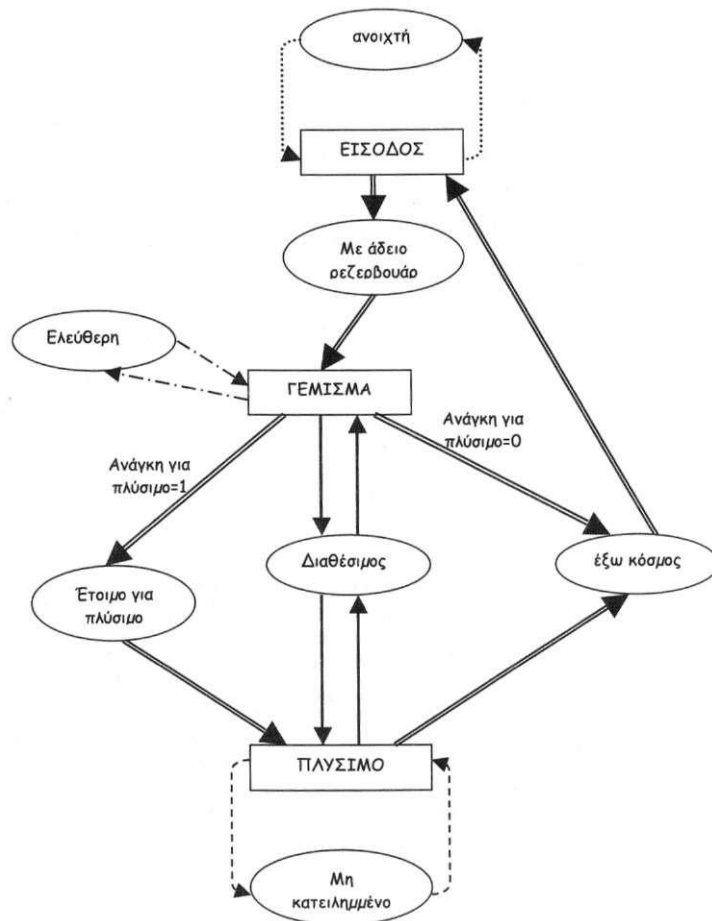
πλύσιμο πριν αποχωρήσει από το σύστημα. Έτσι, ο κύκλος ζωής και το ΔΚΔ του είναι:

Αυτοκίνητο:

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



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):

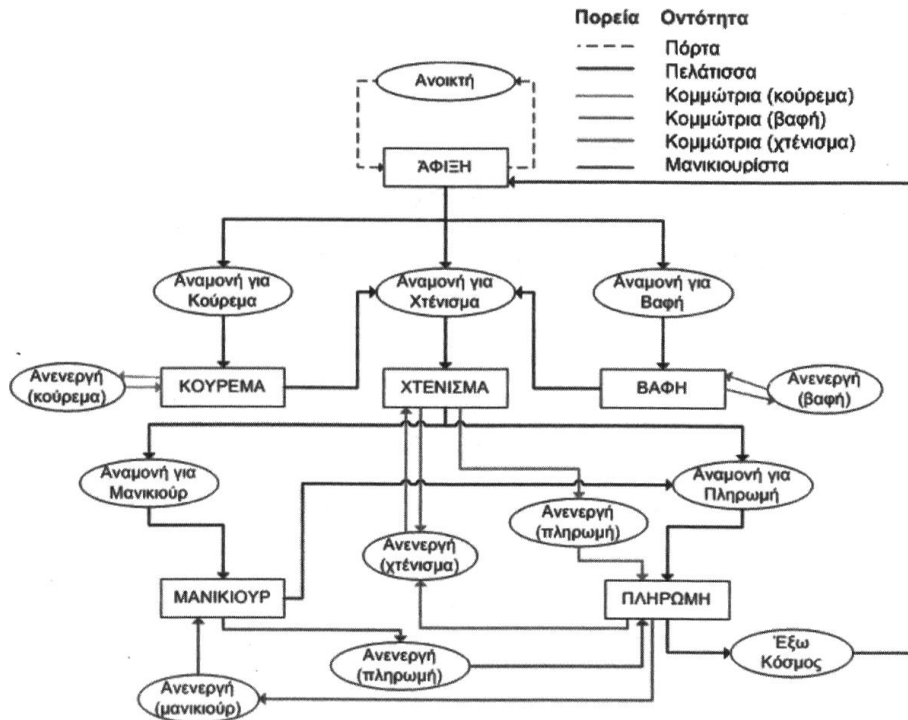
ΠΟΡΕΙΑ	ΟΝΤΟΤΗΤΑ	ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ
⇒	αυτοκίνητο	1. γέμισμα 2. πλύσιμο
→	υπάλληλος	
- - - - -	αντλία	
- - - - -	πλυντήριο	
.....	πόρτα	

Σχήμα 5.5. Διάγραμμα ΔΚΔ του βενζινάδικου

5.1.3. ΑΛΛΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

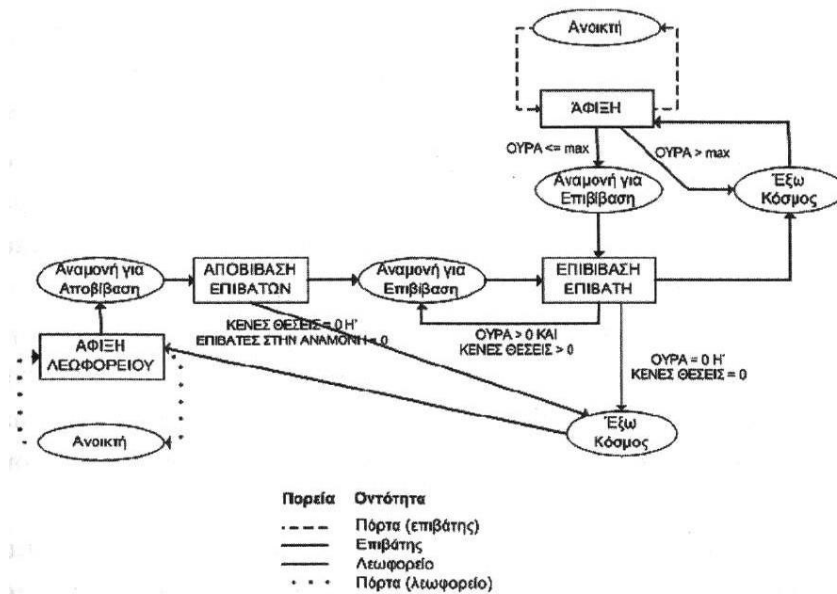
Στο υποκεφάλαιο αυτό, θα δώσουμε τα ΔΚΔ για το κομμωτήριο και τη στάση λεωφορείου που είδαμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Η ανάλυσή τους αφήνεται ως άσκηση για τον αναγνώστη.

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»

5.2. ΣΗΜΕΙΟΛΟΓΙΑ

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.

5.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

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.

5.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

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.

5.4.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ

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.

5.4.2. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

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).

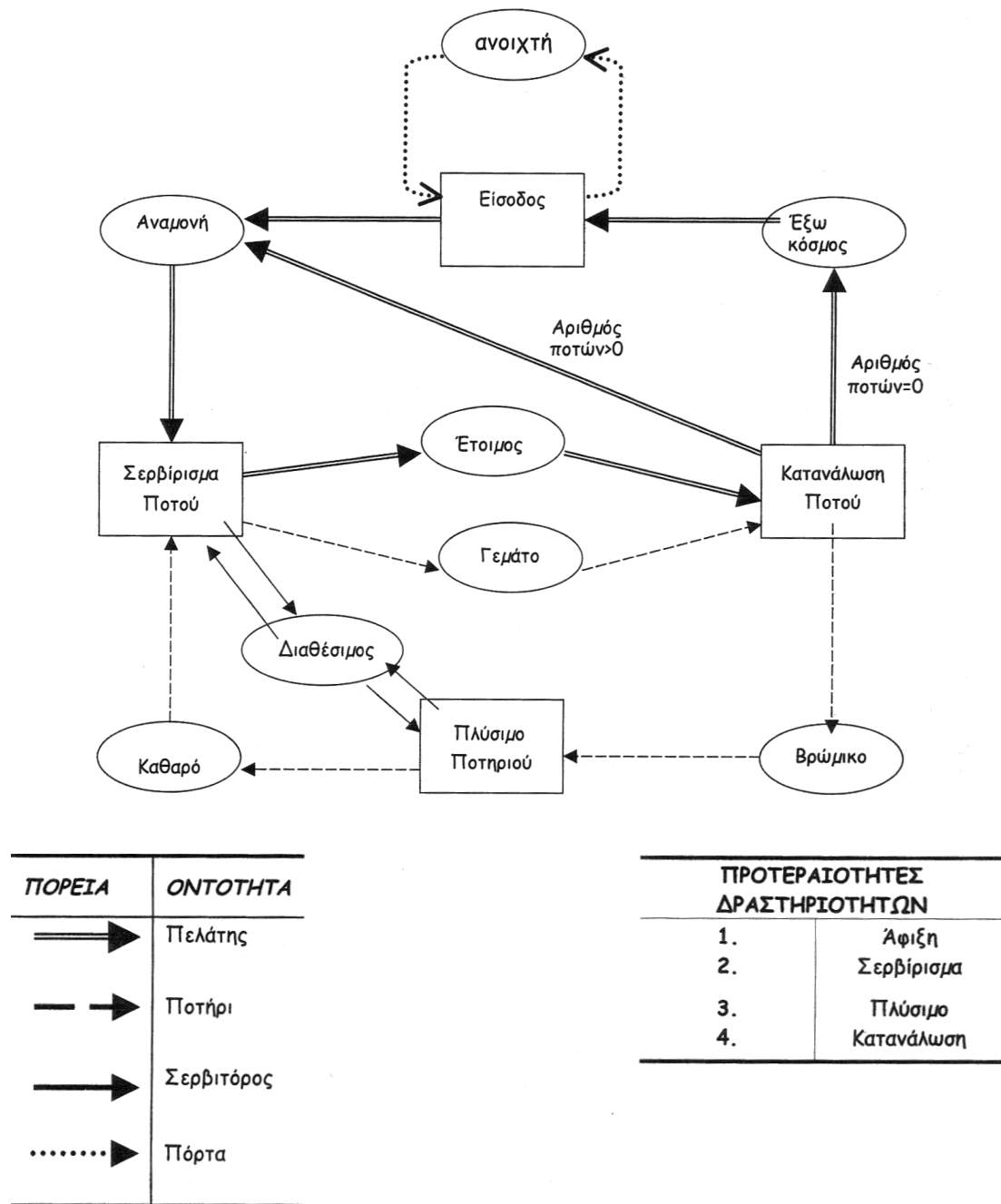
ΟΝΤΟΤΗΤΕΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ
Σερβιτόρος		<ul style="list-style-type: none"> ■ Σερβίρισμα ■ Πλύσιμο
Πελάτης	Αριθμός ποτών	<ul style="list-style-type: none"> ■ Κατανάλωση ■ Σερβίρισμα ■ Άφιξη πελάτη
Ποτήρι		<ul style="list-style-type: none"> ■ Πλύσιμο ■ Κατανάλωση ■ Σερβίρισμα
«Πόρτα»		<ul style="list-style-type: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

6. ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

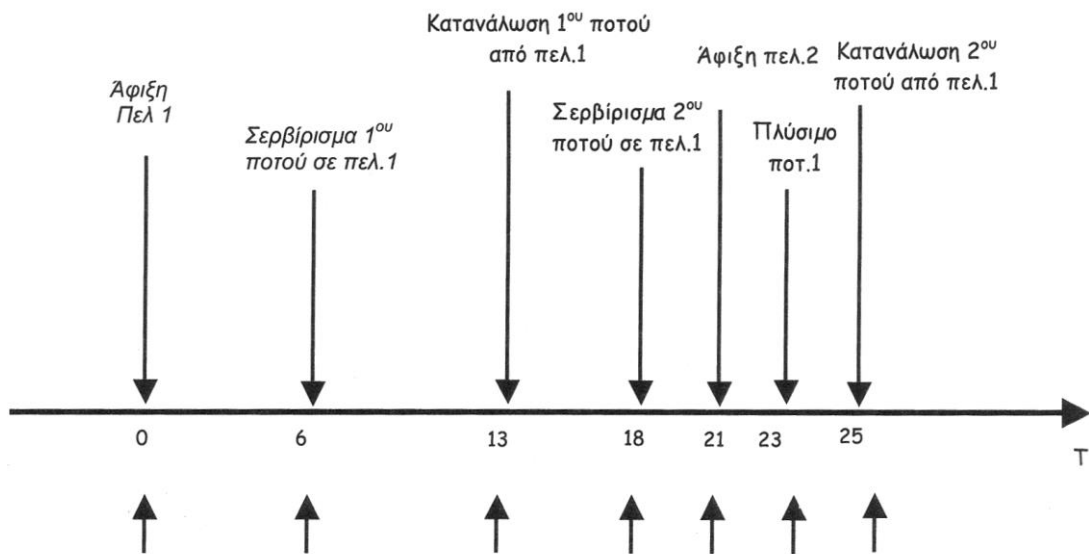
Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκαν η μετάβαση από ένα σύστημα σε ένα μοντέλο, η κατασκευή μοντέλων και η γραφική απεικόνισή τους. Η προσομοίωση όμως όπως έχει προαναφερθεί ασχολείται με δυναμικά συστήματα και δεν αφορά στατικές καταστάσεις. Επομένως, η γραφική αναπαράσταση δεν αρκεί για την παρατήρησή 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. ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ

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.

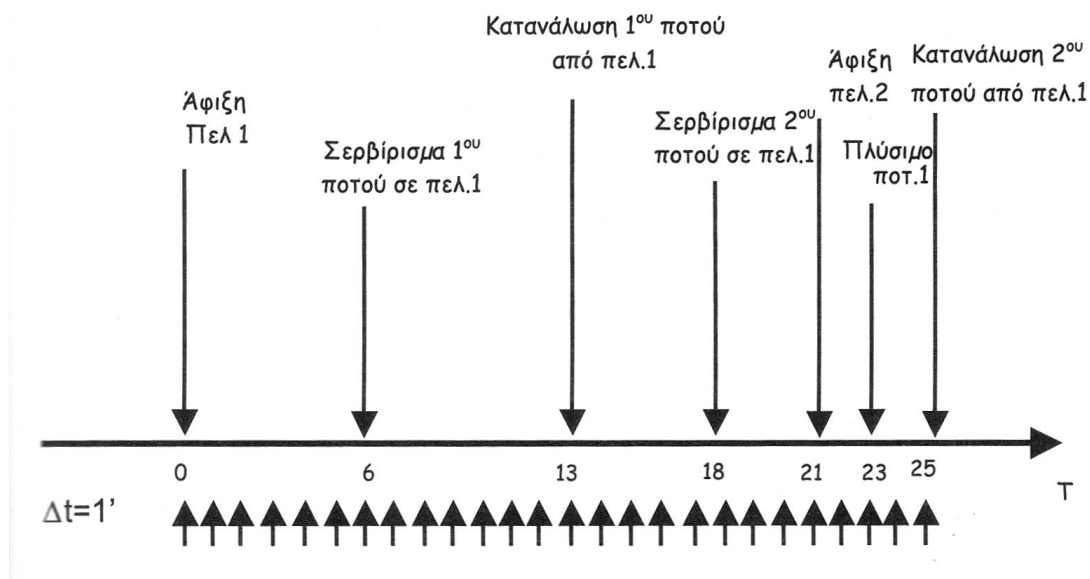
Στη γνωστή περίπτωση του μπαρ, ο μηχανισμός επόμενου γεγονότος για τα πρώτα 25 λεπτά εκτέλεσης του μοντέλου θα είχε το παρακάτω αποτέλεσμα (Σχήμα 6.1.). Συγκρίνοντας μάλιστα το παρακάτω σχήμα με τον πίνακα επίλυσης του συστήματος επικυρώνεται το ότι ο χρόνος σταματά μόνο σε στιγμές που συμβαίνουν γεγονότα 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. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΠΟΜΕΝΟΥ ΓΕΓΟΝΟΤΟΣ

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. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

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.

7. ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προσομοίωση μπορεί να εφαρμοστεί, από προβλήματα στην καθημερινή μας ζωή ,μέχρι πολύπλοκα υπολογιστικά προβλήματα, ενώ υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων ανάλυσης προβλημάτων. Στην εργασία αυτή 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. Παρουσιάστηκαν οι κύριες φάσεις της προσομοίωσης καθώς και τα είδη μοντέλων. Υπάρχουν διαφορετικά είδη μοντέλων και συστημάτων, και πάντα επιλέγουμε το συνδυασμό που αντιπροσωπεύει καλύτερα τις ανάγκες μας, με βάση τις παραμέτρους που έχουμε ορίσει προκρίμενου ν'ανταποκρίνεται το μοντέλο στο σύστημα που θέλουμε να προσομοιώσουμε πρέπει η χρήση των παραμέτρων να γίνει όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Γίνεται ανάλυση της έννοιας του συστήματος, αλλά και των μοντέλων συστημάτων. Τα διακριτά μοντέλα, στα οποία οι δραστηριότητες μελετώνται ως σταθερές και σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, χρησιμοποιούνται για την κατανόηση των βασικών λειτουργιών του συστήματος, καθώς και της ποιοτικής του ανάλυσης. Αναφέρονται οι λόγοι κατασκευής ενός μοντέλου, οι τύποι και οι παράμετροι που πρέπει να λάβει υπ' όψιν ο κατασκευαστής του μοντέλου. 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. Στα διακριτά μοντέλα γίνεται περιγραφή των καταστάσεων που μπορούν να συμβούν κάθε χρονική περίοδο. Αναλύονται οι μεθοδολογίες προσομοίωσης, δηλαδή ο διαχειριστής, οι ρουτίνες υλοποίησης, οι λεπτομερείς ρουτίνες, όπως επίσης και η μέθοδος Monte Carlo.

Στη συνέχεια ορίστηκαν τα θεμελιώδη στοιχεία ενός συστήματος, δηλαδή οι οντότητες, τα χαρακτηριστικά τους, τα γεγονότα και οι δραστηριότητες. Εξηγούνται οι κατηγορίες των δραστηριοτήτων και με βάση αυτές γίνεται η ταξινόμηση των συστημάτων. Περιγράφηκαν οι ουρές και τα αναμονητικά συστήματα, ενώ αναφέρθηκαν και τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Παρατέθηκαν ορισμένα παραδείγματα μοντελοποίησης συστημάτων απ' όπου και προέκυψαν ορισμένοι εμπειρικοί κανόνες προσομοίωσης.

Οι μεθοδολογίες προσομοίωσης έχουν τη ίδια δομή, αλλά διαφέρουν ως προς το βαθμό ανάλυσης των συστημάτων, ενώ η πιο κατάλληλη είναι η προσομοίωση διεργασιών, για εφαρμογή με παράλληλη επεξεργασία, όπου τμήματα του μοντέλου προσομοιώνονται, καθένα ξεχωριστά σε λιγότερο χρόνο. Τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν ν'αναλυθούν παραστατικότερα με τη χρήση Διαγραμμάτων Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ) ως προς τις δραστηριότητες που συμβαίνουν στο σύστημα. Αναλύθηκαν βασικές έννοιες για τη δόμηση των Διαγραμμάτων Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ), καθώς επίσης και σχετικά παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση αυτών. 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. Ασχοληθήκαμε με τη μέθοδο των τριών φάσεων, μία μέθοδο εκτέλεσης προσομοίωσης και παραθέσαμε ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόησή της.

Επιπροσθέτως τα μοντέλα μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση του χρόνου (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». Προβλήθηκαν οι δύο μηχανισμοί ροής του χρόνου και στη συνέχεια έγινε μία σύγκριση 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. Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η χρήση διακριτών γεγονότων διευκολύνει τον τρόπο προσέγγισης της λειτουργίας του δικτύου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Banks, (2005). Discrete Event System Simulation, Book.
- Boutsikas M.V, (2004). Σημειώσεις μαθήματος «Μέθοδοι Προσομοίωσης και Στατιστικές Υπολογιστικές Τεχνικές».
- Brockmeyer E., (1948). Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences, The life and works of A.K.Erlang.
- Daniel W. McGregor & Matthew J. Cain. An Introduction to Simul8, Department of Management College of Business and Economics, University of Canterbury New Zealand.
- Estrin D., (1999). Network Visualization with the Vint Network Animator Nam, tech.report, Computer Science Dept., Univ. Southern California, Los Angeles.
- Garrido J.M. (2001). Object Oriented Discrete Event Simulation with java A Practical Introduction, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Gilbert N. (1995). Simulation: an emergent perspective, conference, New Technologies in the Social Sciences Bournemouth, UK.

- Gordon G. (1978). System Simulation, 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey..
- Law Averill M. (2007). Simulation Modeling and Analysis, 4th edition.
- Ricketts Chris (University of Plymouth) & Shalliker Jim (Heybrook Associates), (2005). An Introduction to SIMUL8, Release 12.
- Tocher K.D. (1962). The Art of Simulation, English Universities Press, London.
- Αγγελής Ελευθέριος (2006). Πανεπιστημιακές παραδόσεις- παρουσιάσεις, Τμήμα Πληροφορικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Καρατζά Ελένη (2008). Σημειώσεις: Μοντελοποίηση και Προσομοίωση.
- Πάνας Αντώνης (2007). Έρευνα: Ανάλυση συστημάτων και λειτουργική ανάλυση κατασκευαστικών διαδικασιών με τεχνικές προσομοίωσης.
- Ρουμελιώτης Μάνος (2001). Μοντελοποίηση και Προσομοίωση, Θεματική Ενότητα: Γραμμικός Προγραμματισμός και Μοντελοποίηση.
- Φεσάκης Γιώργος, Δημητρακοπούλου Αγγελική, Καλαβάσης Φραγκίσκος (2001). Fessakis G. , Dimitrakopoulou A. & Kalavassis F. (2001). Technology based Modelling Activities in Secondary Education: Exploration and Experimentation In (Ed) V. Makrakis, Proceedings of 91

- Χρυσολούρης Γεώργιος (2009-2010). Εργαστήριο Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού/Εργαστήριο Δυναμικής και Θεωρίας Μηχανών, Σπουδαστικές-Διπλωματικές Εργασίες 2009-2010.
- Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων, Πανεπιστήμιο Πατρών (2007). Προσομοίωση Επιχειρηματικών Διαδικασιών, Μάθημα 1: Εισαγωγή.
- Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων, Πανεπιστήμιο Πατρών (2007). Προσομοίωση Επιχειρηματικών Διαδικασιών Μάθημα 2: Συστήματα ουρών αναμονής και Activity Cycle Diagrams.
- John A. Sokolowski, Catherine M.Banks, Modeling and Simulation Fundamentals.
- Ιωάννης Α. Πικραμμένος, Σημειώσεις μαθήματος Τοπικά Δίκτυα (Ιούνιος 2008)

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- <http://www.simulation-argument.com/>
- <http://www.simul8.com/>
- <http://www.VisualT.com/> (Simul8 Manual)
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Simulation>