

Τμήμα  
Μηχανικών  
Πληροφορικής τ.ε.

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα  
Δυτικής Ελλάδας

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ***

*Βόμβυρας Αριστείδης*

*Γεωργόπουλος Χαράλαμπος*

*Επιβλέπων : Πουλαστίδης Χαράλαμπος*

**ΑΝΤΙΡΡΙΟ 2014**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αντίρριο,

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

- 1.
- 2.
- 3.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι αφενός μεν να παρουσιασθούν τα λογισμικά προσομοίωσης δικτύων και αφ' ετέρου να συγκρίνουμε τα λογισμικά προσομοίωσης δικτύων.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική αναφορά στις βασικές αρχές δικτύων και στο μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου OSI.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται ο ορισμός, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα και οι κατηγορίες της προσομοίωσης, καθώς και τα είδη, η δημιουργία, η κατασκευή μοντέλων και οι φάσεις της προσομοίωσης.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται τα λογισμικά προσομοίωσης δικτύων.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται η συγκριτική μελέτη λογισμικών προσομοίωσης δικτύων.

## Λέξεις - κλειδιά

- Δίκτυο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών
- Μοντέλο Αρχιτεκτονικής Δικτύου OSI
- Προσομοίωση Δικτύων
- Λογισμικά Προσομοίωσης Δικτύων

## **ABSTRACT**

The aim of this dissertation is on the one hand to present the network simulation software and on the other hand to compare the network simulation software.

In the 1<sup>st</sup> chapter is a theoretical reference to the basic principles of networks and the network architecture model OSI.

In the 2<sup>nd</sup> chapter describes the definition, the advantages and the disadvantages and the types of simulation as well as the types, the creating, the assembling of models and the phases of simulation.

In the 3<sup>rd</sup> chapter analyzes the network simulation software.

In the 4<sup>th</sup> chapter makes a comparative study of network simulation software.

## **Keywords**

- Computer Network
- Network Architecture Model OSI
- Simulation Network
- Simulation Software Network

## Πίνακας Περιεχομένων

|  |    |
|--|----|
| Κεφάλαιο 1 : Βασικές Αρχές Δικτύων .....                                     | 8  |
| 1.1  Εισαγωγή.....   | 8  |
| 1.2  Ορισμός και Δομικά Στοιχεία Δικτύου Ηλεκτρονικών Υπολογιστών .....      | 8  |
| 1.3  Πλεονεκτήματα Χρήσης Δικτύων.....                                       | 9  |
| 1.4  Μοντέλο Αρχιτεκτονικής Δικτύου OSI (Open Systems Interconnection) ..... | 10 |
| 1.5  Η Λειτουργία των Επιπέδων του Μοντέλου OSI .....                        | 12 |
| 1.5.1  Επίπεδο Εφαρμογής (Application layer) .....                           | 12 |
| 1.5.2  Επίπεδο Παρουσίασης (Presentation layer) .....                        | 12 |
| 1.5.3  Επίπεδο Συνόδου (Session layer) .....                                 | 12 |
| 1.5.4  Επίπεδο Μεταφοράς ( Transport layer) .....                            | 12 |
| 1.5.5  Επίπεδο Δικτύου (Network layer) .....                                 | 13 |
| 1.5.6  Επίπεδο Σύνδεσης Δεδομένων (Data link layer).....                     | 13 |
| 1.5.7  Φυσικό Επίπεδο (Physical layer) .....                                 | 13 |
| 1.6  Κατηγορίες Δικτύων .....  | 14 |
| 1.6.1  Ειδικές Περιπτώσεις Δικτύων .....                                     | 14 |
| 1.6.2  Δίκτυα Βάση Γεωγραφικής Κατανομής .....                               | 14 |
| 1.6.3  Δίκτυα Βάση Μέσων Μετάδοσης .....                                     | 14 |
| 1.6.4  Δίκτυα Βάση της Τεχνικής Προώθησης της Πληροφορίας.....               | 15 |
| Κεφάλαιο 2 : Προσομοίωση Δικτύων .....                                       | 18 |
| 2.1  Εισαγωγή.....   | 18 |
| 2.2  Ορισμός.....  | 18 |
| 2.3  Παραδείγματα Προσομοίωσης .....   | 19 |
| 2.3.1  Πρώτο Παράδειγμα .....  | 19 |
| 2.3.2  Δεύτερο Παράδειγμα.....   | 21 |
| 2.4  Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Προσομοίωσης .....                  | 22 |
| 2.5  Κατηγορίες Προσομοίωσης.....  | 23 |
| 2.5.1  Προσομοίωση Διακριτών Γεγονότων.....                                  | 23 |
| 2.5.2  Προσομοίωση Συνεχούς Χρόνου .....                                     | 25 |
| 2.5.3  Προσομοίωση Monte Carlo .....   | 26 |
| 2.6  Ορισμός Συστήματος και ιδιότητες συστημάτων .....                       | 27 |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 2.7   | Βήματα μελέτης ενός συστήματος με προσομοίωση.....          | 30 |
| 2.8   | Μοντέλα Προσομοίωσης.....                                   | 33 |
| 2.9   | Δημιουργία Μοντέλων Προσομοίωσης .....                      | 33 |
| 2.10  | Τα Είδη Μοντέλων Προσομοίωσης.....                          | 35 |
| 2.10.1  | Στατικά ή Δυναμικά Μοντέλα Προσομοίωσης.....                | 35 |
| 2.10.2  | Ντετερμινιστικά ή Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης.....      | 35 |
| 2.10.3  | Αυτο-οδηγούμενα ή Ιχνο-οδηγούμενα Μοντέλα Προσομοίωσης..... | 35 |
| 2.10.4  | Συνεχή ή Διακριτά Μοντέλα Προσομοίωσης.....                 | 36 |
| 2.11  | Κατασκευή Μοντέλων Προσομοίωσης.....                        | 36 |
| 2.12  | Φάσεις Προσομοίωσης.....                                    | 37 |
| 2.13  | Μοντέλα Συστημάτων.....                                     | 37 |
| 2.14  | Αντιστοιχία Μοντέλου Συστήματος .....                       | 40 |
| 2.15  | Κριτήρια Καλού Μοντέλου.....                                | 41 |
| Κεφάλαιο 3 : Λογισμικά Προσομοίωσης Δικτύων ..... |   | 42 |
| 3.1   | Εισαγωγή.....   | 42 |
| 3.2   | Ο Προσομοιωτής NS-2 .....                                   | 42 |
| 3.2.1   | Η Δομή του NS-2 .....                                       | 44 |
| 3.3   | Ο Προσομοιωτής NS-3 .....                                   | 45 |
| 3.3.1   | Η Δομή του NS-3 .....                                       | 46 |
| 3.4   | Ο Προσομοιωτής OMNET++.....                                 | 48 |
| 3.5   | Επισκόπηση του OMNET++ .....                                | 50 |
| 3.5.1   | Modules .....   | 50 |
| 3.5.2   | Messages, modes, connections.....                           | 50 |
| 3.5.3   | Παράμετροι (Parameters) .....                               | 51 |
| 3.5.4   | Προγραμματίζοντας τους αλγορίθμους .....                    | 51 |
| 3.5.5   | Δημιουργία και εκτέλεση προσομοίωσης.....                   | 51 |
| 3.6   | JSim.....   | 52 |
| 3.7   | GNS3.....   | 55 |
| 3.8   | SSFNet .....  | 55 |
| 3.9   | NetSim.....   | 56 |
| 3.10  | REAL .....  | 56 |
| 3.11  | NCTUns .....  | 56 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 3.12   | GloMoSim .....                                    | 57 |
| Κεφάλαιο 4 : Συγκριτική Μελέτη Λογισμικών Προσομοίωσης Δικτύων ..... |   | 58 |
| 4.1  | Σύγκριση μεταξύ NS-2, NS-3, OMNET++ και JSIM..... | 58 |
| 4.2  | Σύγκριση μεταξύ NS-2, NS-3.....                   | 59 |
| 4.3  | NS-2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα.....           | 59 |
| 4.4  | OMNET++ Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα.....        | 60 |
| 4.5  | NCTUns Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα.....         | 60 |
| 4.6  | GloMoSim Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα .....      | 61 |
| Συμπεράσματα .....   |   | 62 |
| Μελλοντική Έρευνα.....   |   | 63 |
| Βιβλιογραφία .....   |   | 64 |
| Βιβλία .....   |   | 64 |
| Websites.....  |   | 64 |
| Papers.....  |   | 64 |

## Κεφάλαιο 1 : Βασικές Αρχές Δικτύων

### 1.1 Εισαγωγή

Η έννοια του δικτύου [1] χρησιμοποιείται ευρύτατα στην καθημερινή μας ζωή. Αναφερόμαστε σε τηλεφωνικά δίκτυα, τηλεοπτικά δίκτυα, οδικά δίκτυα, σιδηροδρομικά δίκτυα, δίκτυα ύδρευσης και πολλά άλλα. Οι βασικές αρχές των δικτύων ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι το θέμα που πραγματεύεται το κεφάλαιο αυτό. Στη συνέχεια ο όρος δίκτυο θα αναφέρεται σε δίκτυο ηλεκτρονικών υπολογιστών, εκτός αν ρητά δηλώνεται κάτι διαφορετικό. Η έρευνα για τα δίκτυα ξεκίνησε τη δεκαετία του 60. Το 1969 ανακοινώθηκε το πρώτο πειραματικό δίκτυο τεσσάρων κόμβων που ήταν προϊόν του προγράμματος ARPANET. Η πιο απλή μορφή δικτύου είναι δύο υπολογιστές συνδεδεμένοι με καλώδιο. Τυπικά σύγχρονα δίκτυα απαρτίζονται από μερικές δεκάδες ή και εκατοντάδες υπολογιστών. Σε μεγάλες εταιρίες, οργανισμούς και ακαδημαϊκά ιδρύματα υπάρχουν δίκτυα μεγάλης κλίμακας που αποτελούνται από μερικές χιλιάδες υπολογιστών.

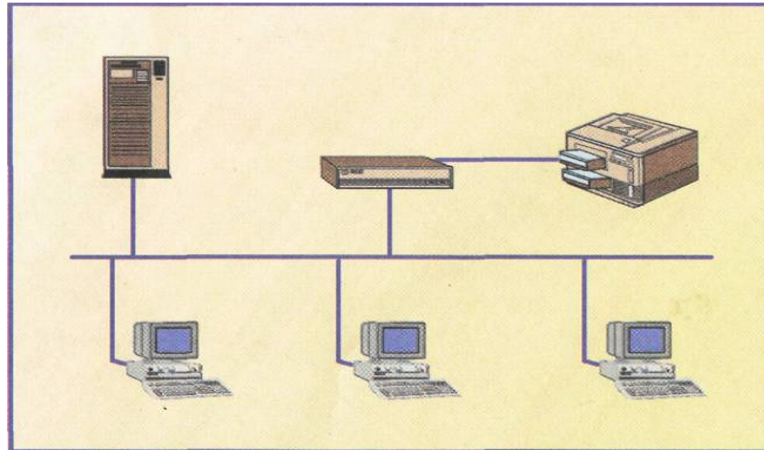
### 1.2 Ορισμός και Δομικά Στοιχεία Δικτύου Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Δίκτυο ηλεκτρονικών υπολογιστών (Computer Network) καλούμε ένα σύνολο ανεξάρτητων διασυνδεδεμένων ηλεκτρονικών υπολογιστών και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών (εκτυπωτές, modem, plotters, κλπ) που είναι ικανές να ανταλλάξουν πληροφορίες.

Τα δομικά στοιχεία ενός δικτύου είναι:

- Υπολογιστικό σύστημα (host), όπως προσωπικοί υπολογιστές, σταθμοί εργασίας, εξυπηρετητές δικτύου (network servers).
- Κόμβος (node), δηλαδή σημεία συνάντησης γραμμών επικοινωνίας (γραμμές μετάδοσης, κυκλώματα ζεύξης, κατανεμητές καλωδίων - hub, δρομολογητές).
- Περιφερειακές συσκευές δικτύου (network peripherals), όπως εκτυπωτές, modem, plotters κ.ά.
- Υποδίκτυο επικοινωνίας (communication subnet), που αφορά την καλωδίωση και τις γραμμές μετάδοσης.





Εικόνα 1 - Δομικά Στοιχεία ενός Δικτύου

### 1.3 Πλεονεκτήματα Χρήσης Δικτύων

- Το μοίρασμα πόρων (resource sharing). Οι πιο συνηθισμένοι πόροι που μοιράζονται είναι αποθηκευτικός χώρος στο δίσκο, εκτυπωτές, λογισμικό, δεδομένα, υπολογιστική ισχύς και γενικότερα ακριβός εξοπλισμός.
- Η παροχή πρόσβασης σε εξοπλισμό, δεδομένα και προγράμματα που βρίσκονται σε απόσταση από εμάς. Η εξ αποστάσεως εργασία και εκπαίδευση είναι δύο υπηρεσίες τις οποίες το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει ικανοποιητικά.
- Η εξοικονόμηση χρημάτων, με το μοίρασμα ακριβού εξοπλισμού αλλά και η επίτευξη καλύτερης σχέσης απόδοσης/κόστους. Είναι σε όλους γνωστό πως ένα σύστημα με διπλάσια υπολογιστική ισχύ από ένα άλλο κοστίζει πολύ περισσότερο από τα διπλάσια χρήματα. Με τη βοήθεια του δικτύου, τη συνολικά απαιτούμενη ισχύ την αποκτούμε με ένα σύνολο συστημάτων που διαθέτουν καλή σχέση απόδοσης / κόστους. Επίσης, η συνολική εγκατάσταση μπορεί να γίνει σταδιακά και, στην περίπτωση που οι απαιτήσεις γίνουν μεγαλύτερες, το δίκτυο μπορεί να επεκταθεί.
- Η αυξημένη αξιοπιστία, αφού έχουμε πολλούς σταθμούς εργασίας και πιθανότατα πολλά αντίγραφα του λογισμικού μας αλλά και των δεδομένων μας.
- Η εξυπηρέτηση επικοινωνιακών αναγκών. Το δίκτυο είναι ισχυρότατο μέσο επικοινωνίας και παρέχει άμεση πληροφόρηση στους χρήστες. Υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, τηλεφωνίας, τηλεσυνδιάσκεψης κλπ, είναι από τις πλέον διαδεδομένες και συχνότερα χρησιμοποιούμενες.

Τα δίκτυα μπορούμε να τα κατατάξουμε σε κατηγορίες ανάλογα με την τοπολογία τους (αστέρας, δακτύλιος, κλπ.), τη γεωγραφική τους κατανομή (τοπικά, ευρείας περιοχής), το φορέα που μεταφέρει την πληροφορία (δημόσια, ιδιωτικά), το μέσο μετάδοσης που χρησιμοποιούν

(ενσύρματα, ασύρματα) καθώς και την τεχνική προώθησης της πληροφορίας (δίκτυα μεταγωγής ή δίκτυα μετάδοσης). Κάποιες κατηγορίες δικτύων (τοπικά και ευρείας περιοχής) θα τις αναπτύξουμε λεπτομερώς στη συνέχεια αλλά αμέσως τώρα θα αναφερθούμε σε ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύων που έχει γίνει κοινώς αποδεκτό και εφαρμόζεται ευρύτερα ως εργαλείο μελέτης και ανάπτυξης των δικτύων.

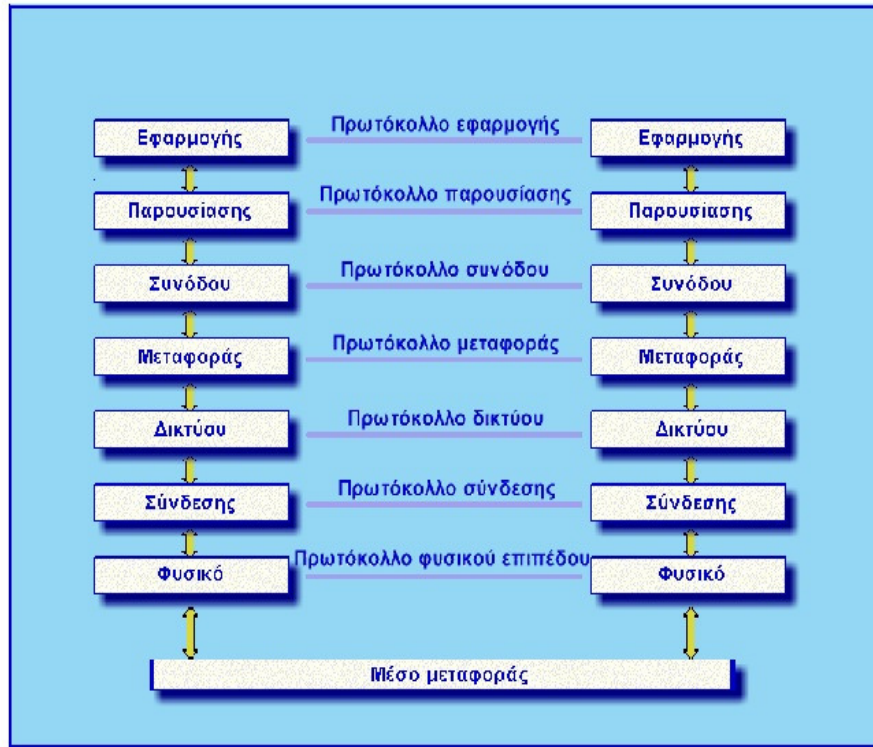
#### **1.4 Μοντέλο Αρχιτεκτονικής Δικτύου OSI (Open Systems Interconnection)**

Τα πρώτα υπολογιστικά συστήματα και δίκτυα είχαν σχετικά μικρές επικοινωνιακές ανάγκες και τις περισσότερες φορές το δικτυακό υλικό διαφορετικών κατασκευαστών δε συνεργαζόταν αρμονικά. Το τμήμα του λογισμικού που υποστήριζε αυτές τις αρχικές επικοινωνιακές ανάγκες ήταν μονολιθικό, αδόμητο, γραμμένο σε γλώσσα χαμηλού επιπέδου (assembly). Οι δυνατότητες ελέγχου, αποσφαλμάτωσης και διαμόρφωσής του ήταν περιορισμένες.

Οι σύγχρονες επικοινωνιακές ανάγκες απαιτούν συστήματα που μπορούν να επικοινωνούν με ένα μεγάλο σύνολο συσκευών οι οποίες προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές (open systems). Το λογισμικό υποστήριξης πρέπει να είναι εύκολα τροποποιήσιμο και επεκτάσιμο καθώς νέες, βελτιωμένες τεχνικές επικοινωνίας εμφανίζονται όλο και με μεγαλύτερη συχνότητα.

Αυτές οι απαιτήσεις οδήγησαν τον οργανισμό τυποποίησης ISO (International Standards Organization) να προτείνει ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου επτά επιπέδων (OSI model). Οι λειτουργίες κάθε επιπέδου είναι σαφώς καθορισμένες και κάθε επίπεδο επικοινωνεί με το αμέσως προηγούμενο του (εκτός από το πρώτο) και το αμέσως επόμενο του (εκτός από το τελευταίο). Σε γενικές γραμμές, κάθε επίπεδο χρησιμοποιεί υπηρεσίες από το επόμενο και προσφέρει υπηρεσίες στο προηγούμενο επίπεδο.

## Το μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου OSI



Εικόνα 2 - Το Μοντέλο Αρχιτεκτονικής Δικτύου OSI

Η μεταφορά της πληροφορίας κατά την εκπομπή είναι από το επίπεδο εφαρμογής προς το φυσικό επίπεδο, ενώ κατά τη λήψη αντίστροφα. Στη διαδικασία εκπομπής κάθε επίπεδο αφού επεξεργαστεί την πληροφορία προσθέτει πρόθεμα (header) και επίθεμα (trailer) και παραδίδει τα προς αποστολή δεδομένα στο επόμενο επίπεδο. Η διαδικασία προσθήκης προθέματος και επιθέματος ονομάζεται ενθυλάκωση (encapsulation). Στη διαδικασία λήψης τα πράγματα γίνονται αντίστροφα. Κάθε επίπεδο αφού επεξεργαστεί τα δεδομένα, αφαιρεί το πρόθεμα και το επίθεμα και μεταφέρει την πληροφορία στο προηγούμενο επίπεδο.

## 1.5 Η Λειτουργία των Επιπέδων του Μοντέλου OSI

### 1.5.1 Επίπεδο Εφαρμογής (Application layer)

Αποτελεί το επίπεδο επαφής των χρηστών με το σύνολο των δικτυακών υπηρεσιών που προσφέρει το σύστημα. Η πρόσβαση σε απομακρυσμένους καταλόγους, η μεταφορά αρχείων, η μεταφορά μηνυμάτων (mail) είναι μερικές από τις υπηρεσίες που προσφέρει το επίπεδο εφαρμογής του μοντέλου OSI. Οι υπηρεσίες αυτές είναι διαφανείς (transparent) στο χρήστη, με κλήσεις αντίστοιχες με τις κλήσεις συστήματος (system calls). Έτσι η πρόσβαση σε αρχείο απομακρυσμένου συστήματος είναι αντίστοιχη με την πρόσβαση σε αρχείο του τοπικού συστήματος. Η απόκρυψη των επιμέρους λεπτομερειών πρόσβασης είναι σημαντική για την εύκολη, γρήγορη και ορθή ανάπτυξη λογισμικού.

### 1.5.2 Επίπεδο Παρουσίασης (Presentation layer)

Το επίπεδο αυτό ασχολείται με την αναπαράσταση και μορφοποίηση των δεδομένων. Συστήματα με διαφορετική αναπαράσταση δεδομένων επικοινωνούν με τη βοήθεια αφηρημένων δομών δεδομένων. Φανταστείτε την περίπτωση όπου επικοινωνούν τηλεφωνικά ένας Έλληνας με ένα Ρώσο οι οποίοι γνωρίζουν μόνο τη μητρική τους γλώσσα. Ας υποθέσουμε, ότι καθένας τους χρησιμοποιεί ένα μεταφραστή, όμως η μόνη κοινή γλώσσα των μεταφραστών είναι η Αγγλική. Για να διεξαχθεί η συνομιλία, υποχρεωτικά ο καθένας μεταφράζει τη γλώσσα του στην Αγγλική και ο συνομιλητής του αντίστοιχα την Αγγλική στη δική του γλώσσα. Στο παράδειγμα αυτό ο μεταφραστής εκτελεί υπηρεσίες αντίστοιχες με το επίπεδο παρουσίασης στο μοντέλο OSI και η Αγγλική γλώσσα είναι το αντίστοιχο των αφηρημένων δομών δεδομένων του επιπέδου παρουσίασης. Επίσης, το επίπεδο παρουσίασης μπορεί να ασχολείται και με θέματα συμπίεσης δεδομένων, κρυπτογράφησης καθώς και επιβεβαίωσης γνησιότητας της πληροφορίας που μεταφέρεται.

### 1.5.3 Επίπεδο Συνόδου (Session layer)

Το επίπεδο συνόδου είναι υπεύθυνο για την εγκατάσταση, τον τερματισμό και τη διαχείριση ενός καναλιού επικοινωνίας δύο οντοτήτων του επιπέδου παρουσίασης. Φανταστείτε τη μεταφορά ενός μεγάλου αρχείου σε δίκτυο, με μέσο χρόνο μεταξύ καταρρεύσεων μικρότερο του απαιτούμενου για τη μεταφορά του αρχείου. Το επίπεδο συνόδου πρέπει να εισάγει σημεία ελέγχου, ώστε μετά από πιθανό πρόβλημα να μεταδοθούν μόνο τα δεδομένα από το σημείο ελέγχου και πέρα.

### 1.5.4 Επίπεδο Μεταφοράς (Transport layer)

Το επίπεδο μεταφοράς είναι υπεύθυνο για τη διαφανή παροχή υπηρεσιών μεταφοράς μηνυμάτων ανεξάρτητα από τον τύπο του δικτύου. Δέχεται μηνύματα από το επίπεδο συνόδου, τα οποία, αν χρειαστεί, χωρίζει σε μικρότερες μονάδες και διασφαλίζει τη σωστή μεταφορά τους στην άλλη

πλευρά. Επίσης, για λόγους απόδοσης, μπορεί να δημιουργεί πολλαπλές συνδέσεις μεταφοράς για κάθε οντότητα του επιπέδου συνόδου ή και να πολυπλέκει συνδέσεις, όταν η δημιουργία ή η συντήρηση μιας σύνδεσης είναι ακριβή. Επιπλέον, είναι δυνατόν να ρυθμίζει τη ροή της πληροφορίας, έτσι ώστε ένα γρήγορο σύστημα να μην πλημμυρίζει ένα αργό.

#### **1.5.5 Επίπεδο Δικτύου (Network layer)**

Το επίπεδο του δικτύου αναλαμβάνει τις λειτουργίες δρομολόγησης και μεταγωγής πακέτων από τον έναν κόμβο του δικτύου στον άλλο. Είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση πινάκων δρομολόγησης οι οποίοι μπορεί να είναι στατικοί, να ορίζονται στην αρχή μιας συνομιλίας ή και να μεταβάλλονται δυναμικά. Ο έλεγχος της συμφόρησης του δικτύου, της κατανομής του φορτίου σε περίπτωση εναλλακτικών οδύσεων και η λειτουργία χρέωσης κόμβων του δικτύου ανάλογα με την κίνηση τους είναι μερικές πρόσθετες αρμοδιότητες του επιπέδου δικτύου.

#### **1.5.6 Επίπεδο Σύνδεσης Δεδομένων (Data link layer)**

Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων αναλαμβάνει την παροχή αξιόπιστης γραμμής δεδομένων χωρίς σφάλματα. Είναι υπεύθυνο για την αναγνώριση των πλαισίων δεδομένων (data frames) καθώς και για τη διαχείριση των πλαισίων επιβεβαίωσης λήψης (Acknowledgement frames). Επίσης αναλαμβάνει θέματα ελέγχου της ροής των δεδομένων (flow control) για τη σωστή συνεργασία γρήγορου πομπού και αργού δέκτη.

#### **1.5.7 Φυσικό Επίπεδο (Physical layer)**

Το φυσικό επίπεδο αναλαμβάνει τη μεταφορά ακατέργαστων δυαδικών ψηφίων στο μέσο μετάδοσης. Ασχολείται με τις μηχανικές (πόσους ακροδέκτες έχει ο σύνδεσμος του δικτύου, που χρησιμοποιείται ο κάθε ακροδέκτης, κλπ) και ηλεκτρικές προδιαγραφές (ποια στάθμη σήματος καθορίζει το δυαδικό 0 και ποια το δυαδικό 1, πόσο χρόνο διαρκεί η εκπομπή ενός δυαδικού ψηφίου, κλπ) της σύνδεσης.

Θα πρέπει να παρατηρήσουμε πως το OSI είναι ένα γενικευμένο μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου και θέτει τα πλαίσια στα οποία θα κινηθεί το υποσύστημα επικοινωνίας δεδομένων. Δεν είναι απαραίτητη η πλήρης εναρμόνιση με το μοντέλο OSI. Πολλές υλοποιήσεις ενοποιούν ή και παραλείπουν κάποια επίπεδα. Σε άλλες περιπτώσεις υλοποίησης, λειτουργίες εμφανίζονται σε διαφορετικό επίπεδο και όχι σε αυτό που προδιαγράφει το μοντέλο OSI (π.χ. η εξακρίβωση της γνησιότητας των δεδομένων και η εισαγωγή σημείων ελέγχου πολλές φορές γίνονται στο επίπεδο της εφαρμογής).

## 1.6 Κατηγορίες Δικτύων

Όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου, τα δίκτυα μπορούμε να τα κατατάξουμε σε διαφορετικές κατηγορίες με βάση κάποια κοινά χαρακτηριστικά τους.

### 1.6.1 Ειδικές Περιπτώσεις Δικτύων

Ένα σύστημα με πολλές μονάδες επεξεργασίας και τερματικούς σταθμούς είναι μια ειδική περίπτωση δικτύου. Το λειτουργικό σύστημα διαφανώς αναλαμβάνει τη διαχείριση των CPU. Δίκτυα αυτής της μορφής ονομάζονται συγκεντρωτικά (Centralized Networks).

Άλλη ειδική μορφή δικτύου είναι αυτή που αποτελείται από δύο συνδεδεμένους σταθμούς εργασίας με σειριακή ή παράλληλη σύνδεση (Null Slot Networks).

### 1.6.2 Δίκτυα Βάση Γεωγραφικής Κατανομής

Τοπικά δίκτυα (Local Area Networks-LAN), στα οποία ο διασυνδεδεμένος εξοπλισμός κατανέμεται σε ένα κτίριο ή ομάδα κτιρίων ή σε σχετικά μικρή απόσταση στα όρια μιας πόλης. Το μικρό της απόστασης διασποράς σε συνδυασμό με τις μεγάλες ταχύτητες πάνω από φθηνά επικοινωνιακά μέσα είναι το κλειδί για τον ορισμό ενός τοπικού δικτύου. Ο ακριβής προσδιορισμός της απόστασης διασποράς καθώς και της ταχύτητας επικοινωνίας είναι μάταιος, μια και ο ρυθμός ανάπτυξης των δικτύων είναι τέτοιος που μεταβάλλει τα δεδομένα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

Μητροπολιτικά Δίκτυα (Metropolitan Area Networks-MAN), στα οποία ο διασυνδεδεμένος εξοπλισμός κατανέμεται σε μία πόλη.

Δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Networks-WAN), στα οποία ο διασυνδεδεμένος εξοπλισμός κατανέμεται σε μια πόλη, ανάμεσα σε πόλεις ή στα όρια ενός κράτους. Οι ταχύτητες επικοινωνίας είναι σαφώς μικρότερες (σε σχέση με τα τοπικά δίκτυα) και το κόστος των γραμμών επικοινωνίας πολύ μεγαλύτερο.

Τέλος η διασύνδεση τοπικών δικτύων και δικτύων ευρείας περιοχής παράγει το Διαδίκτυο, το γνωστό σε όλους μας Internet.

### 1.6.3 Δίκτυα Βάση Μέσων Μετάδοσης

Συνήθως, για την υλοποίηση των δικτύων, χρησιμοποιούνται μέσα μετάδοσης όπως τα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων, τα ομοαξονικά καλώδια και οι οπτικές ίνες. Τελευταία, μεγάλη ανάπτυξη γνωρίζουν και τα ασύρματα δίκτυα (Wireless Networks). Τα πλεονεκτήματά τους είναι η εξοικονόμηση του αρχικού κόστους εγκατάστασης του υποδικτύου επικοινωνίας

(καλώδια, ίνες κλπ), η δυνατότητα άμεσης μεταφοράς των θέσεων εργασίας καθώς και η ελευθερία χρήσης φορητών τερματικών και υπολογιστών.

Για παράδειγμα ένα ασύρματο δίκτυο θα μπορούσε να βοηθήσει την οργάνωση μιας μεγάλης αποθήκης. Οι υπάλληλοι με φορητά τερματικά χειρός μπορούν να έχουν ελευθερία κίνησης στους χώρους της αποθήκης και ταυτόχρονα άμεση πρόσβαση στην ηλεκτρονική βάση δεδομένων της αποθήκης.

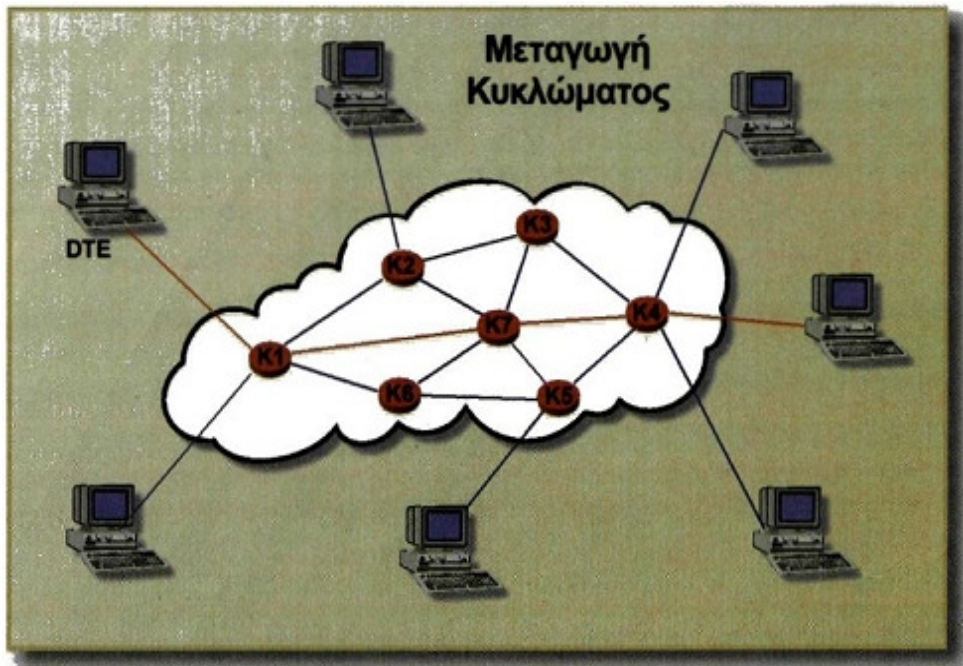
Άλλος χώρος στον οποίο ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες είναι ο χώρος της υγείας. Σκεφτείτε ένα νοσοκομείο στο οποίο η καταχώρηση των στοιχείων των ασθενών γίνεται σε κεντρικό υπολογιστή μέσω φορητών τερματικών χειρός από τις νοσοκόμες. Κάθε χρονική στιγμή ο γιατρός μπορεί να έχει άμεση πρόσβαση και γνώση της κατάστασης των ασθενών όπου και να βρίσκεται.

#### **1.6.4 Δίκτυα Βάση της Τεχνικής Προώθησης της Πληροφορίας**

Δίκτυα Μεταγωγής (Switching Networks), που αποτελούνται από ένα σύνολο συνδεδεμένων κόμβων που αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση της πληροφορίας από τον τερματικό σταθμό εκπομπής (Data Terminal Equipment-DTE) στον τερματικό σταθμό λήψης. Κάποιοι κόμβοι του δικτύου δεν έχουν τερματικούς σταθμούς και συνεπώς υπηρετούν μόνο τη μεταγωγή της πληροφορίας. Για λόγους αξιοπιστίας κατά κανόνα υπάρχουν περισσότεροι του ενός δρόμοι για τη διασύνδεση των κόμβων του δικτύου. Συνήθως τα δίκτυα μεταγωγής υποστηρίζονται από τους οργανισμούς τηλεπικοινωνίας και η κλήση ενός DTE γίνεται με επιλογή.

Η διαδικασία μεταγωγής της πληροφορίας γίνεται με τρεις τρόπους.

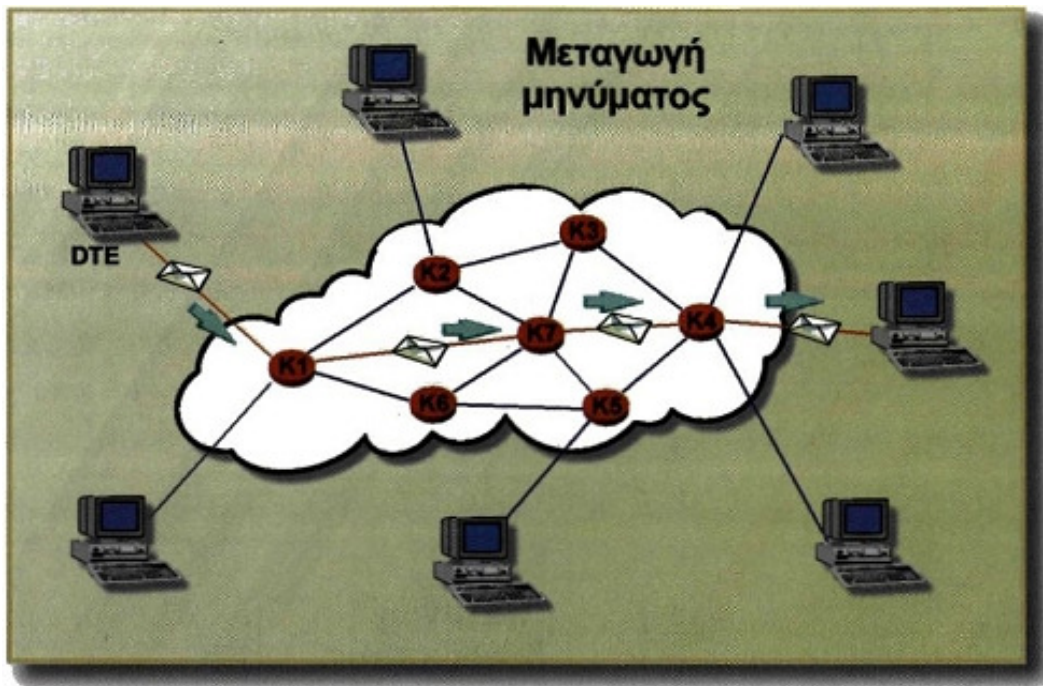
Μεταγωγή κυκλώματος (circuit switching), κατά την οποία η σύνδεση γίνεται με τη δέσμευση ενός φυσικού μονοπατιού από τον κόμβο εκπομπής στον κόμβο λήψης σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Η τεχνική είναι ανάλογη της τηλεφωνικής σύνδεσης.



Εικόνα 3 - Μεταγωγή Κυκλώματος



Μεταγωγή μηνυμάτων (message switching), κατά την οποία οι τερματικοί σταθμοί δρομολογούν τμήματα πληροφορίας που ονομάζονται μηνύματα. Έτσι, το κύκλωμα σύνδεσης είναι διαθέσιμο για μεταφορά μηνυμάτων άλλων σταθμών όταν κάποιοι είναι ανενεργοί.



Εικόνα 4 - Μεταγωγή Μηνύματος

Η μεταγωγή πακέτων (packet switching) είναι αντίστοιχη τεχνική της μεταγωγής μηνύματος αλλά εδώ το μήνυμα σπάζει σε μικρά πακέτα (128 ή 256 Bytes) τα οποία και δρομολογούνται από τους κόμβους μεταγωγής. Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές μεταγωγής πακέτων (Datagram και Virtual Circuit). Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου μεταγωγής πακέτων είναι η διάθεση του κυκλώματος σύνδεσης για μεταφορά μηνυμάτων άλλων σταθμών όταν κάποιοι είναι ανενεργοί, η καλύτερη κατανομή του φορτίου (load distribution) και η αυξημένη αξιοπιστία (τα πακέτα προωθούνται με τη χρήση πολλών εναλλακτικών κυκλωμάτων). Το μειονέκτημά της είναι η ανάγκη ταξινόμησης των πακέτων τα οποία μπορεί να λαμβάνονται με διαφορετική σειρά από τη σειρά αποστολής λόγω των πολλαπλών οδεύσεων.

Δίκτυα Μετάδοσης (Broadcasting Networks), τα οποία δεν έχουν κόμβους δρομολόγησης της πληροφορίας. Κάθε μήνυμα που εκπέμπεται λαμβάνεται από όλους τους σταθμούς και υπάρχουν τεχνικές ελέγχου της πρόσβασης στο μέσο επικοινωνίας. Δίκτυα μετάδοσης είναι συνήθως τα τοπικά δίκτυα, τα δορυφορικά δίκτυα, τα τηλεοπτικά δίκτυα κλπ.

## Κεφάλαιο 2 : Προσομοίωση Δικτύων

### 2.1 Εισαγωγή

Η μελέτη συστημάτων με μαθηματικές μεθόδους [3] 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, η οποία γνώρισε μεγάλη εξέλιξη κυρίως λόγω της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

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.

### 2.2 Ορισμός

Προσομοίωση είναι μια μέθοδος μελέτης και εξοικείωσης με τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ηλεκτρονικός υπολογιστής. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται για τη μελέτη συστημάτων μέσω των μοντέλων τους και ασχολείται ακριβώς με την παρακολούθηση της κατάστασης ενός συστήματος, όπως αυτή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Αποτελεί ένα ιδιαίτερο είδος της μοντελοποίησης.

Ο πιο ευρέως διαδεδομένος τρόπος που χρησιμοποιούμε για την κατανόηση του κόσμου, είναι η δημιουργία μοντέλων, τα οποία η επιστήμη και πιο συγκεκριμένα οι κοινωνικές επιστήμες έχουν τελειοποιήσει και επισημοποιήσει.

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

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

## 2.3 Παραδείγματα Προσομοίωσης

### 2.3.1 Πρώτο Παράδειγμα

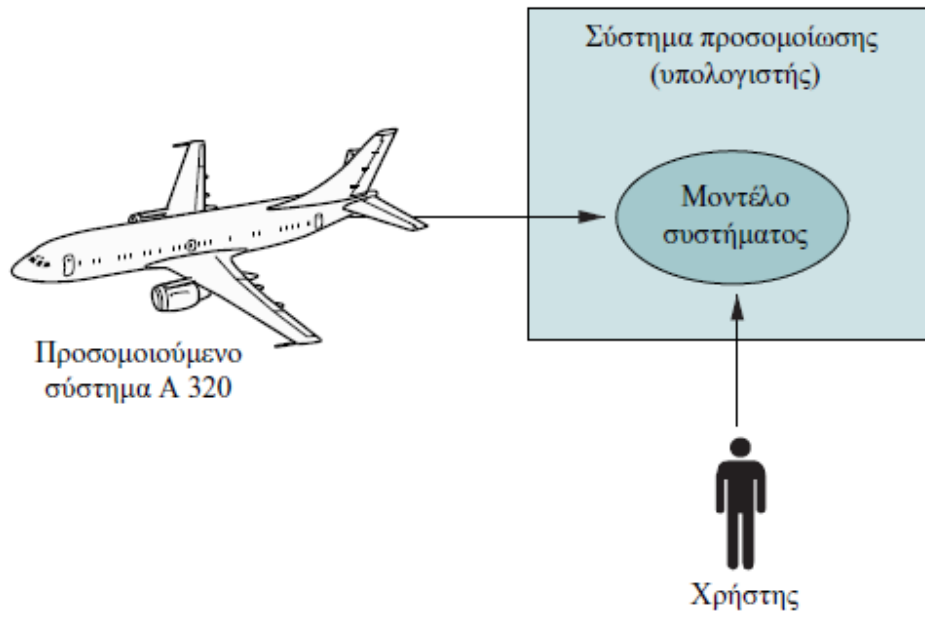
Ως πρώτο Παράδειγμα ας εξετάσουμε την προσομοίωση και την εξομοίωση ενός αεροσκάφους τύπου Airbus A320. Η προσομοίωση ενός αεροσκάφους του τύπου αυτού μπορεί να γίνει είτε εξ ολοκλήρου σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή είτε με την κατασκευή ενός συστήματος που έχει όλα τα χειριστήρια και όργανα του αεροσκάφους.

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

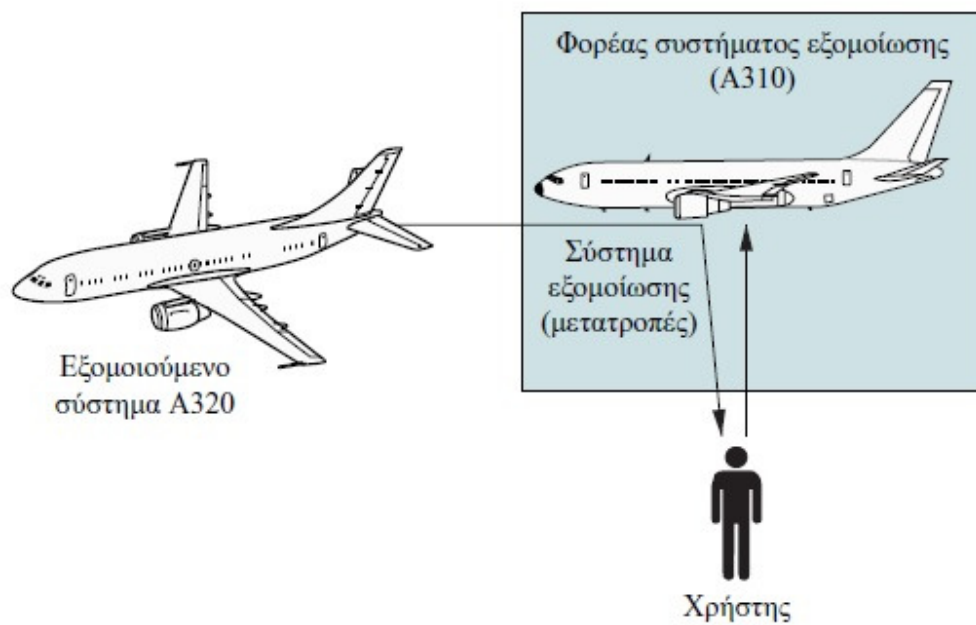
Στη δεύτερη περίπτωση είναι πιθανόν να επιδιώκεται η εκπαίδευση πιλότων του αεροσκάφους, πριν ακόμη αυτό κατασκευασθεί ή να επιλέγεται η προσομοίωση για λόγους ασφαλείας ή οικονομίας. Προς το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα σύστημα προσομοίωσης, το οποίο έχει όλα τα απαραίτητα χειριστήρια και όργανα του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

Και στις δύο περιπτώσεις όμως ούτε οι χειριστές του υπολογιστή ούτε οι εκπαιδευόμενοι πιλότοι έχουν την εντύπωση ότι εργάζονται με το πραγματικό σύστημα, που είναι το αεροσκάφος τύπου A320. Όπως φαίνεται διαγραμματικά στην εικόνα 5 το προσομοιούμενο σύστημα υπάρχει μόνον ως μοντέλο στον υπολογιστή και ο χρήστης έρχεται σε επαφή μόνον με τον υπολογιστή.

Η εξομοίωση του αεροσκάφους μπορεί να γίνει μόνο με βάση ένα παρόμοιο αεροσκάφος και τις κατάλληλες μετατροπές σε αυτό. Για το σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αεροσκάφος τύπου Airbus A310, στο οποίο να αντικατασταθούν τα απαιτούμενα χειριστήρια και όργανα με αυτά του A320. Έτσι ο πιλότος που κυβερνά το A310 που μετατράπηκε θα έχει την εντύπωση ότι κυβερνά ένα αεροσκάφος τύπου A320. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι για την πραγματική εξομοίωση δεν αρκεί μόνο η αντικατάσταση των χειριστηρίων και των οργάνων αλλά και η όσο το δυνατόν πιο πιστή μετατροπή των χαρακτηριστικών του αεροσκάφους A310 έτσι ώστε να συμπεριφέρεται όπως ένα A320. Στην εικόνα 6 φαίνεται το διάγραμμα εξομοίωσης του παραδείγματος αυτού.



Εικόνα 5 - Διάγραμμα Προσομώωσης του A320



Εικόνα 6 - Διάγραμμα Εξομοίωσης A320 με A310

### 2.3.2 Δεύτερο Παράδειγμα

Ως δεύτερο Παράδειγμα ας εξετάσουμε την προσομοίωση και εξομοίωση ενός μικροεπεξεργαστή Intel 80486. Η προσομοίωση αυτού του μικροεπεξεργαστή μπορεί να γίνει σε οποιονδήποτε υπολογιστή γενικής χρήσης ή σε εξειδικευμένους υπολογιστές για προσομοίωση ψηφιακής λογικής. Επειδή η σχεδίαση ενός μικροεπεξεργαστή είναι πολύ περίπλοκη και η κατασκευή του πρωτοτύπου υπερβολικά δαπανηρή, χρησιμοποιείται η προσομοίωση για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του συστήματος. Ο χρόνος προσομοίωσης εξαρτάται πολύ από το επίπεδο λεπτομέρειας που περιλαμβάνεται στο μοντέλο. Το ανώτερο επίπεδο είναι το λειτουργικό επίπεδο, το οποίο προσομοιώνει μόνο τη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λογικής της σχεδίασης. Το χαμηλότερο επίπεδο προσομοίωσης είναι το επίπεδο τρανζίστορ στο οποίο προσομοιώνονται όλα τα δομικά στοιχεία (τρανζίστορς) του μικροεπεξεργαστή. Υπάρχει και ακόμη χαμηλότερο επίπεδο, αυτό του πυριτίου, αλλά ποτέ δεν χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ολόκληρου του μικροεπεξεργαστή επειδή αν λειτουργεί σωστά μία ομάδα τρανζίστορς στο επίπεδο πυριτίου, τότε λειτουργούν όλα σωστά. Στο επίπεδο του τρανζίστορ η πολυπλοκότητα είναι τόσο μεγάλη που η σχέση ταχύτητας εκτέλεσης του προσομοιούμενου υπολογιστή προς το εξομοιούμενο μπορεί να φθάσει το 1.000.000. Δηλαδή, εκτελούνται 1.000.000 εντολές στον υπολογιστή που κάνει την προσομοίωση για να προσομοιωθεί μία εντολή του 80486. Γίνεται αντιληπτό ότι ποτέ δεν θα χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση για την εκτέλεση προγραμμάτων του 80486 στον υπολογιστή που τον προσομοιώνει.

Η εξομοίωση του 80486 μπορεί να γίνει σε έναν υπολογιστή που χρησιμοποιεί άλλο μικροεπεξεργαστή, όπως ο Apple Macintosh. Σκοπός της εξομοίωσης είναι η δυνατότητα εκτέλεσης προγραμμάτων 80486 του σε υπολογιστή Apple Macintosh ο οποίος χρησιμοποιεί διαφορετικό μικροεπεξεργαστή. Η εξομοίωση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Ο απλούστερος είναι η ανάπτυξη λογισμικού εξομοίωσης, το οποίο αναλύει ένα πρόγραμμα γραμμένο σε κώδικα του 80486 και μεταφράζει τις εντολές του σε κώδικα του μικροεπεξεργαστή PowerPC του Macintosh, έτσι ώστε να μπορούν πλέον να εκτελεστούν από αυτόν. Με διάφορες τεχνικές συμπίεσης του κώδικα είναι δυνατό να επιτευχθεί λόγος εκτέλεσης 1:4, δηλαδή να απαιτείται η εκτέλεση 4 εντολών του PowerPC για την εκτέλεση μίας εντολής του 80486.

Ο δεύτερος τρόπος εξομοίωσης ενός υπολογιστή που χρησιμοποιεί τον 80486 με έναν Macintosh είναι η κατασκευή μίας πλακέτας επέκτασης του υπολογιστή Macintosh, η οποία να περιλαμβάνει έναν μικροεπεξεργαστή 80486 και όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για τη λειτουργία του. Με τον τρόπο αυτό, προγράμματα γραμμένα για τον 80486 μπορούν να εκτελεστούν απευθείας από τον μικροεπεξεργαστή της πλακέτας και μόνο οι λειτουργίες εισόδου/εξόδου, διαχείριση πληκτρολογίου, οθόνης, ποντικιού, κτλ. να εκτελούνται από τον επεξεργαστή του Macintosh.

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

## 2.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Προσομοίωσης

Η προσομοίωση [2, 4, 5] χρησιμοποιείται ευρέως και θεωρείται από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους για τη μελέτη σύνθετων συστημάτων. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης στα οποία οφείλεται η ευρεία χρήση της είναι:

- Τα περισσότερα σύνθετα συστήματα με στοχαστικά στοιχεία δεν μπορούν να περιγραφούν ακριβώς με μαθηματικά μοντέλα. Έτσι συχνά η προσομοίωση είναι η μόνη δυνατή μέθοδος μελέτης.
- Με την προσομοίωση, πειραματιζόμενοι με το μοντέλο μπορούμε να έχουμε καλύτερο έλεγχο από ότι θα ήταν δυνατό αν πειραματιζόμασταν με το ίδιο το σύστημα.
- Η προσομοίωση μας επιτρέπει να μελετήσουμε σε ελάχιστο χρόνο ένα μεγάλης χρονικής διάρκειας διάστημα λειτουργίας ενός συστήματος.
- Η προσομοίωση μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την απόδοση ενός υπάρχοντος συστήματος κάτω από προτεινόμενες συνθήκες λειτουργίας.
- Είναι μια μέθοδος οικονομική, αφού είναι δυνατό να υλοποιηθεί σε μικρούς υπολογιστές με τη χρήση γλωσσών προγραμματισμού γενικού σκοπού όπως η C, η C++ και η Java.
- Εναλλακτικοί σχεδιασμοί ενός συστήματος (ή εναλλακτικοί τρόποι λειτουργίας ενός συστήματος) μπορούν να συγκριθούν μέσω της προσομοίωσης για να βρεθεί ποιος τρόπος ανταποκρίνεται καλύτερα στις προκαθορισμένες απαιτήσεις.

Βέβαια η προσομοίωση έχει και μειονεκτήματα. Αυτά είναι τα εξής:

- Τα μοντέλα προσομοίωσης απαιτούν πολύ χρόνο και κόπο για την ανάπτυξή τους.
- Κάθε τρέξιμο ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης παράγει μόνο εκτιμήσεις (estimates) των πραγματικών χαρακτηριστικών ενός μοντέλου για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων εισόδου. Συνεπώς απαιτείται να μελετηθούν αρκετά ανεξάρτητα τρεξίματα του μοντέλου για κάθε σύνολο παραμέτρων εισόδου. Αντίθετα, ένα αναλυτικό μοντέλο, εφόσον είναι το κατάλληλο, μπορεί συχνά να παράγει εύκολα τα ακριβή πραγματικά χαρακτηριστικά του μοντέλου αυτού για διάφορα σύνολα παραμέτρων εισόδου.
- Εάν ένα μοντέλο δεν παριστάνει σωστά το προς μελέτη σύστημα, τότε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν θα δώσουν σωστές πληροφορίες για το πραγματικό σύστημα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η μέθοδος της μοντελοποίησης και προσομοίωσης για την λύση των προβλημάτων θα πρέπει να προτιμάται όταν είναι δύσκολο, χρονοβόρο, δαπανηρό, επικίνδυνο ή αδύνατο να λυθεί το πρόβλημα με συνηθισμένες, αναλυτικές, αριθμητικές ή φυσικές πειραματικές μεθόδους. Πρέπει να γίνει σαφές ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι λιγότερο ακριβή από εκείνα των αναλυτικών λύσεων. Η συλλογή, ανάλυση, διερμήνευση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης απαιτεί καλή γνώση της θεωρίας πιθανοτήτων και στατιστικής.

## 2.5 Κατηγορίες Προσομοίωσης

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές προσομοίωσης, οι πιο δημοφιλείς είναι η προσομοίωση διακριτών γεγονότων, η προσομοίωση συνεχούς χρόνου και η προσομοίωση Monte Carlo.

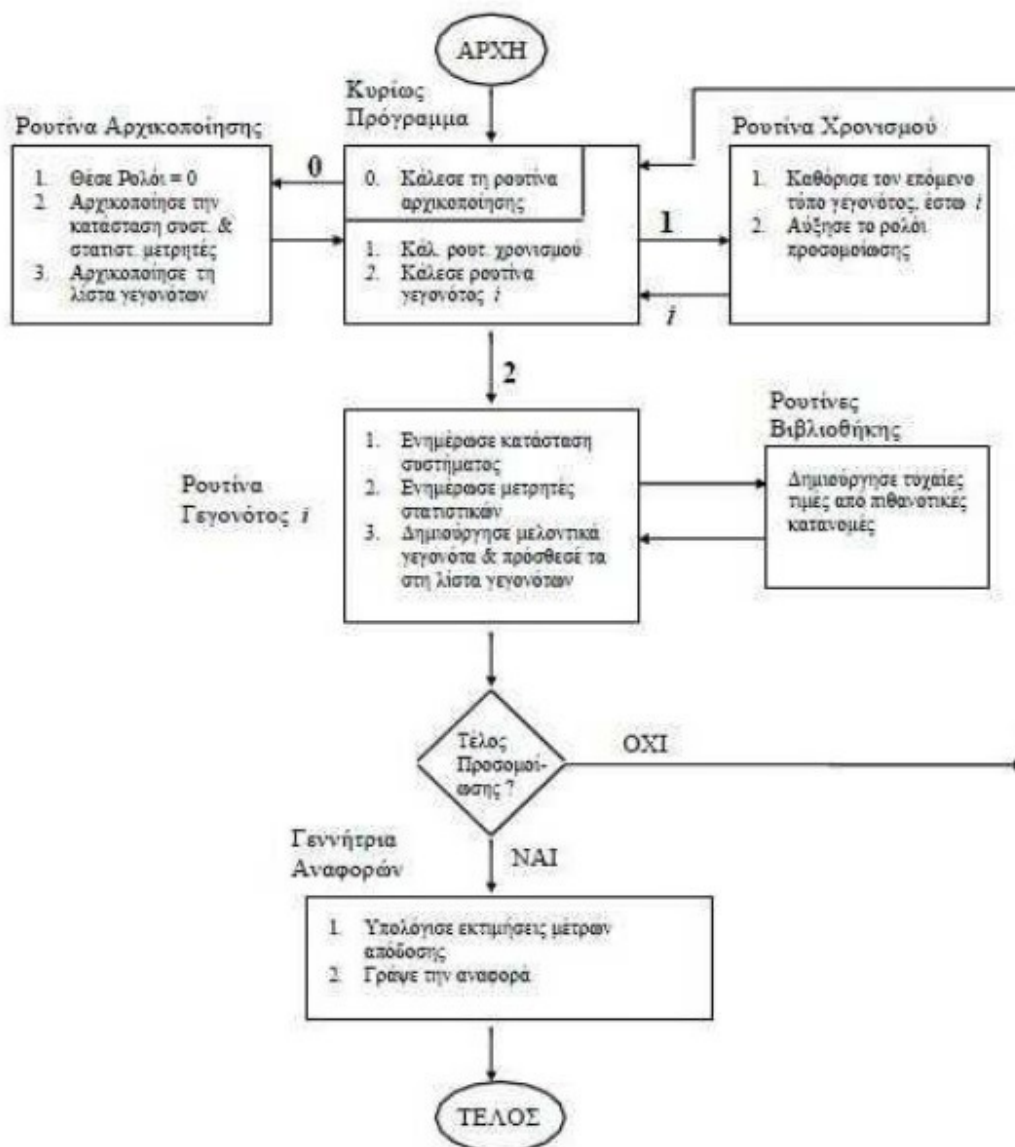
### 2.5.1 Προσομοίωση Διακριτών Γεγονότων

Η Προσομοίωση Διακριτών Γεγονότων αφορά την μοντελοποίηση (discrete - event simulation) ενός συστήματος καθώς αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Στην αναπαράσταση ενός τέτοιου συστήματος οι μεταβλητές κατάστασης μεταβάλλονται στιγμιαία σε διακριτές στιγμές. Σε αυτές τις στιγμές μπορεί να συμβεί ένα γεγονός το οποίο μπορεί να αλλάξει την κατάσταση του συστήματος.

Λόγω του δυναμικού χαρακτήρα των μοντέλων προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα αποθήκευσης της τρέχουσας τιμής του προσομοιωμένου χρόνου, ενώ χρειαζόμαστε και ένα μηχανισμό αύξησής του από μία τιμή σε μία άλλη. Η μεταβλητή του μοντέλου προσομοίωσης που μας δίνει την τρέχουσα τιμή του χρόνου, ονομάζεται ρολόι προσομοίωσης (simulation clock). Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιεί το ρολόι είναι συνήθως η ίδια με αυτή που χρησιμοποιούν οι παράμετροι εισόδου, ενώ γενικά δεν υπάρχει σχέση του χρόνου που καταγράφει το ρολόι, με το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση του προσομοιωτή στον υπολογιστή.

Η πιο γνωστή μέθοδος για την εξέλιξη του ρολογιού προσομοίωσης είναι: Η Εξέλιξη με βάση το Χρόνο του Επομένου Γεγονότος (next-event time advance). Στη μέθοδο εξέλιξης με βάση το χρόνο του επομένου γεγονότος (εικόνα 7), το ρολόι προσομοίωσης αρχικοποιείται στο μηδέν και καθορίζονται οι στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Το ρολόι τότε αυξάνει στο χρόνο εμφάνισης του πιο κοντινού στο μέλλον, από τα γεγονότα αυτά. Τη στιγμή αυτή η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται ώστε να πάρει υπ' όψη της το γεγονός που εμφανίστηκε, ενώ ενημερώνεται επίσης η γνώση μας για τις χρονικές στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Στη συνέχεια, το ρολόι αυξάνει ώστε να δείχνει τη στιγμή εμφάνισης του νέου πιο κοντινού στο μέλλον γεγονότος, η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται,

καθορίζονται οι χρονικές στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή εξέλιξης του ρολογιού προσομοίωσης από το ένα γεγονός στο άλλο, συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποια προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού της προσομοίωσης. Αφού όλες οι αλλαγές κατάστασης γίνονται μόνο στις χρονικές στιγμές εμφάνισης των γεγονότων, οι ενδιάμεσες ανενεργοί περίοδοι δεν λαμβάνονται υπ' όψη και το ρολόι μετακινείται αυτόματα στη στιγμή εμφάνισης του επομένου γεγονότος.



Εικόνα 7 - Διάγραμμα Ροής για την Εξέλιξη με Βάση το Χρόνο του Επόμενου Γεγονότος



## 2.5.2 Προσομοίωση Συνεχούς Χρόνου

Η προσομοίωση συνεχούς χρόνου (Continuous Simulation) αφορά ένα μοντέλο υπολογιστή ενός συστήματος, κατά την οποία γίνεται συνεχής παρακολούθηση της απόκρισης του συστήματος σύμφωνα με ένα σύνολο εξισώσεων που κατά κανόνα περιλαμβάνουν διαφορικές εξισώσεις.

Η προσομοίωση διακριτών γεγονότων μπορεί να εφαρμοστεί για συνεχή φαινόμενα, αλλά τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την προσομοίωση θα είναι κατά προσέγγιση. Ακόμα η προσομοίωση συνεχούς χρόνου μπορεί να εφαρμοστεί για διακριτά φαινόμενα, αλλά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορεί να δώσουν εξωγενή ή αδύνατα αποτελέσματα για ορισμένες περιπτώσεις.

Όπως είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα, στην προσομοίωση διακριτών γεγονότων έχουμε ένα σύστημα, στο οποίο οι μεταβλητές κατάστασης μεταβάλλονται στιγμιαία σε διακριτές στιγμές. Στη προσομοίωση συνεχούς χρόνου εφαρμόζεται μια συνεχής λειτουργία, χρησιμοποιώντας πραγματικούς αριθμούς για να αναπαραστήσουμε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο σύστημα. Για παράδειγμα, στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, από τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα,  $F = ma$ , είναι μια συνεχής εξίσωση. Μια τιμή,  $F$  (δύναμη), μπορεί να υπολογιστεί επακριβώς για οποιεσδήποτε πραγματικές τιμές των  $m$  (μάζα) και  $a$  (επιτάχυνση). Ο αριθμός των συνδυασμών της δύναμης και της επιτάχυνσης είναι άπειρος και ως εκ τούτου δεν είναι μια διακριτή τιμή.

### 2.5.3 Προσομοίωση Monte Carlo

Η Monte Carlo προσομοίωση είναι μια ευέλικτη μέθοδος για την ανάλυση της συμπεριφοράς ορισμένων δραστηριοτήτων, προγραμμάτων ή διαδικασιών που αφορούν την αβεβαιότητα.

Η μέθοδος αυτή εφευρέθηκε από επιστήμονες το 1944 περίπου, και ονομάστηκε έτσι από την πόλη του Μονακό, εξαιτίας μιας ρουλέτας, μια απλής γεννήτριας τυχαίων αριθμών.

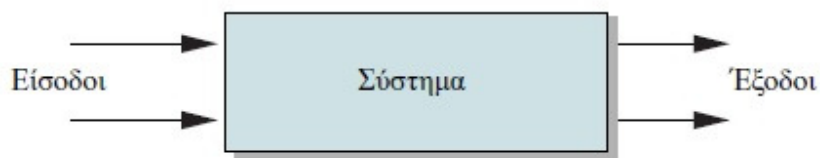
Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που στηρίζονται σε επαναλαμβανόμενες τυχαίες δειγματοληψίες για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων τους. Οι Monte Carlo μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνά κατά την προσομοίωση φυσικής και μαθηματικών συστημάτων. Λόγω της εξάρτησης από τον επαναλαμβανόμενο υπολογισμό τυχαίων αριθμών, οι Monte Carlo μέθοδοι είναι οι πλέον κατάλληλες για τον υπολογισμό από ένα υπολογιστή. Οι Monte Carlo μέθοδοι τείνουν να χρησιμοποιούνται όταν είναι εφικτό ή αδύνατο να υπολογιστεί το ακριβές αποτέλεσμα με ντετερμινιστικό αλγόριθμο.

Οι Monte Carlo μέθοδοι προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στη μελέτη συστημάτων με μεγάλο αριθμό συνδυασμού βαθμού ελευθερίας, όπως τα υγρά, ισχυρά συνδεδεμένα στερεά, και η κυτταρική δομή. Γενικότερα, οι Monte Carlo μέθοδοι είναι χρήσιμες για τη μοντελοποίηση των φαινομένων με σημαντική αβεβαιότητα όσον αφορά τους διαθέσιμους πόρους, όπως ο υπολογισμός των κινδύνων στον τομέα των επιχειρήσεων. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στα μαθηματικά. Μια κλασική χρήση είναι για την αξιολόγηση των ολοκληρωμάτων, ιδιαίτερα των πολυδιάστατων ολοκληρωμάτων με περίπλοκες οριακές συνθήκες. Είναι ευρέως επιτυχείς μέθοδοι ανάλυσης κινδύνου σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους ή την ανθρώπινη διαίσθηση. Οι Monte Carlo προσομοιώσεις έχουν εφαρμοστεί για την εξερεύνηση και εκμετάλλευση του πετρελαίου, την πραγματική παρατήρηση βλαβών, για τις υπερβάσεις κόστους και χρονοδιαγράμματος και είναι συνήθως καλύτερες από τις προβλεπόμενες προσομοιώσεις ανθρώπινης διαίσθησης ή εναλλακτικά ευέλικτων μεθόδων.

## 2.6 Ορισμός Συστήματος και ιδιότητες συστημάτων

Επειδή η προσομοίωση [3] χρησιμοποιείται για τη μελέτη συστημάτων μέσω των μοντέλων τους, είναι απαραίτητο να ορισθεί επακριβώς το σύστημα και τα συστατικά του στοιχεία. Είναι επίσης απαραίτητη η εξέταση των ιδιοτήτων των συστημάτων, τουλάχιστον αυτών των ιδιοτήτων που αφορούν τη μελέτη τους (Gordon 1969, McDougal 1975).

Σύστημα είναι ένα σύνολο αλληλοεπιδρώντων στοιχείων τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους ή λειτουργούν συλλογικά για την επίτευξη κάποιου σκοπού. Το σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος φαίνεται στην εικόνα 8 και αποτελείται από ένα μπλοκ με εισόδους και εξόδους.



Εικόνα 8 - 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, κτλ. Η σύνθεση ορίζεται ως ο καθορισμός των στοιχείων του συστήματος όταν δοθούν οι εισόδους και οι έξοδοι που αντιστοιχούν σ' αυτές τις εισόδους. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος.

Τα συστήματα αποτελούνται 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.

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 στις επόμενες παραγράφους, 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 μην εξαρτάται μόνον από τις 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. Το μοντέλο, επομένως, 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.

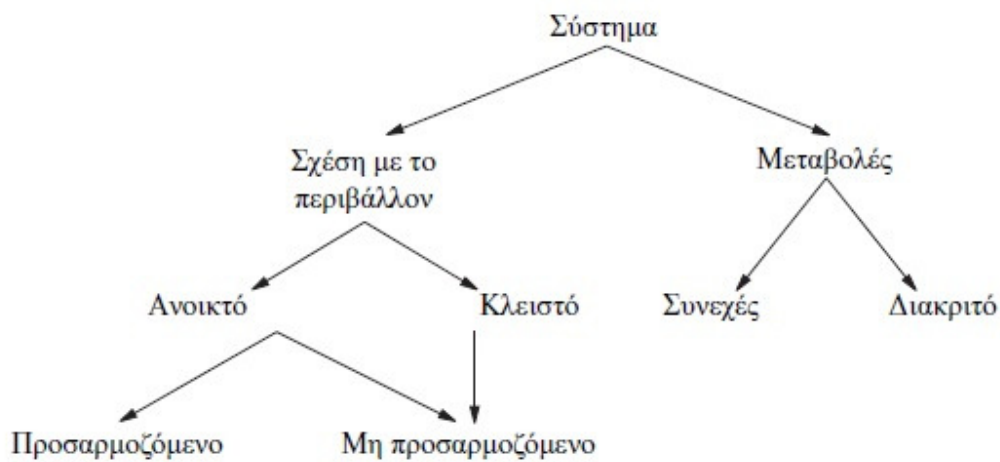
Τα συστήματα χωρίζονται επίσης σε κατηγορίες, ανάλογα με τις μεταβολές της κατάστασής τους ή τη σχέση τους με το περιβάλλον.

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.

Στα διακριτά συστήματα οι μεταβολές είναι κυρίως ασυνεχείς, πράγμα που σημαίνει, ότι η κατάσταση του συστήματος αλλάζει μόλις τελειώσει μία δραστηριότητα (Law 1991, Fishman 1973). Παράδειγμα διακριτού συστήματος είναι μία τράπεζα.

Στην πραγματικότητα βέβαια, 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 ποτέ δεν ενδιαφέρει κατά τη μελέτη του συστήματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνολικός χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην ουρά. Το χαρακτηριστικό αυτό αποκτά τιμή μόνον όταν ο πελάτης βγει από την ουρά και αρχίσει να εξυπηρετείται. Επομένως, η κατάσταση του συστήματος μεταβάλλεται μόνον σε διακριτές χρονικές στιγμές, μία από τις οποίες είναι η έναρξη εξυπηρέτησης ενός πελάτη.

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 αντίθετα, αν δεν έχει εξωγενείς δραστηριότητες ονομάζεται κλειστό. Ένα ανοικτό σύστημα αν και 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. Στην εικόνα 9 δίνεται διαγραμματικά η ταξινόμηση των συστημάτων.



Εικόνα 9 - Ταξινόμηση Συστημάτων

## 2.7 Βήματα μελέτης ενός συστήματος με προσομοίωση

Παρακάτω αναφέρονται τα βήματα [2, 4, 5] για τη μελέτη ενός συστήματος προσομοίωσης.

- Καθορισμός στόχων και αναγκών του προβλήματος

Το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη μιας προσομοίωσης είναι να καθοριστεί ρητά το πρόβλημα που πρέπει να εξεταστεί από το πρότυπο. Οι στόχοι και οι ανάγκες του προγράμματος πρέπει να εκφραστούν μαζί με την απαραίτητη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τα όρια πρέπει να καθοριστούν μεταξύ του προβλήματος που μας ενδιαφέρει και των συνθηκών που επικρατούν στο περιβάλλον (δηλαδή καθορίζουμε το εύρος του συστήματος). Οι διεπαφές πρέπει να καθοριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να περάσουμε τα όρια αυτά, για να επιτύχουμε τη διαλειτουργικότητα με τα εξωτερικά συστήματα. Ένα πρότυπο, δεν μπορεί να χτιστεί βασισμένο σε ασαφείς ορισμούς αναμένοντας τα αποτελέσματα.

- Καθορισμός της γενικής ιδέας του προβλήματος

Μόλις καθοριστεί το πρόβλημα, ένα ή περισσότερα κατάλληλα εννοιολογικά πρότυπα μπορούν να καθοριστούν. Αυτά περιλαμβάνουν τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το σύστημα, τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται, και τα αποτελέσματα που παράγονται. Οι υποθέσεις που γίνονται για το σύστημα σε αυτή τη φάση είναι τεκμηριωμένες, μαζί με τις πιθανές επιδράσεις αυτών των υποθέσεων στα αποτελέσματα ή την ακρίβεια και ορθότητα της προσομοίωσης. Περιορισμοί βασισμένοι στο πρότυπο, στοιχεία, και υποθέσεις καθορίζονται σαφώς έτσι ώστε να μπορούν να καθοριστούν οι κατάλληλες χρήσεις της προσομοίωσης. Το εννοιολογικό πρότυπο περιλαμβάνει μια περιγραφή του χρονικού διαστήματος, του αριθμού προσωπικού, κι του εξοπλισμού που θα απαιτηθούν για να παραχθεί και να λειτουργήσει το πρότυπο. Όλα τα πιθανά πρότυπα συγκρίνονται έως ότου καθοριστεί μια ενιαία λύση. Η λύση αυτή θα καλύπτει τους στόχους και τις απαιτήσεις του προβλήματος και για αυτή οι αλγόριθμοι θα μπορούν να κατασκευαστούν και τα δεδομένα εισόδου να αποκτηθούν.

- Συλλογή δεδομένων εισόδου

Μόλις καθοριστούν οι συνθήκες τις οποίες πρέπει να καλύπτει η λύση, τα στοιχεία που απαιτούνται για τη λειτουργία και τον προσδιορισμό του προτύπου πρέπει να συλλεχθούν. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τις πληροφορίες που θα χρησιμεύσουν ως παράμετροι εισόδου, θα βοηθήσουν στην ανάπτυξη των αλγορίθμων και θα χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν την απόδοση των εκτελέσεων της προσομοίωσης. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν τις γνωστές συμπεριφορές των συστημάτων εργασίας και τις πληροφορίες για τις στατιστικές κατανομές των τυχαία επιλεγμένων μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν. Η συλλογή των σωστών δεδομένων εισόδου είναι μια από τις δυσκολότερες φάσεις στη διαδικασία της προσομοίωσης, και η πιο επιρρεπής σε λάθη και κακή εφαρμογή.

- ο Διαμόρφωση του μοντέλου

Το πρότυπο προσομοίωσης κατασκευάζεται βασισμένο στη λύση που καθορίστηκε και τα στοιχεία που συλλέχθηκαν. Οι μαθηματικές και λογικές περιγραφές του πραγματικού συστήματος κωδικοποιούνται σε μια μορφή που μπορεί να εκτελεσθεί από έναν υπολογιστή. Η δημιουργία μιας προσομοίωσης με υπολογιστή, όπως με οποιοδήποτε άλλο προϊόν λογισμικού, πρέπει να κατευθυνθεί από τις αρχές της τεχνολογίας λογισμικού.

- ο Επαλήθευση, εγκυρότητα και επικύρωση του προτύπου

Η επαλήθευση, η εγκυρότητα και η επικύρωση, είναι μια ουσιαστική φάση στην εξασφάλιση ότι οι αλγόριθμοι του προτύπου, τα δεδομένα εισόδου, και οι υποθέσεις σχεδίασης είναι σωστοί και λύνουν το πρόβλημα που προσδιορίστηκε στην αρχή της διαδικασίας. Δεδομένου ότι ένα πρότυπο προσομοίωσης και τα στοιχεία του είναι η κωδικοποίηση εννοιών που είναι δύσκολο να καθοριστούν πλήρως, είναι εύκολο να δημιουργηθεί ένα πρότυπο που είτε δεν είναι σωστό είτε λύνει ένα πρόβλημα διαφορετικό από αυτό που προσδιορίστηκε.

Η διαδικασία αυτή έχει ως σκοπό να αναγνωρίσει αυτά τα προβλήματα προτού να τεθεί το πρότυπο σε λειτουργία. Για τους σκοπούς αυτούς, η διαδικασία ανάπτυξης της προσομοίωσης διαιρείται σε ένα πρότυπο συνθηκών του περιβάλλοντος, ένα εννοιολογικό πρότυπο προβλήματος και ένα πρότυπο λογισμικού με καθορισμένες μεταβάσεις και ποιοτικές αξιολογήσεις μεταξύ αυτών των σταδίων. Η εγκυρότητα είναι η διαδικασία που καθορίζει αν το εννοιολογικό πρότυπο απεικονίζει τις πτυχές των συνθηκών του περιβάλλοντος του προβλήματος που πρέπει να εξεταστούν και αν οι απαιτήσεις της μελέτης μπορούν να καλυφθούν. Η εγκυρότητα χρησιμοποιείται επίσης για να καθορίσει αν οι διαδικασίες του τελικού προτύπου λογισμικού είναι σύμφωνες με τον πραγματικό κόσμο, συνήθως μέσω του πειραματισμού και της σύγκρισης με το σύνολο των γνωστών δεδομένων. Η επαλήθευση είναι η διαδικασία που καθορίζει αν το πρότυπο λογισμικού απεικονίζει ακριβώς το εννοιολογικό πρότυπο. Η επικύρωση είναι η επίσημη αποδοχή του προτύπου λογισμικού για ένα συγκεκριμένο σκοπό. Ένα πρότυπο λογισμικού που αναγνωρίζεται για έναν σκοπό μπορεί να μην είναι αποδεκτό για άλλο.

- ο Πειραματική σχεδίαση

Αυτή η φάση προσδιορίζει τις παραγωγικότερες και ακριβέστερες μεθόδους για την εκτέλεση της προσομοίωσης, για να παράγει τις επιθυμητές απαντήσεις. Οι στατιστικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό πειραμάτων που παράγουν τα ακριβέστερα δεδομένα με τον μικρότερο αριθμό επαναληπτικών εκτελέσεων της προσομοίωσης. Όταν οι εκτελέσεις της προσομοίωσης είναι ακριβές και δύσκολες στο να σχεδιαστούν, το πειραματικό σχέδιο μπορεί να εξασφαλίσει απαντήσεις με χαμηλότερο κόστος και με πιο σύντομα προγράμματα.

- Εκτέλεση προσομοίωσης

Αυτή είναι η πραγματική εκτέλεση του σχεδιασμένου, κατασκευασμένου, και επικυρωμένου προτύπου, σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο που δημιουργήθηκε. Οι εκτελέσεις της προσομοίωσης παράγουν τα δεδομένα εξόδου που απαιτούνται για να απαντήσουν στο πρόβλημα που προσδιορίστηκε αρχικά. Στην περίπτωση των προτύπων που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο Monte Carlo, πολλές εκατοντάδες ή χιλιάδες επαναλήψεις του προγράμματος μπορούν να απαιτηθούν για να φθάσουν στα στατιστικά αξιόπιστα αποτελέσματα.

- Συλλογή δεδομένων εξόδου

Ταυτόχρονα με την εκτέλεση του προτύπου, δεδομένα εξόδου συλλέγονται, οργανώνονται και αποθηκεύονται. Αυτή η φάση αντιμετωπίζεται κάποιες φορές ως αναπόσπαστο τμήμα του προτύπου, αλλά πρέπει να χωριστεί ευδιάκριτα, δεδομένου ότι είναι δυνατό να αλλαχθούν τα δεδομένα που συλλέγονται χωρίς αλλαγή των αλγορίθμων ή του σχεδίου του προτύπου.

- Ανάλυση των δεδομένων

Τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης μιας προσομοίωσης μπορούν να είναι διαφορετικά και κατανοητά. Λεπτομερείς αναλύσεις πρέπει να παρουσιαστούν για να εξαχθούν οι μακροπρόθεσμες τάσεις και για να ποσοτικοποιηθούν τις απαντήσεις στις καθοδηγητικές ερωτήσεις που παρακίνησαν την κατασκευή της προσομοίωσης. Η ανάλυση μπορεί να παράγει πληροφορίες συνοπτικά με μορφή πίνακα, με γραφική μορφή, με μορφή χάρτη, με τη μορφή δυναμικής κίνησης και με τη μορφή κειμένου. Οι σύγχρονες διεπαφές χρήστη έχουν ενισχύσει πολύ αυτήν την φάση με την εμφάνιση των στοιχείων σε μορφές οι οποίες μπορούν να γίνουν εύκολα κατανοητές από τα διαφορετικά ακροατήρια.

- Αναφορά και τεκμηρίωση

Τα αποτελέσματα της περιόδου μελέτης ή χρήσης της προσομοίωσης πρέπει να τεκμηριωθούν και να γίνουν γνωστά στα ενδιαφερόμενα συμβαλλόμενα μέρη. Αυτά τα συμβαλλόμενα μέρη προσδιορίζουν το βαθμό στον οποίο η προσομοίωση έχει απαντήσει σε συγκεκριμένες ερωτήσεις και ελέγχει για πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις.

- Υλοποίηση και επέκταση του μοντέλου

Τα πρότυπα προσομοίωσης είναι ακριβά και είναι δύσκολο να δημιουργηθούν. Κατά συνέπεια, μόλις δημιουργηθεί ένα πρότυπο, θα τροποποιηθεί για να χρησιμοποιηθεί σε πολλά σχετικά προγράμματα. Οι νέες απαιτήσεις θα ενσωματωθούν, οι νέοι χρήστες θα το υιοθετήσουν, και ολόκληρη η διαδικασία ανάπτυξης θα αναπτυχθεί πολλές φορές.



## 2.8 Μοντέλα Προσομοίωσης

Τα μοντέλα προσομοίωσης είναι κυρίως αριθμητικά δυναμικά μαθηματικά μοντέλα. Αυτό όμως που κυρίως χαρακτηρίζει τα μοντέλα προσομοίωσης είναι το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά δεν λύνονται, αλλά εκτελούνται, συνήθως σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

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

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

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

## 2.9 Δημιουργία Μοντέλων Προσομοίωσης

Η δημιουργία μοντέλων για προσομοίωση [3] είναι μια πειραματική μεθοδολογία, η οποία έχει ως σκοπούς:

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

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

- Εκτίμηση

Γίνεται προσπάθεια να προσδιορισθεί πόσο καλό είναι το προτεινόμενο σύστημα, δηλαδή, πόσο καλά ανταποκρίνεται στη σχεδιάσή του, όταν κριθεί με βάση συγκεκριμένα και προκαθορισμένα κριτήρια.

- Σύγκριση

Συγκρίνονται διαφορετικές σχεδιάσεις του προτεινομένου συστήματος ως προς την επίτευξη συγκεκριμένης λειτουργίας. Μπορούν επίσης να συγκριθούν μεταξύ τους διαφορετικές προτεινόμενες λειτουργίες του συστήματος.

- Πρόβλεψη

Γίνεται μια εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος κάτω από τις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας.

- Ανάλυση Ευαισθησίας

Συστήματα τα οποία εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες ή συνθήκες δεν αντιδρούν με την ίδια ευαισθησία σε μεταβολές αυτών των παραγόντων ή συνθηκών. Καθορίζονται έτσι οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τη λειτουργία του συστήματος.

- Βελτιστοποίηση

Καθορίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή απόκριση του συστήματος.

- Λειτουργικές σχέσεις

Προσδιορίζονται οι λειτουργικές σχέσεις ανάμεσα στους σημαντικότερους παράγοντες ή συνθήκες που επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος.

## 2.10 Τα Είδη Μοντέλων Προσομοίωσης

Έχοντας ένα μαθηματικό μοντέλο που πρέπει να μελετήσουμε με προσομοίωση (δηλαδή ένα Μοντέλο Προσομοίωσης), θα πρέπει να αναζητήσουμε κατάλληλα εργαλεία για το σκοπό αυτό. Στην προσπάθεια αυτή, είναι χρήσιμο να ταξινομήσουμε τα μοντέλα προσομοίωσης με βάση τέσσερις διαφορετικές έννοιες:

### 2.10.1 Στατικά ή Δυναμικά Μοντέλα Προσομοίωσης

Ένα στατικό μοντέλο προσομοίωσης, αναπαριστά ένα σύστημα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή ένα σύστημα στο οποίο ο χρόνος δεν έχει σημασία. Αντίθετα, ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα, όπως αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου.

### 2.10.2 Ντετερμινιστικά ή Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης

Αν ένα μοντέλο προσομοίωσης δεν περιλαμβάνει πιθανοτικά (δηλαδή «τυχαία») τμήματα, ονομάζεται ντετερμινιστικό. Για παράδειγμα, ένα πολύπλοκο σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει μία χημική αντίδραση, μπορεί να είναι ένα τέτοιο μοντέλο. Στα ντετερμινιστικά μοντέλα, η έξοδος είναι καθορισμένη με δεδομένο το σύνολο των ποσοτήτων και σχέσεων εισόδου του μοντέλου. Όμως, πολλά συστήματα πρέπει να χρησιμοποιήσουν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης, δηλαδή μοντέλα που θα έχουν τουλάχιστον ορισμένα τμήματα με «τυχαία» είσοδο. Τα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα που βασίζονται στα συστήματα αναμονής (queueing systems), χρησιμοποιούν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης.

### 2.10.3 Αυτο-οδηγούμενα ή Ιχνο-οδηγούμενα Μοντέλα Προσομοίωσης

Σε ένα αυτο-οδηγούμενο (self-driven) μοντέλο, υπάρχει μία εσωτερική πηγή τυχαίων αριθμών. Οι τυχαίοι αριθμοί οδηγούν τα τμήματα του μοντέλου, δηλαδή χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των στιγμών εμφανίσεων των γεγονότων του συστήματος. Το βασικό χαρακτηριστικό του αυτο-οδηγούμενου μοντέλου είναι ότι αποτελεί ένα αυτόνομο μοντέλο το οποίο δεν χρειάζεται εξωτερικές εισόδους (inputs) για να λειτουργήσει. Αντίθετα, ένα ιχνο-οδηγούμενο (trace-driven) μοντέλο καθοδηγείται από ακολουθίες εισόδου που προέρχονται από δεδομένα (trace data) που έχουν δημιουργηθεί από τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος. Τέτοια δεδομένα μπορούν να παραχθούν στα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα που διαθέτουν ενσωματωμένα προγράμματα ιχνηλάτησης (tracing programs) που παρακολουθούν και καταγράφουν τις δραστηριότητες του συστήματος. Τα ιχνο-οδηγούμενα μοντέλα έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι αποφεύγονται οι δυσκολίες της πιθανοτικής ανάλυσης που χρειάζεται για τη χρήση κατανομών στην περιγραφή των εισόδων του μοντέλου και επίσης το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά είναι εύκολο να επιβεβαιωθούν. Το πρόβλημα με τα ιχνο-οδηγούμενα μοντέλα είναι το μικρό εύρος εφαρμογών που μπορούν να αντιμετωπίσουν. Οι

εφαρμογές αυτές πρακτικά περιορίζονται σε υπολογιστικά συστήματα και μάλιστα μόνο για τη μελέτη μετατροπών σε ένα σύστημα που ήδη λειτουργεί.

#### 2.10.4 Συνεχή ή Διακριτά Μοντέλα Προσομοίωσης

Οι ορισμοί των συνεχών και διακριτών μοντέλων προσομοίωσης είναι ανάλογοι με τους ορισμούς των συνεχών και διακριτών συστημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πάντως, πρέπει να σημειωθεί ότι ένα διακριτό μοντέλο δεν χρησιμοποιείται μόνο για την αναπαράσταση ενός διακριτού συστήματος και ένα διακριτό σύστημα δεν αναπαρίσταται μόνο από ένα διακριτό μοντέλο προσομοίωσης. Η απόφαση για τη χρήση ενός διακριτού ή ενός συνεχούς μοντέλου για ένα συγκεκριμένο σύστημα, εξαρτάται από τους ιδιαίτερους στόχους της μελέτης. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο ροής πακέτων δεδομένων σε ένα WAN, θα είναι διακριτό εάν μας ενδιαφέρουν τα χαρακτηριστικά και η κίνηση των επιμέρους πακέτων και κατά συνέπεια των επιμέρους χρηστών. Αντίθετα, αν μας ενδιαφέρει μόνο η συνολική κίνηση, η ροή των πακέτων θα μπορούσε ίσως να περιγραφεί με διαφορικές εξισώσεις σε ένα συνεχές μοντέλο. Τα μοντέλα προσομοίωσης που είναι διακριτά, δυναμικά, στοχαστικά και αυτο-οδηγούμενα θα ονομάζονται Μοντέλα Προσομοίωσης Διακριτών Γεγονότων (discrete event simulation models).

#### 2.11 Κατασκευή Μοντέλων Προσομοίωσης

Η κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης [3] 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.

## 2.12 Φάσεις Προσομοίωσης

Η διαδικασία της προσομοίωσης αποτελείται από τρεις διακριτές φάσεις:

- την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης,
- την εκτέλεση ή τρέξιμο του μοντέλου και
- την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Η κατασκευή του μοντέλου αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό βήμα για την προσομοίωση του συστήματος, επειδή η ποιότητα και αξιοπιστία του καθορίζουν και την αξιοπιστία της προσομοίωσης. Στα επόμενα κεφάλαια δίνεται αναλυτικά η μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλων για συνεχή και διακριτά συστήματα. Τα μοντέλα συνεχών συστημάτων λύνονται συνήθως με αναλυτικές μεθόδους, ενώ για τα διακριτά συστήματα χρησιμοποιείται συνήθως η προσομοίωση. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο χρόνος που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση αποτελεί μοντελοποίηση του χρόνου του συστήματος. Επομένως, ο προσομοιωμένος χρόνος δεν έχει καμία σχέση με τον πραγματικό χρόνο που παρέρχεται όταν εκτελείται η προσομοίωση.

## 2.13 Μοντέλα Συστημάτων

Η μελέτη των συστημάτων είτε με μαθηματικές μεθόδους είτε με προσομοίωση δεν γίνεται με αυτό καθαυτό το σύστημα, αλλά με ένα μοντέλο του συστήματος. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την κατασκευή ενός μοντέλου:

- 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 επικεντρώνει την προσοχή του μόνο στα σημαντικά στοιχεία.

- 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.

- 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, έτσι ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε τη μελλοντική συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος.

- 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.

- 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.

- 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.

- Ανεύρεση εναλλακτικών λύσεων και βελτιστοποίηση

Ο λόγος αυτός για την κατασκευή μοντέλων είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο. Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος είναι δυνατόν να κατασκευασθούν πολλά διαφορετικά μοντέλα και να επιλεγεί το κατάλληλο προς υλοποίηση με βάση κάποια συγκεκριμένα κριτήρια βελτιστοποίησης.

- 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 και στη συνέχεια οι παράμετροι αυτοί εφαρμόζονται στο πραγματικό σύστημα.

Αν και με τις περιγραφές που δώσαμε μέχρι τώρα είναι πλέον κατανοητή η έννοια του μοντέλου, είναι απαραίτητο να το ορίσουμε και τυπικά.

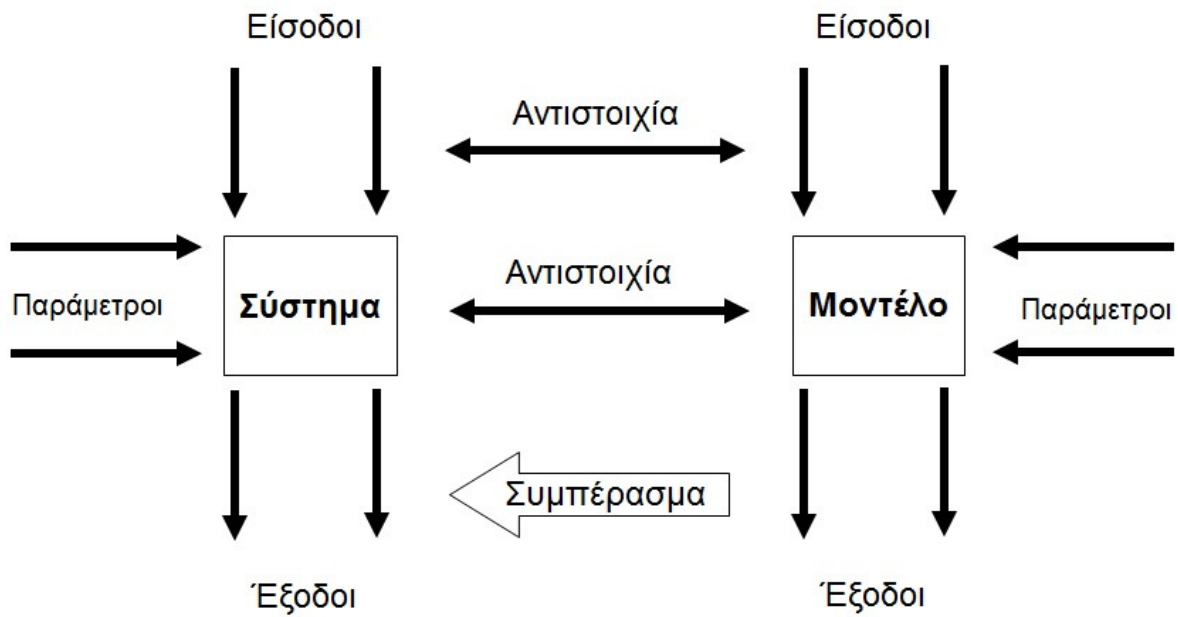
Μοντέλο είναι μία αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος ή οργανισμού ή φυσικού φαινομένου ή ακόμη και μίας ιδέας. Ως δεύτερος ορισμός: Μοντέλο είναι το σύνολο των πληροφοριών ενός συστήματος που έχει συγκεντρωθεί με σκοπό τη μελέτη του συστήματος.

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

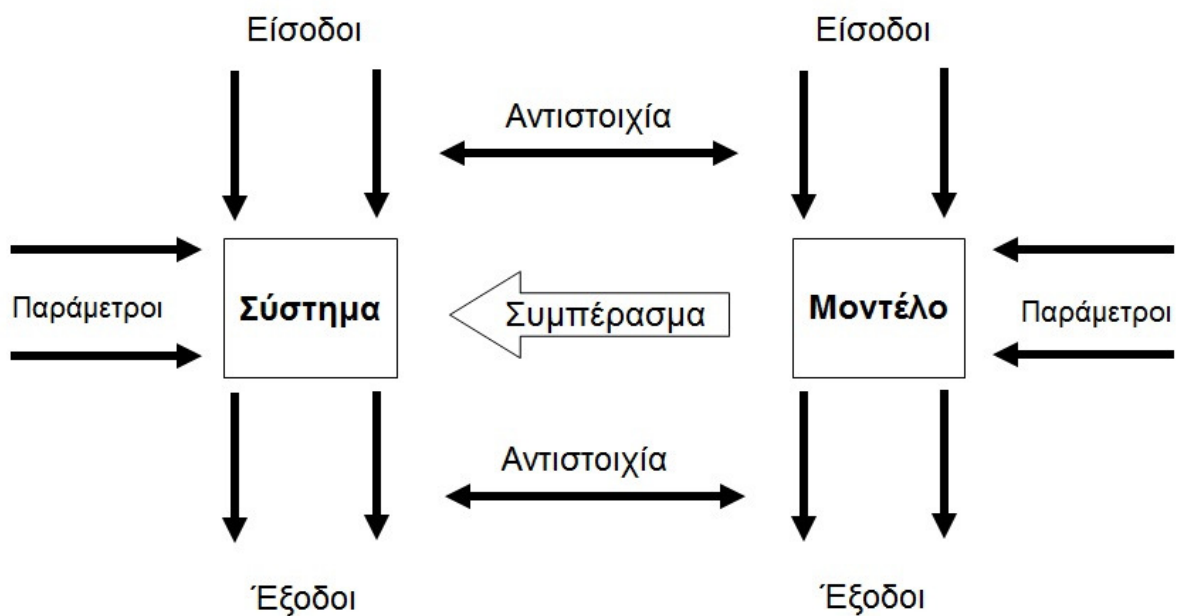
Σε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις εισόδους του συστήματος και στις εισόδους του μοντέλου. Υπάρχει επίσης αντιστοιχία ανάμεσα στις εσωτερικές δομές του μοντέλου και του συστήματος. Η μελέτη κατόπιν συνάγει τις εξόδους του συστήματος από τις εξόδους του μοντέλου. Αυτό φαίνεται διαγραμματικά στην εικόνα 10.

Σε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για τη σύνθεση του συστήματος υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις εισόδους του συστήματος και στις εισόδους 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 στην εικόνα 11.

## 2.14 Αντιστοιχία Μοντέλου Συστήματος



Εικόνα 10 - Ανάλυση Συστήματος



Εικόνα 11 - Σύνθεση Συστήματος



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

## 2.15 Κριτήρια Καλού Μοντέλου

Ένα καλό μοντέλο [3] όχι μόνο αντιπροσωπεύει πιστότερα το σύστημα από ένα κακό, αλλά βοηθά περισσότερο τόσο στην κατανόηση των λειτουργιών του συστήματος, όσο και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια που επιτρέπουν την αναγνώριση ενός καλού μοντέλου και τα οποία βοηθούν στην κατασκευή του:

- Γενικώς, τα καλά μοντέλα είναι εύκολα στην κατανόηση από τον χρήστη και προσανατολίζονται προς τους συγκεκριμένους σκοπούς ή στόχους που έχουν τεθεί. Επιπλέον, είναι ισχυρά με την έννοια ότι δεν δίνουν περίεργες και δυσνόητες απαντήσεις.
- Οι χρήστες ελέγχουν και μεταβάλλουν ευκολότερα ένα καλό μοντέλο παρά ένα κακό. Είναι δηλαδή πολύ πιο εύκολο για τους χρήστες να επικοινωνήσουν με ένα καλό μοντέλο. Η προσαρμοστικότητα του μοντέλου είναι επομένως ένα σημαντικό στοιχείο ποιότητας του μοντέλου. Για τα καλά μοντέλα υπάρχουν εύκολες και ακριβείς διαδικασίες τροποποίησης ή ενημέρωσής τους.
- Τέλος, χαρακτηριστικό των καλών μοντέλων είναι η δυνατότητα εξέλιξής τους. Ξεκινούν δηλαδή από μια απλή μορφή και εξελίσσονται σε μια πιο πολύπλοκη, ανάλογα με τη λεπτομέρεια που θέλει να μελετήσει ο χρήστης.

## Κεφάλαιο 3 : Λογισμικά Προσομοίωσης Δικτύων

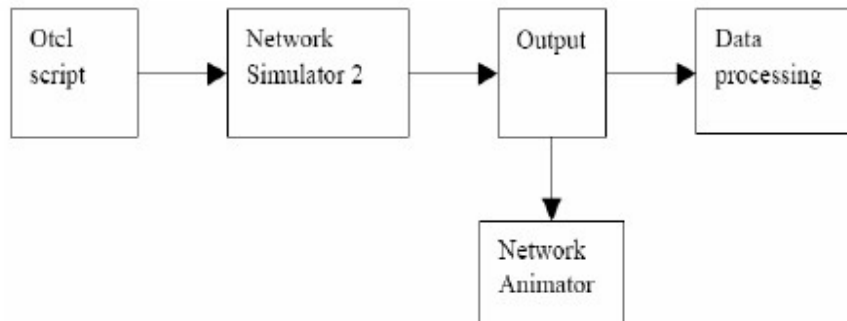
### 3.1 Εισαγωγή

Τα λογισμικά ανοιχτού κώδικα είναι πολλά. Μερικά εξ' αυτών είναι τα: NS-2, NS-3, OMNET++, JSIM, GNS3, SSFNet, NetSim, REAL, NCTUns και GloMoSim. Ας σημειώσουμε ότι το OPNET και το QualNET είναι Commercial.

### 3.2 Ο Προσομοιωτής NS-2

Ο προσομοιωτής Network Simulator 2 (NS-2) [12, 17] είναι το αποτέλεσμα μιας συνεχιζόμενης προσπάθειας έρευνας και ανάπτυξης ενός προσομοιωτή διακριτών γεγονότων με στόχο την έρευνα δικτύων. Προσφέρει θεμελιώδη υποστήριξη για την προσομοίωση ενός πλήθους πρωτοκόλλων όλων των δικτυακών επιπέδων τόσο για ενσύρματα όσο και για ασύρματα (τοπικά και δορυφορικά) δίκτυα. Εξαιτίας των δυνατοτήτων που διαθέτει και του πλήθους των προσφερόμενων υλοποιήσεων πρωτοκόλλων, έχει άτυπα καθιερωθεί ως ο βασικότερος προσομοιωτής για την αξιολόγηση πρωτοκόλλων για MANET.

Ο NS-2 βασίζεται σε έναν αντικειμενοστραφή προσομοιωτή που είναι γραμμένος σε C++ και σε έναν διερμηνευτή της OTcl (αντικειμενοστραφής επέκταση της scripting γλώσσας Tcl) που χρησιμοποιείται για να εκτελούνται τα σενάρια (scripts) του χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης γράφει ένα σενάριο OTcl, όπου καθορίζει τις παραμέτρους του δικτύου (τις πηγές, τους προορισμούς, τον τύπο της κίνησης) και πια πρωτόκολλα θα χρησιμοποιήσει. Το σενάριο έπειτα χρησιμοποιείται από τον προσομοιωτή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης είναι ένα ή περισσότερα αρχεία καταγραφής (trace file), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία των δεδομένων της προσομοίωσης (π.χ. υπολογισμό καθυστέρησης και ποσοστού παράδοσης), καθώς και για την γραφική απεικόνισή της (π.χ. μέσω του Network Animator - NAM). Μια γενική άποψη της δομής του ns-2 φαίνεται στην εικόνα 12 που ακολουθεί.



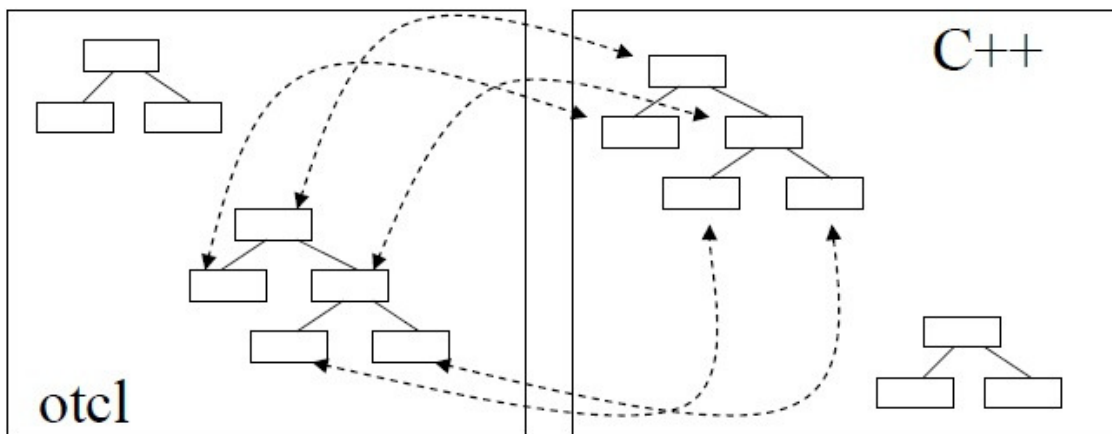
**Εικόνα 12 - Γενική Άποψη της Δομής του NS-2**

Το πρόγραμμα NS-2 έχει πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα εξής:

- Το NS-2 υποστηρίζει ντετερμινιστική ή πιθανολογική απώλεια πακέτων σε ουρές που επισυνάπτονται στον κόμβο δικτύων, καθώς υποστηρίζει και την προσδιοριστική και στοχαστική μοντελοποίηση της κατανομής της κυκλοφορίας.
- Το NS-2 παρέχει τη δυνατότητα εξομοίωσης: το NS-2 μπορεί να συνδεθεί σε ένα πραγματικό δίκτυο και να «συλλάβει» live πακέτα, ακριβώς όπως σε ένα κοινό κόμβο. Μπορεί επίσης να δώσει πακέτα στο live δίκτυο.
- Ο προσομοιωτής μπορεί να δημιουργήσει εξατομικευμένα αρχεία καταγραφής, επιτρέποντας στους χρήστες να επιλέξουν παραμέτρους που πρέπει να εντοπίσουν, συνεπώς, εξοικονομεί πόρους στη CPU.
- Το NS-2 προσφέρει μια περιεκτική τεκμηρίωση και ενημερώνεται τακτικά το εγχειρίδιο, καθώς και ένα API για C++ και OTcl classes.
- Άλλα χαρακτηριστικά του προσομοιωτή περιλαμβάνουν μοντέλα για διαφορετικές αρχιτεκτονικές δικτύου συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων LAN, MANET και δορυφορικές επικοινωνίες, ενσωματωμένα στα μοντέλα κίνησης με την υποστήριξη για την ανάπτυξη νέων, συνδέοντας νέες γεννήτριες ψευδοτυχαίων αριθμών και η εκτίμηση κατάστασης δικτύου.

### 3.2.1 Η Δομή του NS-2

Ο προσομοιωτής περιλαμβάνει ένα πολύ μεγάλο αριθμό από εφαρμογές, πρωτόκολλα, τύπους δικτύων, στοιχεία δικτύων και μοντέλα κίνησης. Αυτά ονομάζονται “Αντικείμενα Προσομοίωσης”. Χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού γιατί στην πραγματικότητα έχει δύο διαφορετικά πράγματα να κάνει. Από τη μία η λεπτομερής προσομοίωση πρωτοκόλλων χρειάζεται μία γλώσσα προγραμματισμού συστήματος η οποία θα μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά byte και κεφαλίδες πακέτων και να υλοποιεί αλγόριθμους που εκτελούνται πάνω από μεγάλα σύνολα δεδομένων. Για αυτές τις ενέργειες ο γρήγορος χρόνος εκτέλεσης είναι σημαντικός. Από την άλλη ένα μεγάλο μέρος της έρευνας αφορά παραμέτρους και σχηματισμούς ελαφρά διαφοροποιημένους καθώς και γρήγορη εξέταση ενός αριθμού σεναρίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ταχύτητα αλλαγής και επανεκτέλεσης είναι περισσότερο σημαντική. Αφού η παραμετροποίηση τρέχει μια φορά, ο γρήγορος χρόνος σχεδιασμού σε αυτό το κομμάτι είναι περισσότερο σημαντικός. Ο NS-2 επιτυγχάνει και τους δύο στόχους. Η C++, ως γλώσσα προγραμματισμού, είναι γρήγορη στην εκτέλεση αλλά αργή στην αλλαγή του κώδικα, κάτι που την κάνει κατάλληλη για λεπτομερή υλοποίηση πρωτοκόλλων. Αντίθετα, η OTcl, ως γλώσσα κωδικοποίησης σεναρίων (scripting language), εκτελείται πολύ πιο αργά αλλά είναι ιδανική για γρήγορες αλλαγές στον κώδικα, κάτι που την κάνει ιδανική για παραμετροποίηση και έλεγχο των προσομοιώσεων. Δηλαδή έχουμε έναν συμβιβασμό ανάμεσα στην μεγάλη ταχύτητα εκτέλεσης που παρέχεται από μια γλώσσα όπως η C++ και στους μικρούς χρόνους γραφής ενός σεναρίου σε μια γλώσσα όπως η OTcl. Αυτή η διαλειτουργικότητα υλοποιείται με την παρουσία δύο ιεραρχιών κλάσεων, οι οποίες είναι η μεταφρασμένη ιεραρχία της C++ και η διερμηνευμένη ιεραρχία της OTcl, μεταξύ των οποίων υπάρχει μία προς μία αντιστοιχία κλάσεων (εικόνα 13).



Εικόνα 13 - Απεικόνιση της «1-1» αντιστοιχίας μεταξύ των κλάσεων της μεταφρασμένης ιεραρχίας της C++

Η μεταφρασμένη ιεραρχία της C++ επιτρέπει να επιτυγχάνεται αποδοτικότητα στην προσομοίωση και ταχύτερη εκτέλεση. Αυτό επιτρέπει την μείωση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων και των γεγονότων. Η OTcl χρησιμοποιείται για τον καλύτερο έλεγχο της προσομοίωσης. Στα σενάρια OTcl που δίνονται από το χρήστη καθορίζονται η τοπολογία του δικτύου, τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα κάθε επιπέδου, καθώς και οι εφαρμογές που θα προσομοιωθούν. Επίσης, καθορίζονται τα δεδομένα που θα καταγραφούν και, μερικώς, η μορφή τους. Η OTcl μπορεί να κάνει χρήση των μεταφρασμένων αντικειμένων σε C++ μέσω μιας OTcl διεπαφής (interface), αφού δημιουργείται ένα αντικείμενο OTI για κάθε αντικείμενο C++.

Ο ns-2, όπως αναφέραμε, είναι προσομοιωτής διακριτών γεγονότων (discrete events). Αυτό σημαίνει ότι η χρονική πρόοδος μιας προσομοίωσης εξαρτάται από τη χρονική ακολουθία των γεγονότων, τα οποία διατηρούνται από έναν χρονοπρογραμματιστή (scheduler). Έτσι, κάθε γεγονός είναι ένα αντικείμενο στην ιεραρχία κλάσεων της C++ με ένα μοναδικό αναγνωριστικό (id), έναν προγραμματισμένο χρόνο πραγματοποίησης και έναν δείκτη σε ένα αντικείμενο που χειρίζεται το γεγονός. Ο χρονοπρογραμματιστής χρησιμοποιεί μία διατεταγμένη δομή δεδομένων με τα γεγονότα, τα οποία πρόκειται να εκτελεστούν, και τα εκτελεί διαδοχικά. Οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες θα συμβούν τα γεγονότα καθορίζονται από το σενάριο του χρήστη (αλλά και από την τύχη).

### 3.3 Ο Προσομοιωτής NS-3

Όπως και ο προκάτοχός του το NS-3 [7] στηρίζεται στην C++ για την υλοποίηση των μοντέλων προσομοίωσης. Η διαφορά όμως έγκειται στο γεγονός ότι δεν χρησιμοποιεί πια την OTcl για να ελέγχει την προσομοίωση, λύνοντας έτσι αρκετά προβλήματα. Έτσι, για μια προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο C++ και σε μερικές περιπτώσεις και Python. Επίσης έχει πολύ καλές δυνατότητες επέκτασης και αρκετά βελτιωμένη απόδοση.

Ο NS-3 επιτρέπει την μελέτη ενός ευρέως συνόλου πρωτοκόλλων διαδικτύου καθώς και συστημάτων μεγάλης κλίμακας σε ένα πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον, ενώ αποτελεί και ένα εργαλείο το οποίο ακολουθεί και είναι σύμφωνο με τις ανάγκες προσομοίωσης της μοντέρνας έρευνας για τα πρωτόκολλα και τις αρχιτεκτονικές δικτύωσης.

Ο NS-3 είναι ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων (discrete event simulator) ο οποίος στοχεύει κυρίως στην έρευνα δικτύων αλλά χρησιμοποιείται και για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Πρόκειται για ένα ελεύθερο λογισμικό, υπό την άδεια της GNU GPLv2, και είναι διαθέσιμο στο κοινό για έρευνα ανάπτυξη και χρήση. Ο στόχος του NS-3 project είναι να αναπτύξει ένα προτεινόμενο, ανοιχτού κώδικα περιβάλλον προσομοίωσης για την έρευνα στα δίκτυα έτσι ώστε να είναι ευθυγραμμισμένο με τις ανάγκες της σύγχρονης προσομοίωσης της διαδικτυακής

έρευνας και να ενθαρρύνει την συνεισφορά, την αξιολόγηση και την επικύρωση του λογισμικού από την κοινότητα.

Το NS-3 project έχει αναλάβει την δέσμευση να δημιουργήσει ένα σταθερό πυρήνα προσομοίωσης, ο οποίος είναι καλά τεκμηριωμένος, εύκολος στη χρήση και στην αποσφαλμάτωση, καθώς και να ικανοποιήσει τις ανάγκες της συνολικής ροής της προσομοίωσης, ξεκινώντας από τις ρυθμίσεις της προσομοίωσης και φτάνοντας στην συλλογή των ιχνών και την ανάλυση. Επιπλέον, η υποδομή του λογισμικού του NS-3 ενθαρρύνει την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης τα οποία είναι αρκετά ρεαλιστικά για να επιτρέψουν στον NS-3 να χρησιμοποιηθεί ως ένας εξομοιωτής δικτύων πραγματικού χρόνου, ο οποίος να διασυνδέεται με τον πραγματικό κόσμο και να επιτρέπει πολλές από τις υφιστάμενες υλοποιήσεις πραγματικών πρωτοκόλλων να επαναχρησιμοποιηθούν εντός του NS-3.

Ο πυρήνας προσομοίωσης του NS-3 υποστηρίζει την έρευνα τόσο σε δίκτυα βασισμένα σε IP όσο και σε δίκτυα που δε στηρίζονται στην IP. Ωστόσο, η μεγάλη πλειοψηφία των χρηστών επικεντρώνονται στην ασύρματη/IP προσομοίωση η οποία συμπεριλαμβάνει μοντέλα για το Wi-Fi, WiMAX, LTE των επιπέδων 1 και 2 και μια ποικιλία από πρωτόκολλα στατικής ή δυναμικής δρομολόγησης όπως OLSR και AODV για IP-based εφαρμογές. Ο NS-3, επίσης, υποστηρίζει χρονοπρογραμματισμό πραγματικού χρόνου διευκολύνοντας περιπτώσεις χρήσης στις οποίες υπάρχει αλληλεπίδραση με πραγματικά δίκτυα. Για παράδειγμα, οι χρήστες μπορούν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν πακέτα που δημιουργούνται σε πραγματικές συσκευές δικτύου με τη χρήση του NS-3, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα πλαίσιο διασύνδεσης για την προσθήκη links μεταξύ εικονικών μηχανών.

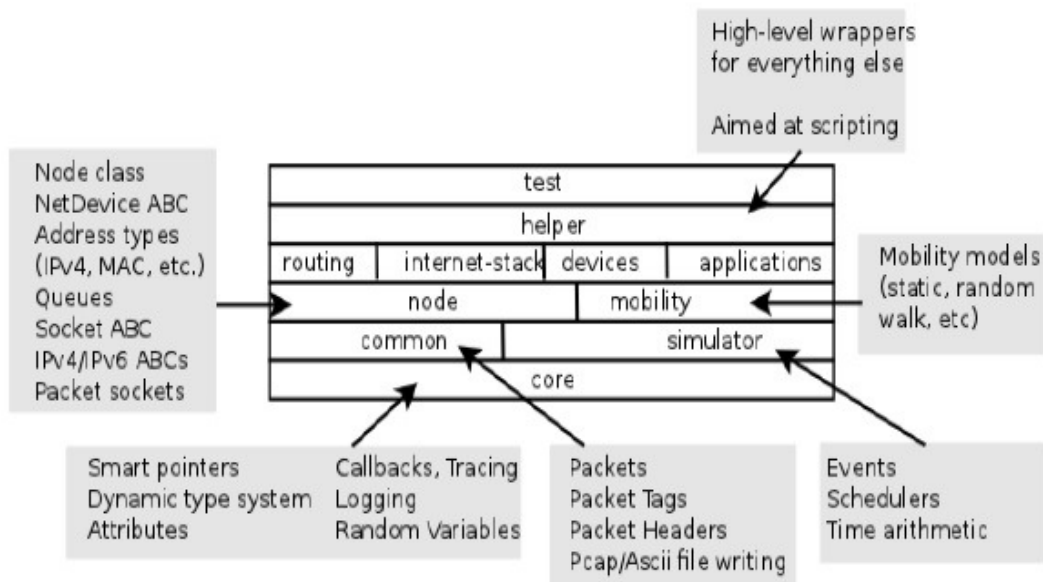
Μια άλλη έμφαση του προσομοιωτή είναι η επαναχρησιμοποίηση των πραγματικών εφαρμογών και του κώδικα του πυρήνα. Τα πλαίσια για την εκτέλεση των μη τροποποιημένων εφαρμογών ή ολόκληρου του πυρήνα των Linux για την δικτύωση εντός του NS-3, προς το παρόν εξετάζονται και αξιολογούνται.

Η δημιουργία ενός προσομοιωτή δικτύου από το μηδέν, απαιτεί μια υψηλής ποιότητας επικύρωσης του λογισμικού του καθώς και αρκετή εργασία για να διατηρηθούν τα μοντέλα του, έτσι ο ns-3 προσπαθεί να μεταφέρει αυτόν τον τεράστιο φόρτο εργασίας σε μια μεγάλη κοινότητα χρηστών και προγραμματιστών καθιστώντας την συμβολή αυτής της κοινότητας ιδιαίτερα μεγάλη για την ανάπτυξη και την εξέλιξη του NS-3.

### 3.3.1 Η Δομή του NS-3

Ο NS-3 προσομοιωτής όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων. Αυτό σημαίνει πως ο χρήστης προκειμένου να φτιάξει ένα πρόγραμμα που θα τρέξει με τη βοήθεια του NS και θα βγάλει τα αποτελέσματα που χρειάζεται πρέπει να δώσει ιδιαίτερη έμφαση στα γεγονότα και κυρίως πώς αυτά εισάγονται στον NS. Επίσης, ο NS-3 είναι

ένας προσομοιωτής ο οποίος είναι εξ ολοκλήρου γραμμένος σε C++, ενώ έχει προαιρετικά κάποιες δομές γραμμένες σε Python. Τα scripts της προσομοίωσης μπορούν και αυτά με την σειρά τους να γραφτούν είτε σε C++ είτε σε Python. Ο προσομοιωτής έχει αναπτυχθεί ως μία βιβλιοθήκη η οποία μπορεί στατικά ή δυναμικά να συνδέεται στο κυρίως πρόγραμμα (όπου είναι γραμμένο στη C++) το οποίο καθορίζει την τοπολογία της προσομοίωσης, την παραγωγή κίνησης πακέτων ενώ ξεκίνα και την προσομοίωση. Ο NS-3, επιπλέον, εξάγει το σύνολο σχεδόν των εφαρμογών σε Python, επιτρέποντας προγράμματα γραμμένα σε Python να εισάγουν κάποιο NS-3 module με τον ίδιο τρόπο που η βιβλιοθήκη του NS-3 συνδέεται με τα εκτελέσιμα στην C++.



**Εικόνα 14 - Οργάνωση Λογισμικού του NS-3**

Ο πηγαίος κώδικας στον NS-3 ως επί το πλείστον είναι οργανωμένος στον φάκελο src και μπορεί να περιγραφεί στη παραπάνω εικόνα 14 η οποία απεικονίζει την οργάνωση του λογισμικού του NS-3. Αρχικά να αναφερθεί πως όλα τα στοιχεία τα οποία είναι κοινά για όλα τα πρωτόκολλα, για οποιοδήποτε υλικό αλλά και περιβάλλον προσομοίωσης υπάρχουν μέσα στον πυρήνα-core του προσομοιωτή ο οποίος υλοποιείται στον φάκελο src/core. Επίσης, όσον αφορά τα πακέτα όπου πρόκειται για θεμελιώδη αντικείμενα υλοποιούνται στον φάκελο src/network. Αυτές οι δύο ενότητες του προσομοιωτή έχουν ως στόχο από μόνες τους να καταρτίσουν έναν

γενικό πυρήνα προσομοίωσης έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διαφορετικά είδη δικτύων, όχι μόνο από τα internet-based δίκτυα.

Εκτός από τον πυρήνα που αναφέραμε προηγουμένως, υπάρχουν επιπλέον δύο μονάδες οι οποίες συμπληρώνουν αυτόν τον πυρήνα. Τα προγράμματα του ns-3 μπορούν να έχουν είτε άμεση πρόσβαση σε όλα τα API είτε να μπορούν να χρησιμοποιούν τον λεγόμενο API helper ο οποίος παρέχει έναν εύκολο χειρισμό του χαμηλού-επιπέδου των APIs. Το γεγονός ότι τα προγράμματα στον NS-3 μπορούν να γραφτούν σε δύο APIs (ή συνδυασμό αυτών) είναι μία θεμελιώδης πτυχή του προσομοιωτή.

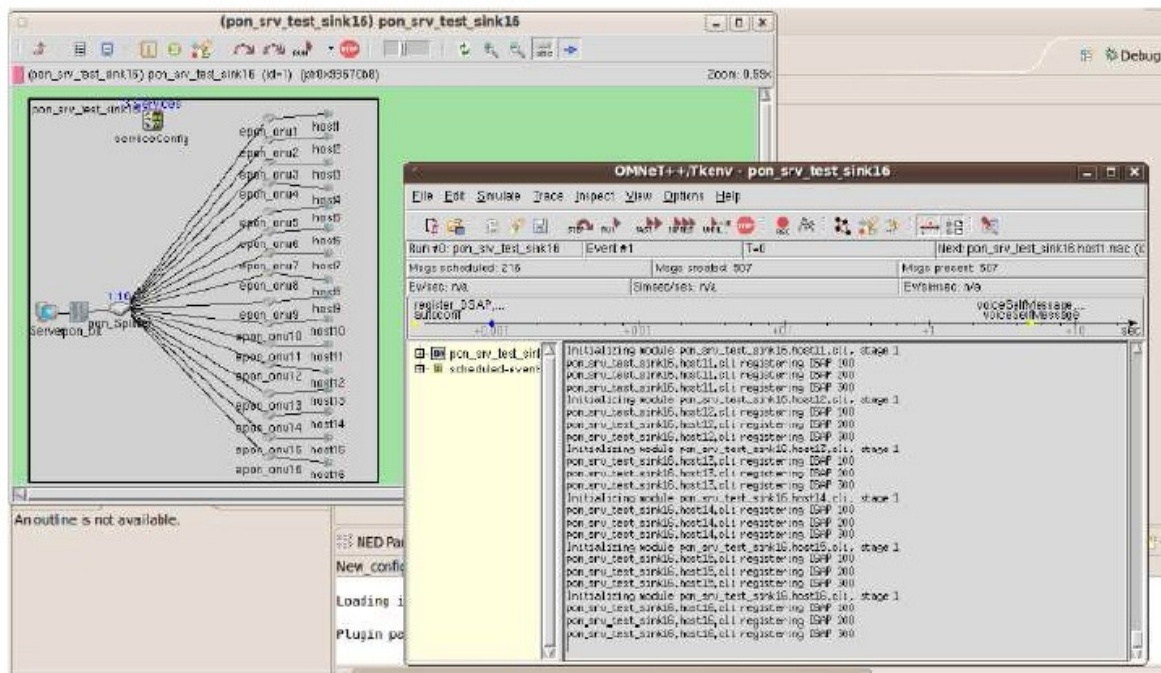
Ουσιαστικά για να μπορέσει κάποιος να χρησιμοποιήσει τον NS-3 θα πρέπει να εργάζεται σε Linux περιβάλλοντα ή σε Linux-like περιβάλλοντα. Ωστόσο για όσους χρησιμοποιούν ως λειτουργικό σύστημα τα Windows υπάρχουν προγράμματα τα οποία προσομοιώνουν το περιβάλλον των Linux σε σημαντικό βαθμό. Για αυτούς λοιπόν τους χρήστες το NS-3 project υποστηρίζει την ανάπτυξη στο περιβάλλον του Cygwin ενώ μία εναλλακτική είναι να εγκατασταθεί ένα virtual machine περιβάλλον, όπως το VMware server και έπειτα να εγκατασταθεί κάποιο Linux virtual machine.

### 3.4 Ο Προσομοιωτής OMNET++

Όπως και το NS-2 έτσι το OMNET++ [6, 8, 16, 17] αποτελεί έναν προσομοιωτή διακριτών συμβάντων. Και εδώ έχουμε χρήση δύο διαφορετικών γλωσσών για υποστήριξη του μοντέλου: την C++ και την γλώσσα NED (Network Description). Τα δομικά στοιχεία του OMNET++ είναι τα λεγόμενα modules τα οποία είναι σε γενικές γραμμές κλάσεις που γράφονται στην C++. Τα modules συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργούν κομμάτι-κομμάτι το μοντέλο που μας ενδιαφέρει με χρήση της NED γλώσσας. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα του OMNET++ είναι ότι διαθέτει ένα IDE περιβάλλον εργασίας το οποίο βασίζεται στο γνωστό Eclipse. Έτσι ο ερευνητής μπορεί να έχει έναν καλύτερο έλεγχο της δουλειάς του γλιτώνοντας και κόπο και χρόνο. Η προσομοίωση μπορεί να τρέξει είτε από γραμμή εντολών είτε από το γραφικό περιβάλλον (από το δεύτερο όχι σε όλες τις περιπτώσεις). Διαθέτει ενσωματωμένες λειτουργίες ανάλυσης των αποτελεσμάτων, κάνοντας την όλη διαδικασία αρκετά απλή.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε πως φαίνεται ένα συνολικό δίκτυο (οπτικό παθητικό δίκτυο - PON στην προκειμένη περίπτωση) στο γραφικό περιβάλλον του OMNET++ και τα διάφορα εργαλεία (μενού, κουμπιά) που έχουμε στη διάθεση μας για να κάνουμε τυχόν προσαρμογές κ.λπ.





Εικόνα 15 - Δίκτυο στο OMNeT++

Το πρόγραμμα OMNeT++ έχει πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα εξής:

- Το OMNeT++ είναι ένα πλούσιο και ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης.
- Το OMNeT++ έχει εξωτερικές επεκτάσεις που του επιτρέπει να παρέχει υποστήριξη για την προσομοίωση των ασύρματων δικτύων. Δύο πιο γνωστές και χρησιμοποιούμενες επεκτάσεις είναι τα INET Framework και Mobility Framework για κινητά ad-hoc δίκτυα.
- Ορισμένα χαρακτηριστικά του προσομοιωτή είναι η μη κατάρτιση μοντέλων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους κατά το χρόνο εκτέλεσης για κόμβους και συνδέσεις, ενσωμάτωση στα σενάρια κίνησης με υποστήριξη για προσαρμοσμένη ανάπτυξη, δημιουργία οποιασδήποτε μορφής ιεραρχικής τοπολογίας χρησιμοποιώντας τη γλώσσα NED και πολλαπλές γεννήτριες ψευδοτυχαίων αριθμών ανοιχτού κώδικα, οι οποίες κάνουν εφικτές τις προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας.
- Μια μελλοντική εξέλιξη είναι ότι τα εκτελέσιμα προγράμματα προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν από τον προσομοιωτή είναι στην πραγματικότητα αυτόνομα προγράμματα τα οποία μπορούν να εκτελεστούν σε άλλα μηχανήματα, χωρίς τους προσομοιωτές.

### 3.5 Επισκόπηση του OMNeT++

Το OMNeT++ είναι ένας αντικειμενοστραφής προσομοιωτής διακεκριμένων γεγονότων (Discrete Event Simulator – DES). Διαθέτει μια «γενική» αρχιτεκτονική έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς όπως:

- ο Μοντελοποίηση ασύρματων και ενσύρματων δικτύων επικοινωνιών,
- ο Μοντελοποίηση πρωτοκόλλων,
- ο Μοντελοποίηση δικτύων ουρών,
- ο Μοντελοποίηση μικροεπεξεργαστών και άλλων συστημάτων hardware.

Γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση οποιουδήποτε συστήματος για το οποίο είναι κατάλληλη η προσέγγιση των διακεκριμένων γεγονότων και το οποίο μπορεί να αντιστοιχηθεί σε οντότητες που επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας μηνύματα.

#### 3.5.1 Modules

Τα δομικά στοιχεία ενός μοντέλου στο OMNeT++ είναι τα modules. Τα modules θα τα χαρακτηρίζαμε ως αυτόνομες μονάδες οι οποίες επικοινωνούν με το πέρασμα μηνυμάτων. Τα ενεργά modules, αυτά δηλαδή που διαθέτουν κάποια λειτουργικότητα και τους αλγορίθμους, θα τα ονομάζουμε simple modules. Το σημαντικότερο που πρέπει να κατανοήσουμε για τα simple modules είναι το γεγονός ότι είναι επαναχρησιμοποιήσιμα και μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους σχηματίζοντας σύνθετες οντότητες – τα compound modules. Το βάθος αυτής της ιεραρχίας δεν έχει όριο. Από αυτήν την οπτική γωνία όλο το τελικό μοντέλο που θα δημιουργήσουμε είναι στην ουσία ένα compound module.

Η δομή του μοντέλου περιγράφεται στην γλώσσα NED η οποία αποτελεί συστατικό μέρος του OMNeT++.

Και τα simple και τα compound modules είναι στιγμιότυπα κάποιου τύπου module που έχει ορίσει ο χρήστης. Αυτά τα module types μπορούν να αποθηκευτούν σε ξεχωριστά αρχεία σχηματίζοντας βιβλιοθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα projects.

#### 3.5.2 Messages, modes, connections

Τα modules επικοινωνούν μεταξύ τους με την ανταλλαγή μηνυμάτων (messages). Σε πραγματικές προσομοιώσεις ένα μήνυμα μπορεί να αναπαριστά π.χ. ένα πλαίσιο ή ένα πακέτο σε δίκτυο υπολογιστών. Ένα μήνυμα μπορεί να περιέχει αφηρημένα δεδομένα και στέλνεται είτε

μέσα από θύρες (gates) και συνδέσεις (connections) είτε κατευθείαν στον προορισμό τους. Όταν ένα μήνυμα στέλνεται από ένα module στον εαυτό του τότε το ονομάζουμε self message.

Οι θύρες (gates) είναι οι διασυνδέσεις εισόδου και εξόδου των modules.

Υπάρχουν τρεις τύποι: input, output και inout. Τα μηνύματα στέλνονται έξω μέσω των output gates και φτάνουν στο module σε μια input gate.

Δύο θύρες συνδέονται μεταξύ τους με μια σύνδεση (connection). Σε μια σύνδεση μπορούν να αντιστοιχηθούν τρεις παράμετροι για την ρεαλιστική μοντελοποίηση ενός δικτύου:

- Propagation delay – Αναπαραγωγή καθυστέρησης, δηλαδή ο χρόνος που καθυστερεί ένα μήνυμα όταν ταξιδεύει διαμέσου της σύνδεσης,
- Bit error rate – καθορίζει την πιθανότητα λάθους στη μετάδοση,
- Data rate – ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, καθορίζεται σε bits/sec.

### 3.5.3 Παράμετροι (Parameters)

Τα modules μπορούν να έχουν παραμέτρους. Θα χαρακτηρίζαμε τις παραμέτρους σαν μια μορφή μεταβλητών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της συμπεριφοράς των simple modules και για την παραμετροποίηση της τοπολογίας του μοντέλου. Μπορούν να πάρουν αριθμητικές, αλφαριθμητικές και Boolean τιμές.

### 3.5.4 Προγραμματίζοντας τους αλγορίθμους

Τα simple modules περιέχουν αλγορίθμους σε συναρτήσεις C++ οι οποίες συνδυάζονται με τις έτοιμες κλάσεις της βιβλιοθήκης προσομοίωσης. Τα αντικείμενα της προσομοίωσης, όπως modules, messages, queues, κ.α. αναπαρίστανται με έτοιμες κλάσεις που έχουν σχεδιαστεί να δουλεύουν μαζί αποτελεσματικά.

### 3.5.5 Δημιουργία και εκτέλεση προσομοίωσης

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πως στο OMNeT++ ένα μοντέλο αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά μέρη – αρχεία:

- Αρχεία NED: περιγράφουν την δομή των modules με τις παραμέτρους, τις θύρες, κ.τ.λ.

- Ορισμοί μηνυμάτων (.msg files). Χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των τύπων των μηνυμάτων και των πεδίων τους. Το OMNeT++ τα μεταφράζει σε κλάσεις C++.
- Πηγαίος κώδικας των simple modules (αρχεία .h/.cc).

Οι γενικές αρχές λειτουργίας του προσομοιωτή είναι οι εξής: Πρώτα τα .msg files μεταφράζονται σε κώδικα C++ και στην συνέχεια όλα τα πηγαία αρχεία μεταγλωττίζονται και συνδέονται με τον πυρήνα προσομοίωσης και την βιβλιοθήκη της διασύνδεσης χρήστη για να σχηματιστεί το εκτελέσιμο αρχείο. Στο τέλος φορτώνονται τα αρχεία .ned και διαβάζεται το αρχείο διαμόρφωσης (.ini). Η προσομοίωση ξεκινά.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης γράφονται σε αρχεία δεδομένων (vector files, scalar files) τα οποία μπορούν να αναλυθούν με τα εργαλεία του OMNeT++ ή με κάποιο άλλο λογισμικό.

### 3.6 JSim

Το JSim [9, 13, 15] είναι ένα Java-based σύστημα προσομοίωσης για κατασκευή πλήθους μαθηματικών μοντέλων και την ανάλυσή τους.

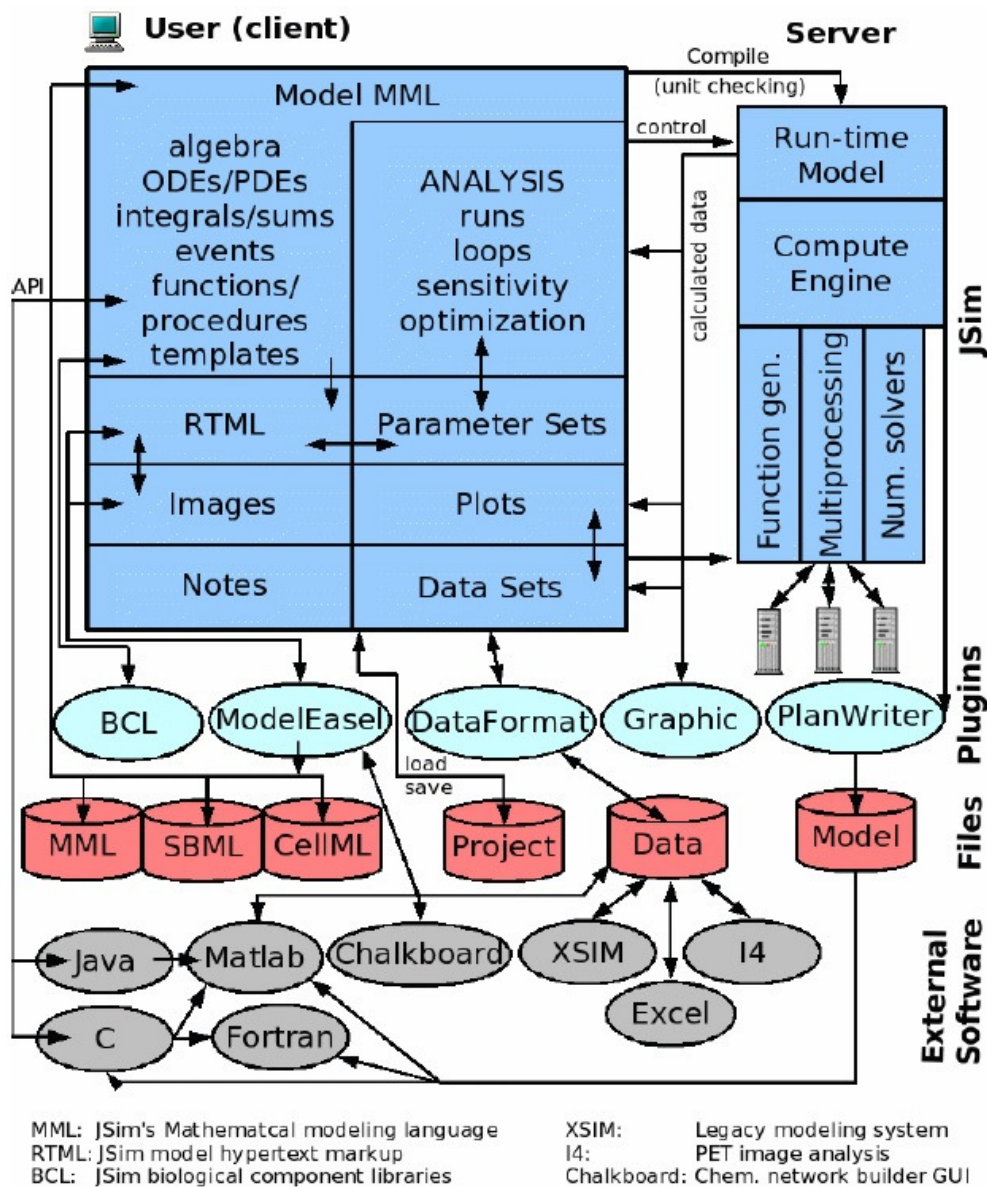
- Τα μοντέλα του JSim αποτελούνται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, γραμμικών εξισώσεων ολοκληρωμάτων, αθροισμάτων, διακριτών καταστάσεων και ακολουθιακού κώδικα τα οποία επιλύει.
- Ο μεταγλωττιστής του JSim μπορεί αυτόματα να εισάγει συντελεστές μετατροπής για τις συμβατικές μονάδες μέτρησης φυσικών μεγεθών καθώς επίσης και να εντοπίσει και να απορρίψει αδόκιμες εξισώσεις μονάδων.
- Η αναπαράσταση των μοντέλων στο JSim γίνεται με μία δικιά του ευανάγνωστη (text-based) γλώσσα που την ονομάζει MML (Mathematical Modeling Language), η οποία αποτελείται κυρίως από μαθηματικά σύμβολα και γενικότερα ότι χρειάζεται για την αναπαράσταση μαθηματικών μοντέλων. Η MML είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε ο χρήστης να μπορεί να αναμιγνύει μαθηματικά, διακριτές καταστάσεις και ακολουθιακό κώδικα όπως τον βολεύει. Το JSim υποστηρίζει πολλαπλά πεδία ορισμού ή ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. χρόνο, χώρο). Οι μεταβλητές στην MML μπορεί να διαφέρουν χρησιμοποιώντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των πεδίων ορισμών που έχουν ορισθεί. Ο μεταγλωττιστής που χρησιμοποιεί η γλώσσα MML κάνει εκτενή έλεγχο για να επιβεβαιώσει ότι ένα μοντέλο δεν έχει ούτε “υπο-ορισθεί” ούτε “υπέρ-ορισθεί” και ότι τα πεδία ορισμού των μεταβλητών συμφωνούν με τη χρήση τους μέσα στο μοντέλο.
- Επίσης υπάρχει η δυνατότητα για περαιτέρω μαθηματικές διατυπώσεις διακριτών γεγονότων με τη χρήση συναρτήσεων γραμμένων σε Java, C, Fortran τις οποίες μπορούμε να καλέσουμε στο μοντέλο μας.

- Το γραφικό του περιβάλλον επιτρέπει στο χρήστη να χειρίζεται παραπάνω από ένα μοντέλα ταυτόχρονα, να μεταβάλλει τις παραμέτρους τους, να τρέχει τα μοντέλα αυτά και να λαμβάνει τα γραφήματα που παράγονται.
- Όσον αφορά τα δεδομένα των μοντέλων αυτά μπορούν να τροφοδοτηθούν με διάφορους τρόπους ακόμη και μετά από την υπερσύνδεσή του με άλλα προγράμματα.
- Τέλος το JSim περιλαμβάνει αρκετά εργαλεία επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, γραμμικών και μη γραμμικών εξισώσεων καθώς και βελτιστοποίηση παραμέτρων.

Επιπλέον χαρακτηριστικά του JSim που μπορούμε να αναφέρουμε είναι τα εξής:

- Η Run Time Markup Language (RTML) που περιέχει και επιτρέπει στον χρήστη να αναπτύξει πιο πολύπλοκα interfaces συνδυάζοντας πολλές σελίδες μοντέλων, διαγραμμάτων και υπερσυνδέσεων.
- Το jsbatch, το οποίο είναι ένα command-line εργαλείο που δίνει πρόσβαση στο χρήστη στην υπολογιστική μηχανή του JSim για επιμέρους επεξεργασία.
- Το jsfim το οποίο είναι ένα εργαλείο για να κατασκευάζει ο χρήστης παραμετρικές εικόνες χρησιμοποιώντας το region-of-interest (ROI) των δεδομένων και της υπολογιστικής μηχανής του JSim.
- Υπάρχει επίσης η δυνατότητα του JSim Remote Server που επιτρέπει τους μαθηματικούς υπολογισμούς να γίνονται σε έναν ισχυρό sever από ότι σε έναν απλό υπολογιστή. Ο server μπορεί να έχει εφαρμογή και στο διαδίκτυο.
- Οι τελευταίες εκδόσεις του JSim υποστηρίζουν πολυεπεξεργασία, δίνοντας την δυνατότητα να χρησιμοποιεί ο χρήστης πολλαπλές μονάδες επεξεργασίας για ταχύτερους υπολογισμούς.

Συνοπτικά η αρχιτεκτονική του JSim μπορεί να παρουσιαστεί με την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 16 - Αρχιτεκτονική του JSIM

Συμπερασματικά λοιπόν το JSIM χρησιμοποιείται κυρίως για να λύνει συστήματα μαθηματικών εξισώσεων. Τα μοντέλα που χρησιμοποιεί είναι μια σειρά διαφορικών εξισώσεων τις οποίες επιλύει. Εμφανίζει έτσι μια αδυναμία στο να αναπαραστήσουμε τα τμήματα όπως εμείς θέλουμε. Από κει και πέρα προσφέρει αρκετές δυνατότητες για παραμετρική ανάλυση και για βελτιστοποίηση των παραμέτρων μας. Το γραφικό περιβάλλον που προσφέρει το κάνει φιλικό προς το χρήστη για αλλαγές των τιμών των παραμέτρων και για απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

### 3.7 GNS3

Το GNS3 (Graphical Network Simulator) [10] είναι ένα ελεύθερο λογισμικό προσομοίωσης πολύπλοκων δικτυακών αρχιτεκτονικών, εξειδικευμένο στο παγκοσμίως γνωστό λειτουργικό σύστημα της Cisco, το Cisco Ios. Στην ουσία το GNS3 αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την εκμάθηση και την δοκιμή σε εργαστηριακό περιβάλλον τόσο του λειτουργικού συστήματος, όσο και του δικτυακού εξοπλισμού της κατασκευάστριας εταιρείας Cisco. Η δυναμικότητα του συγκεκριμένου λογισμικού έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπει την χρήση όλων των εντολών του λειτουργικού συστήματος, καθώς για την εφαρμογή του χρησιμοποιείται το Cisco Ios. Το εν λόγω λογισμικό επιτρέπει την χρήση δικτυακού εξοπλισμού, όπως δρομολογητές, μεταγωγείς, συστήματα ασφάλειας, μεταγωγείς frame relay και ATM. Ακολουθεί σχετική λίστα με τα μοντέλα του κατασκευαστή Cisco που υποστηρίζει: 1710, 1720, 1721, 1750, 1751, 1760, 2610, 2610XM, 2611, 2611XM, 2620, 2620XM, 2621, 2621XM, 2650XM, 2651XM, 2691, 3620, 3640, 3660, 3725, 3745, 7200, 7600, Cisco ASA 5500 και Cisco IPS/IDS. Το Graphical Network Simulator εκτελείται σε λειτουργικά Windows και Linux. Οι δυνατότητες του λογισμικού ως προς την απόδοσή του σε εικονικό περιβάλλον είναι 1000 πακέτα ανά δευτερόλεπτο.

### 3.8 SSFNet

Το SSFNet (Scalable Simulation Framework Network Models) [11] είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης δικτύου χρησιμοποιώντας λογισμικό ανοικτού πηγαίου κώδικα με διάφορες εφαρμογές προσομοίωσης δικτύου. Έχει σχεδιαστεί για την επέκταση του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων της αρχιτεκτονικής, των πρωτοκόλλων, της κίνησης, κ.τ.λ. και είναι σε θέση να υποστηρίξει την προσομοίωση σε μια μεγάλη κλίμακα δικτύου όπως είναι το Internet. Ωστόσο, αυτό δεν είναι εύκολο για ορισμένους χρήστες να εκτελέσουν την προσομοίωση χρησιμοποιώντας το SSFNet επειδή το SSFNet δεν παρέχει στους χρήστες με οποιαδήποτε συμπληρωματικά εργαλεία το σχεδιασμό των στοιχείων του δικτύου και την τοπολογία, και την ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Το δίκτυο μοντελοποίησης και της διαδικασίας ανάλυσης πρέπει να γίνουν με μη αυτόματο τρόπο από τους ίδιους τους χρήστες. Αυτό το γεγονός καθιστά δύσκολη την πραγματοποίηση αξιόπιστης προσομοίωσης δικτύου.

### 3.9 NetSim

Το NetSim (Network Based Environment for Modelling and Simulation) [13] είναι μια ξεχωριστή περίπτωση προσομοιωτή που αναπτύχθηκε από τη Tetcos το έτος 1997, σε συνεργασία με τον Ινδικό Ινστιτούτο επιστήμης. Το NetSim έχει επίσης προβληθεί σε δίκτυα υπολογιστών και στην έκδοση Internets V από τον Δρ. Douglas Comer, που δημοσιεύθηκε από το Prentice Hall. Διαθέτει ένα περιβάλλον object-oriented σύστημα μοντελοποίησης και προσομοίωσης (M&S) για να υποστηρίξει την προσομοίωση και την ανάλυση φωνητικής επικοινωνίας δεδομένων και σενάρια για την High Frequency Global Communication Systems (HFGCS).

Πρόκειται για μια εφαρμογή που προσομοιώνει το Cisco Systems υλικού και λογισμικού και είναι σχεδιασμένο για να βοηθήσει τον χρήστη στην εκμάθηση της Cisco εντολής IOS.

### 3.10 REAL

Το REAL [13] είναι ένας προσομοιωτής για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της ροής και τον έλεγχο συμφόρησης σε συστήματα σε δίκτυο μεταγωγής πακέτων δεδομένων. Παρέχει τους χρήστες έναν τρόπο προσδιορισμού τέτοιων δικτύων και για να παρατηρούν τη συμπεριφορά τους. Το REAL μπορεί να τροποποιηθεί για να αναλύσει τις τροποποιήσεις σε αυτά τα πρωτόκολλα ή τα εναλλακτικά πρωτόκολλα.

### 3.11 NCTUns

Το NCTUns (National Chiao Tung University network simulator) [14, 16] είναι ένα υψηλής πιστότητας και επεκτάσιμο πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων που μπορεί να προσομοιώσει διάφορα πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούνται σε ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα. Η τεχνολογία πυρήνα που βασίζεται στη μέθοδο επανατοποθέτησης πυρήνα (Kernel-reentering), η οποία αναπτύχθηκε από τον καθηγητή S. Y. Wang.

Λόγω της μεθοδολογίας του, το NCTUns παρέχει μοναδικά πλεονεκτήματα τα οποία δεν μπορούν εύκολα να επιτευχθούν από τους παραδοσιακούς προσομοιωτές δικτύων όπως το NS-2 και OPNET.

Το πρόγραμμα NCTUns έχει πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα εξής:



- Υψηλής πιστότητας αποτελέσματα προσομοίωσης
- Επαναχρησιμοποίηση πραγματικών εφαρμογών
- Ίδια διαμόρφωση και λειτουργία με τα πραγματικά δίκτυα
- Ομοιογενής αναβάθμιση εξομοίωσης και προσομοίωσης
- Υψηλών ταχυτήτων προσομοιώσεις και δυνατότητα επανάληψης αποτελεσμάτων προσομοίωσης
- Υποστήριξη διαφόρων σημαντικών ειδών δικτύων
- Υποστήριξη διαφόρων δικτυακών συσκευών
- Υποστήριξη διαφόρων δικτυακών πρωτοκόλλων
- Υψηλά ολοκληρωμένο και επαγγελματικό γραφικό (GUI) περιβάλλον
- Υποστήριξη δημοφιλών λειτουργικών συστημάτων
- Αρχιτεκτονική ανοιχτού κώδικα
- Κατανεμημένη αρχιτεκτονική για απομακρυσμένες και ταυτόχρονες προσομοιώσεις

### 3.12 GloMoSim

Το GloMoSim [16] είναι ένα κλιμακώσιμο (scalable) περιβάλλον προσομοίωσης για ασύρματα και ενσύρματα δίκτυα, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά στο Computing Laboratory του UCLA. Σχεδιάστηκε με την χρήση των δυνατοτήτων παράλληλης διακριτών-γεγονότων προσομοίωσης που παρέχει μια βασιζόμενη στην C γλώσσα παράλληλης προσομοίωσης, η Parsec. Το GloMoSim μέχρι σήμερα διαθέτει την δυνατότητα προσομοίωσης μόνο καθαρά ασύρματων δικτύων. Η κατασκευή του βασίζεται στην ύπαρξη πολλών επιπέδων και παρέχει API για την επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων, κάτι το οποίο επιτρέπει την ταχεία ενσωμάτωση πρωτοκόλλων για διαφορετικά επίπεδα. Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του δικτύου, ο χρήστης χρησιμοποιεί δύο αρχεία κειμένου, τα `app.conf` και `Config.in`, το πρώτο από τα οποία περιέχει την περιγραφή της κίνησης που πρέπει να δημιουργηθεί (είδος εφαρμογής, ρυθμός κτλ.) και το δεύτερο περιέχει τον καθορισμό των υπόλοιπων παραμέτρων. Το βασικό πρόβλημα του GloMoSim είναι ότι η αρχιτεκτονική του είναι ιδιαίτερα άκαμπτη, με αποτέλεσμα η ενσωμάτωση κάποιων πρωτοκόλλων που «ξεφεύγουν» από το OSI να είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

Το πρόγραμμα GloMoSim έχει πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα εξής:

- Το GloMoSim επιτρέπει την επεκτασιμότητα προσομοίωσης για προσομοίωση δικτύων με εκατοντάδες και χιλιάδες κόμβους
- Το GloMosim υποστηρίζει το πρωτόκολλο για το ασύρματο δίκτυο
- Το GloMoSim παρέχει το μοντέλο κινητικότητας Random Waypoint, το οποίο μπορεί να μην είναι κατάλληλο για όλους τους τύπους προσομοιώσεων
- Το λογισμικό BonnMotion παρέχει μια γεννήτρια για άλλα είδη μοντέλων κινητικότητας

- ο Το GloMoSim έχει σχεδιαστεί για να είναι επεκτάσιμο, με όλα τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται ως μονάδες στην GloMoSim βιβλιοθήκη

## Κεφάλαιο 4 : Συγκριτική Μελέτη Λογισμικών Προσομοίωσης Δικτύων

### 4.1 Σύγκριση μεταξύ NS-2, NS-3, OMNET++ και JSIM

| Όνομα του προσομοιωτή | Γλώσσα Προγραμματισμού | Πλατφόρμα                                    | Κόστος & Άδειες                             | Δίκτυο Υποστήριξης  | Διασύνδεση του χρήστη          | API   |
|-----------------------|------------------------|--|---|---|--------------------------------|---|
| NS-2                  | C++,<br>OtcI           | Windows,<br>Linux                            | Δωρεάν,<br>Ανοιχτού κώδικα                  | Ενσύρματο δίκτυο,<br>Ασύρματη λειτουργία Ad-Hoc,<br>Ασύρματη διαχείριση λειτουργίας,<br>Ενσύρματη Ασύρματη σύνδεση,<br>Δεν μπορεί να προσομοιώσει τα προβλήματα του εύρους ζώνης ή την κατανάλωση ενέργειας σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων | Διασύνδεση γραμμής εντολών     | Καθαρή εκδήλωση βάσης   |
| NS-3                  | C++,<br>Python         | Windows,<br>Linux,<br>Mac OS                 | Δωρεάν,<br>GNU Γενική άδεια δημόσιας χρήσης | Ενσύρματο δίκτυο,<br>Ασύρματο δίκτυο,<br>Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων   | Διασύνδεση γραμμής εντολών     | Χαμηλό επίπεδο,<br>Οι χρήστες μπορεί να συνδυάσουν μεταξύ τους ένα απλούστερο API |
| OMNET++               | C++                    | Windows,<br>Unix-Based,<br>Mac OS X 10.6 και | Δωρεάν,<br>Μη Εμπορική άδεια,<br>Εμπορική   | Ενσύρματο δίκτυο,<br>Ασύρματη διαχείριση λειτουργίας  | Γραφικά διασύνδεσης του χρήστη | Εκδήλωση βάσης  |

|      |              |                                       |                               |   |   |   |
|------|--------------|---------------------------------------|-------------------------------|---|---|---|
|      |              | 10.7                                  | άδεια                         |   |   |   |
| JSIM | Java,<br>Tcl | Πραγματικά<br>ανεξάρτητη<br>πλατφόρμα | Δωρεάν,<br>Ανοιχτού<br>κώδικα | Ενσύρματο δίκτυο,<br>Ασύρματο δίκτυο,<br>Ασύρματο δίκτυο<br>αισθητήρων,<br>Radio channel και<br>κατανάλωση<br>ενέργειας | GUI,<br>Διασύνδεση<br>γραμμής<br>εντολών στο<br>Linux | Καθοδήγηση<br>της<br>διαδικασίας<br>συμπεριλαμβανομένων<br>σε<br>θέματα<br>συγχρονισμού |

#### 4.2 Σύγκριση μεταξύ NS-2, NS-3

- Διαφορετικά λογισμικά του πυρήνα [15] : ο πυρήνας του NS3 είναι γραμμένος σε C++ και σε Python scripting interface (σε σύγκριση με OTcl στο NS2). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αρκετά προηγμένα μοτίβα σχεδίασης C++.
- Προσοχή στο ρεαλισμό: οι οντότητες των πρωτοκόλλων είναι σχεδιασμένες για να είναι πιο κοντά στους πραγματικούς υπολογιστές.
- Ενσωμάτωση λογισμικού: υποστηρίζει την ενσωμάτωση του λογισμικού δικτύωσης ανοιχτού κώδικα και μειώνει την ανάγκη για επανεγγραφή των μοντέλων για την προσομοίωση.
- Υποστήριξη για εικονική διαμόρφωση: χρησιμοποιούνται ελαφριές εικονικές μηχανές.
- Εντοπισμός αρχιτεκτονικής: το NS3 αναπτύσσει μια ανίχνευση και συλλέγει στατιστικά στοιχεία που προσπαθεί να επιτρέψει την προσαρμογή στις ανάγκες της παραγωγής χωρίς την ανοικοδόμηση του πυρήνα της προσομοίωσης.

#### 4.3 NS-2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

##### Πλεονεκτήματα

- Το NS-2 [16] έχει μεγάλο αριθμό διαθέσιμων μοντέλων, ρεαλιστικά μοντέλα κινητικότητας, ισχυρό και ευέλικτο scripting και την εγκατάσταση της προσομοίωσης, μεγάλη κοινότητα χρηστών και συνεχή ανάπτυξη.
- Το NS-2 διαθέτει ένα ενεργειακό μοντέλο και επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει κίνηση και τρόπους μετακίνησης.
- Παρέχει ένα σύνολο από τυχαία μοντέλα κινητικότητας και υπάρχουν πολλά σχέδια για να φέρει προηγμένα μοντέλα κινητικότητας στους προσομοιωτές.

##### Μειονεκτήματα

- Το NS-2 πρέπει κάθε φορά να κάνει μεταγλώττιση εάν υπάρχει μια αλλαγή στον κωδικό του χρήστη.
- Δεν είναι τόσο καλά δομημένη η αρχιτεκτονική λογισμικού και το μίγμα της κατάρτισης και της ερμηνείας, κατέστησε δύσκολο να αναλύσει και να κατανοήσει τον κώδικα.
- Η λειτουργία της προσομοίωσης είναι πολύ αργή, ιδίως όταν το δίκτυο προσομοίωσης περιέχει πολλούς κόμβους.

#### 4.4 OMNeT++ Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

##### Πλεονεκτήματα

- Το OMNeT++ [16] παρέχει ένα ισχυρό γραφικό περιβάλλον. Το GUI διευκολύνει την ανίχνευση και τον εντοπισμό των σφαλμάτων πολύ πιο εύκολα από ό, τι με τη χρήση άλλων προσομοιωτών.
- Το OMNeT++ μοντελοποιεί με ακρίβεια τα περισσότερα μοντέλα hardware και περιλαμβάνει την μοντελοποίηση των φυσικών φαινομένων.

##### Μειονεκτήματα

- Δεν προσφέρει μεγάλη ποικιλία πρωτοκόλλων και πολύ λίγα έχουν εφαρμοστεί, αφήνοντας τους χρήστες με σημαντική προεργασία, εάν θέλουν να δοκιμάσουν το δικό τους πρωτόκολλο σε διαφορετικά περιβάλλοντα.
- Ανεπαρκής τεκμηρίωση και κακή ανάλυση των τυπικών μέτρων απόδοσης.
- Η επέκταση της κινητικότητας του προσομοιωτή είναι αρκετά ελλιπής.

#### 4.5 NCTUns Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

##### Πλεονεκτήματα

- Παρέχει [16] εύκολα τη χρήση του περιβάλλοντος GUI.
- Η διανομή και η αρχιτεκτονική ανοικτού συστήματος υποστηρίζει απομακρυσμένες και ταυτόχρονες προσομοιώσεις και επιτρέπει σε νέα μοντέλα πρωτοκόλλων να προστεθούν εύκολα στη μηχανή προσομοίωσής του.
- Το NCTUns παρέχει καλύτερη λειτουργικότητα και απόδοση.

##### Μειονεκτήματα

- Η σύνδεση μέσω του αποστολέα με το διακομιστή προσομοίωσης δεν είναι σταθερή. Πράγματι, ο συντονιστής γίνεται συχνά πολύ απασχολημένος. Στην περίπτωση αυτή, κοινοποιεί κατάσταση στον αποστολέα, το οποίο δεν θα είναι σε θέση να επιλέξει το κατάλληλο μηχάνημα προσομοίωσης. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να αρχίσει και πάλι ο συντονιστής, του αποστολέα και του πελάτη.
- Ο προγραμματισμός δεν υποστηρίζεται από το NCTUns. Έτσι, οι παράμετροι προσομοίωσης καθορίζονται μόνο από τα γραφικά διασύνδεσης του χρήστη.
- Ο χειρισμός σε κάθε κόμβο πρέπει να γίνεται από κόμβο σε κόμβο, ή από όλους τους κόμβους την ίδια στιγμή.

## 4.6 GloMoSim Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

### Πλεονεκτήματα

- Επίτευξη της μεγάλης επεκτασιμότητας [16], καλή κινητικότητα των μοντέλων («τυχαία κατανομή του μοντέλου»), καθορίζεται για ασύρματη προσομοίωση, υποστηρίζει πολλά πρωτόκολλα ad hoc και ανάλυσης και εργαλεία οπτικοποίησης, επαρκής για γενικές μελέτες.
- Η ικανότητα να χρησιμοποιείται το GloMoSim σε ένα παράλληλο περιβάλλον διακρίνεται από τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα προσομοιωτών.

### Μειονεκτήματα

- Η τεκμηρίωση είναι πολύ κακή. Δεν υπάρχουν ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για το δίκτυο αισθητήρων, δεν υπάρχουν μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης. Εξακολουθεί να έχει στρώμα μεταφοράς και υποστήριξη της διεύθυνσης IP.
- Είναι δύσκολο για το χρήστη να προσομοιώσει μεγάλα δίκτυα αισθητήρων, δεδομένου ότι δεν υπάρχει το περιβάλλον hardware.
- Το κύριο μειονέκτημα του GloMoSim είναι ότι η ενημέρωση αυτού του προσομοιωτή δεν είναι κανονική.

## Συμπεράσματα

Σε αυτή την διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται η γενική επισκόπηση των ανοιχτού κώδικα προσομοιωτών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μια εισαγωγή ορισμένων βασικών εννοιών των open source τεχνολογιών. Παρουσιάσαμε τα λογισμικά προσομοίωσης και αναλύσαμε και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα για καθένα από αυτά. Από την διπλωματική εργασία μπορούμε να συμπεράνουμε το μελλοντικό πεδίο εφαρμογής των λογισμικών ανοιχτού κώδικα και ειδικότερα αυτών για την προσομοίωση δικτύων ειδικότερα στον ακαδημαϊκό χώρο, στις βιομηχανίες, σε νέους ερευνητές και φοιτητές, καθώς είναι διαθέσιμα και εύκολα στην εκμάθηση τους για τους χρήστες. Ένας προσομοιωτής δικτύου είναι μια τεχνική για την επισκόπηση και την μελέτη ενός δικτύου στον υπολογιστή. Μέσω της συμπεριφοράς του δικτύου υπολογίζεται με τη χρήση μαθηματικών τύπων η λειτουργικότητα του δικτύου. Η προσομοίωση των δικτύων επιτρέπει στους ερευνητές να δοκιμάσουν σενάρια που είναι πολύ δύσκολα ή πολύ δαπανηρά για να πραγματοποιηθούν στο πραγματικό κόσμο. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη δοκιμή νέων πρωτοκόλλων δικτύωσης ή για την βελτίωση υπαρχόντων πρωτόκολλων σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Κάποιος μπορεί να σχεδιάσει διάφορες τοπολογίες δικτύου χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους κόμβων (hosts, hubs, γέφυρες, δρομολογητές και κινητές μονάδες, κλπ). Οι προσομοιωτές δικτύων είναι διαφόρων τύπων σε σύγκριση με την πολυπλοκότητα, από το πολύ απλό σε πολύ περίπλοκο, στον καθορισμό των κόμβων και των συνδέσεων μεταξύ τους, στο καθορισμό λεπτομερειών σχετικά με τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για να χειριστούν την κυκλοφορία σε ένα δίκτυο και στις εφαρμογές γραφικών, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να απεικονίζουν εύκολα τις δοκιμές του προσομοιωμένου περιβάλλοντος. Εισαγάγαμε 9 διαφορετικά λογισμικά ανοιχτού κώδικα εξετάζοντας την τρέχουσα λειτουργία, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα, τις προκλήσεις και το μελλοντικό πεδίο εφαρμογής όλων των προσομοιωτών. Υπάρχουν διαφορετικοί προσομοιωτές δικτύου με διαφορετικά χαρακτηριστικά οι οποίοι παρουσιάστηκαν παραπάνω όπως το OPNET, NS2, NS3, NetSim, OMNeT ++, J-Sim κ.α. Για τους προσομοιωτές δικτύου που περιγράφηκαν έγινε συγκριτική μελέτη.

## Μελλοντική Έρευνα

Μελλοντική κατεύθυνση για την προσομοίωση δικτύων αποτελεί για τους ερευνητές και τους προγραμματιστές η δημιουργία λογισμικών προσομοίωσης που να προσφέρουν ευελιξία στην κατασκευή του μοντέλου και την επικύρωση του. Ένας καλός προσομοιωτής περιλαμβάνει κατάλληλη ανάλυση των δεδομένων εξόδου της προσομοίωσης, αξιόπιστες γεννήτριες ψευδο-τυχαίων αριθμών και στατιστική ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Επίσης οποιαδήποτε προσπάθεια προσομοίωσης πρέπει να εξασφαλίσει ότι το μοντέλο είναι αξιόπιστο και αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα. Αν αυτό δεν μπορεί να είναι εγγυημένο, το μοντέλο δεν έχει καμία πραγματική αξία και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση του δικτύου και μοντελοποίηση. Ως εκ τούτου, εκτός από την επιλογή ενός καλού προσομοιωτή για τα καθήκοντα προσομοίωσης του δικτύου, είναι επίσης σημαντική η εγκυρότητα και η αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης που έχει πολύπλευρο ερευνητικό ενδιαφέρον και ενδιαφέρουσα μελλοντική έρευνα. Η προσομοίωση, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, θα πρέπει να εξεταστεί και επικυρωθεί. Εκτός από την ανάλυση του μοντέλου εισόδου και η έξοδος πρέπει να επικυρώνεται. Αυτό είναι το πιο κρίσιμο κομμάτι της επικύρωσης ενός μοντέλου. Σε περιπτώσεις ανάπτυξης ενός συστήματος, γίνονται δοκιμές εγκυρότητας και στατιστικές συγκρίσεις. Τα δεδομένα που συλλέγονται από την πραγματική λειτουργία του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς για το μοντέλο. Στατιστικές προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του αριθμού της προσομοίωσης και για την ανάλυση της προσομοίωσης. Το τελικό αποτέλεσμα σε μια μελέτη προσομοίωσης πρέπει επίσης να εξεταστεί στο πλαίσιο της μοντελοποίησης μέσω της απόδοσης των κατά προσέγγιση αποτελεσμάτων.

Η μελλοντική εργασία σχετικά με τα εργαλεία προσομοίωσης δικτύων μπορεί να κατευθυνθεί σε τρεις περιοχές. Πρώτον, στην ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με τους σύγχρονους προσομοιωτές δικτύου και την κατηγοριοποίηση αυτών με βάση τις επιδόσεις τους. Αυτό απαιτεί μια ενδελεχή αξιολόγηση και πειραματισμό σε καθένα από τους προσομοιωτές με βάση κάποια λεπτομερή κριτήρια. Τα ευρήματα από αυτή την μελέτη θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τους οργανισμούς και βιομηχανίες, επιλέγοντας τον κατάλληλο προσομοιωτή για τις ανάγκες τους. Δεύτερον, μια μελλοντική έρευνα είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της μεθοδολογίας στην προσομοίωση δικτύων. Αυτό απαιτεί μια σε βάθος έρευνα επειδή η τρέχουσα έρευνα για τις μεθοδολογίες στην προσομοίωση δικτύων δεν είναι επαρκής. Δεδομένα που συλλέγονται από τη βιομηχανία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση σχετικά με το πώς οι προσομοιώσεις διεξάγονται στο πραγματικό περιβάλλον. Τρίτον, μπορεί να διεξαχθεί μελέτη για την αξία των επιχειρήσεων και την πρακτικότητα της λειτουργίας των προσομοιωτών δικτύων.

## **Βιβλιογραφία**

### **Βιβλία**

1. Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ., "Τηλεπικοινωνίες και δίκτυα υπολογιστών"
2. Ε. Καρατζά, "Μοντελοποίηση και Προσομοίωση", Τμήμα Πληροφορικής Α.Π.Θ.
3. Μάνος Ρουμελιώτης, Σταύρος Ι. Σουραβλάς, "Τεχνικές Προσομοίωσης"
4. Ε. Καρατζά, "Απόδοση Υπολογιστικών Συστημάτων"
5. N. Sundararajan and P. Saratchandran, OPNET Tutorial SYSC 4005/5001 Simulation and Modeling
6. Andras Varga, "OMNeT++ Manual"

### **Websites**

7. NS-3 network simulator, <http://www.nsnam.org/>
8. <http://www.omnetpp.org/>
9. <http://nsr.bioeng.washington.edu/jsim/>
10. <http://www.csd.uoc.gr/~hy435/material/GNS3-0.5-tutorial.pdf>
11. <http://www.ssfnet.org/homePage.html>

### **Papers**

12. S. Nikolettseas, I. Chatzigiannakis, H. Euthimiou, A. Kinalis, T. Antoniou and G. Mylonas, Energy efficient protocols for sensing multiple events in smart dust networks, in 37th Annual ACM/IEEE Simulation Symposium (ANSS 2004)
13. Mrs. Saba Siraj, Mr. Ajay Kumar Gupta, Mrs Rinku-Badgular, Network Simulation Tools Survey, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 1, Issue 4, June 2012
14. Prof. Shie-Yuan Wang Chih-Liang Chou, Chih-Che Lin, and Chih-Hua Huang. The Protocol Developer Manual for the NCTUns 6.0 Network Simulator and Emulator
15. Suraj G. Gupta, Mangesh M. Ghonge, Parag D. Thakare, Dr. P. M. Jawandhiya, Open-Source Network Simulation Tools: An Overview, International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 2, Issue 4, April 2013



16. Sujata V. Mallapur, Siddarama R. Patil, Survey on Simulation Tools for Mobile Ad-Hoc Networks, IRACST - International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC), ISSN: 2250-3501 Vol.2, No.2, April 2012
17. Jianli Pan, A Survey of Network Simulation Tools: Current Status and Future Developments, A Survey of Network Simulation Tools: Current Status and Future Development