

# Δρομολόγηση και Κατανομή Μήκους Κύματος σε Δίκτυα Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος

Θωμάς Χ. Κούτσικος



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στα  
Πληροφοριακά Συστήματα  
Πανεπιστήμιο Μακεδονίας  
Κοινωνικών και Οικονομικών Επιστημών  
Ιανουάριος 2001

**Υποβλήθηκε στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών  
Σπουδών ως Πτυχιακή Εργασία για την απόκτηση Μεταπτυχιακού  
Διπλώματος Ειδίκευσης**

**στα Πληροφοριακά Συστήματα**

**Επιβλέπων .....**  
**Αναστάσιος Α. Οικονομίδης, Επίκουρος Καθηγητής**

**Βαθμολογητής .....**  
**Ανδρέας Κ. Γεωργίου, Επίκουρος Καθηγητής**

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει θέματα δρομολόγησης και κατανομής μήκους κύματος σε δρομολογούμενα αμιγώς οπτικά δίκτυα Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος (ΠΔΜΚ).

Τα τελευταία χρόνια οι οπτικές ίνες έφεραν επανάσταση στις τηλεπικοινωνίες και πολύ έρευνα έχει αφιερωθεί στην αξιοποίηση μεγαλύτερου μέρους του θεωρητικού των 50-THz μίας μονότροπης οπτικής ίνας. Η διαίρεση του εύρους ζώνης σε μη επικαλυπτόμενα μήκη κύματος που επιτυγχάνεται, ώστε κάθε ένα από αυτά να είναι της τάξεως αρκετών Gbps, τα καθιστά τα πιο υποσχόμενα ως προς την βελτίωση του ποσοστού εκμετάλλευσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε μελλοντικά οπτικά δίκτυα. Η έρευνα, η ανάπτυξη και η εφαρμογή της τεχνολογίας Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος (*Wavelength Division Multiplexing*) γίνονται, σήμερα, με ρυθμούς τέτοιους ώστε να ικανοποιηθούν οι όλο και πιο πολύ αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης καθώς και οι ανάγκες εγκατάστασης νέων δικτυακών υπηρεσιών.

Στην εργασία που ακολουθεί παρουσιάζονται και αξιολογούνται, μέσω προσομοίωσης, τρεις αλγόριθμοι δρομολόγησης και δύο αλγόριθμοι κατανομής οπτικού μήκους κύματος που προτάθηκαν από ερευνητές. Οι παραπάνω αλγόριθμοι δοκιμάζονται στο Ευρωπαϊκό δίκτυο TEN – 155 καθώς και σε προτεινόμενη παραλλαγή του.

# Περιεχόμενα

<b>Εισαγωγή</b>	7
<b>1 Τεχνολογίες Οπτικών Δικτύων</b>	9
1.1 Οπτικές Ύφες και Δίκτυα Διαίρεσης Μήκους Κύματος	9
1.2 Lasers	11
1.3 Οπτικοί Δέκτες ( <i>Filters</i> )	12
1.4 Οπτικοί Ενισχυτές	13
1.5 Οπτικοί Δρομολογητές	13
1.5.1 Μη Επαναπροσδιοριζόμενοι WRS ( <i>Non-Reconfigurable</i> )	14
1.5.2 Επαναπροσδιοριζόμενοι Οπτικοί Δρομολογητές WRS ( <i>Reconfigurable</i> )	15
1.6 Οπτικός Μεταγωγέας Εναλλακτών Μήκους Κύματος	16
<b>2 Αρχές Λειτουργίας και Σχεδίασης Οπτικών Δικτύων ΠΔΜΚ</b>	18
2.1 Broadcast-and-Select Οπτικά Δίκτυα Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος	18
2.2 Οπτικά Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος ( <i>Wavelength-Routed Optical Networks (WRONs)</i> )	20
2.3 Single-Hop Δίκτυα ΠΔΜΚ Δρομολόγησης Μήκους Κύματος	23
2.3.1 Απαιτούμενα Μήκη Κύματος	23
2.3.2 Αποκατάσταση Οπτικής Διαδρομής ( <i>Optical Path Restoration</i> )	24
2.3.3 Λειτουργία των OCX και Μετατροπή του Οπτικού Μήκους Κύματος	25
2.3.4 Εκπομπή Διαιρούμενου Μήκους Κύματος στα Οπτικά Δίκτυα Δρομολόγησης	30
2.4 Τοπολογίες Οπτικών Δικτύων	31
2.4.1 Ιδεατές και Φυσικές Τοπολογίες	31
2.4.2 Τοπολογίες Κοινού Διαύλου, Δακτυλίου και Αστέρα	33
2.4.3 ShuffleNet	33
2.4.4 Γράφημα de Bruijn	34
2.4.5 GEMNet	35
2.4.6 Manhattan Street Network ή Torus Δύο Διαστάσεων	36
2.4.7 Υπερκύβος (Hypercube)	37

<b>3 Υπόβαθρο Δρομολόγησης και Κατανομής Οπτικού Μήκους Κύματος</b>	39
3.1 Δίκτυα Δρομολόγησης Οπτικού Μήκους Κύματος	39
3.2 Αλγόριθμοι Δρομολόγησης	41
3.3 Αλγόριθμοι Κατανομής Οπτικού Μήκους Κύματος	42
3.3.1 Απλής Οπτικής Ύψας	42
3.3.2 Πολλαπλών Οπτικών Ύψων	44
<b>4 Οι Αλγόριθμοι και τα Δίκτυα</b>	46
4.1 Αλγόριθμος της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (LLR)	48
4.2 Αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής και της Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής	50
4.3 Αρχιτεκτονική των Δικτύων	53
4.3.1 Το Ευρωπαϊκό Δίκτυο TEN-155	55
4.3.2 Η Δεύτερη Εκδοχή του Δικτύου TEN-155	58
<b>5 Μοντέλο Προσομοίωσης</b>	60
5.1 Μεγέθη της Προσομοίωσης	60
5.2 Υποθέσεις και Περιορισμοί που Ισχύουν	61
5.3 Προετοιμασία της Προσομοίωσης και Παράμετροι	62
5.4 Ο Προσομοιωτής	63
5.4.1 Σχεδίαση του Προσομοιωτή	63
5.4.2 Η διαδικασία της Προσομοίωσης	64
5.4.3 Λειτουργία του Προσομοιωτή	67
<b>6 Συμπεράσματα και Συζήτηση</b>	70
6.1 Γραφήματα Αποτελεσμάτων	74
 <i>Βιβλιογραφία</i>	 83

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**

# Κατάλογος Πινάκων, Σχημάτων και Γραφημάτων

## Πίνακες

- |  |    |
|--|----|
| 1. Laser με δυνατότητα συντονισμού, εύρος και ταχύτητα συντονισμού   | 12 |
| 2. Σειρά κατάταξης των αλγορίθμων σύμφωνα με την μικρότερη πιθανότητα αποκλεισμού για τα δύο δίκτυα (TEN-155, τροποποιημένο TEN-155) | 71 |

## Σχήματα

- |  |    |
|--|----|
| 1.1 Οι τρεις γενιές δικτύων  | 7  |
| 1.2 Οπτικές ίνες   | 9  |
| 1.3 Εκπομπή δέσμης φωτός διαμέσου οπτικής ίνας   | 10 |
| 1.4 Περιοχή χαμηλής απώλειας μονότροπων οπτικών ινών   | 10 |
| 1.5 Σχηματικό διάγραμμα ενός WGR   | 14 |
| 1.6 4 X 4 Μη επαναπροσδιοριζόμενος οπτικός δρομολογητής WRS                                      | 15 |
| 1.7 P x P Επαναπροσδιοριζόμενος οπτικός δρομολογητής WRS   | 16 |
| 1.8 Οπτικός μεταγωγέας με αποκλειστικούς εναλλάκτες μήκους κύματος (WC)                          | 17 |
| 1.9 Οπτικός μεταγωγέας με κοινούς ανά σύνδεση ( <i>per-link</i> ) εναλλάκτες μήκους κύματος (WC) | 17 |
| 1.10 Οπτικός μεταγωγέας με κοινούς ανά κόμβο ( <i>per-node</i> ) εναλλάκτες (WC) μήκους κύματος  | 17 |
| 2.1 Οπτικό δίκτυο ΔΜΚ <i>Broadcast-and-Select</i> (BSON)   | 19 |
| 2.2 Οπτικό δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος  | 21 |
| 2.3 Ιεραρχικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο  | 22 |
| 2.4 Προκαθορισμένος Δρομολογητής ( <i>fixed WRN</i> )  | 26 |
| 2.5 Παράδειγμα Προκαθορισμένης Δρομολόγησης  | 26 |
| 2.6 Επαναπροσδιοριζόμενος Οπτικός Δρομολογητής WSXC  | 28 |
| 2.7 Επαναπροσδιοριζόμενος Οπτικός Δρομολογητής WIXC  | 28 |
| 2.8 Αρχιτεκτονική WSXC   | 29 |
| 2.9 Αρχιτεκτονική WIXC   | 29 |
| 2.10 Φυσικό και ιδεατό επίπεδο οπτικού δικτύου δρομολόγησης μήκους κύματος                       | 32 |
| 2.11 Δίκτυο <i>ShuffleNet</i> 8 κόμβων ( $p=2, k=2$ )  | 34 |
| 2.12 Γράφημα de Bruijn   | 35 |

2.13	Δίκτυο GEMNet	36
2.14	α) Manhattan Street (2-D Torus) δίκτυο 16 κόμβων (4 x 4) β) Τριών διαστάσεων 3 x 3 x 3 Torus.	37
2.15	Υπερκύβος 24 κόμβων	38
3.1	Περιορισμός συνέχειας μήκους κύματος σε διαδρομή δύο βημάτων	40
4.1	Διάγραμμα του αλγόριθμου Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής ( <i>LLR</i> )	49
4.2	Διάγραμμα της Συντομότερης Διαδρομής	51
4.3	Διάγραμμα της Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής	52
4.4	Λεπτομερής αρχιτεκτονική ενός κόμβου	54
4.5	Οπτικές διαδρομές ( <i>lightpaths</i> )	55
4.6	Το δίκτυο TEN-155 (Ιανουάριος 1999)	56
4.7	Οπτική διαδρομή ( <i>lightpath</i> ) ATH-STOK	57
4.8	Το τροποποιημένο δίκτυο TEN-155	59
5.1	Διάγραμμα προσομοίωσης	65
5.2	Δομή του προσομοιωτή	66
5.3	About	67
5.4	Μήκη κύματος και οπτικές ίνες	68
5.5	Αρχείο τοπολογίας και συντομότερων διαδρομών	68
5.6	Εισαγωγή παραμέτρων πειράματος	69
5.7	Αποτέλεσμα πειράματος	69

## Γραφήματα

1.	Κατανομή των κόμβων ως προς In – Out Degree στο δίκτυο TEN-155 και στο τροποποιημένο TEN-155	58
2.	Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> ) για το δίκτυο TEN-155	74
3.	Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> ) για το <u>τροποποιημένο TEN-155</u>	74
4.	Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής ( <i>ASP</i> ) για το δίκτυο TEN-155	75
5.	Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής ( <i>ASP</i> ) για το <u>τροποποιημένο TEN-155</u>	75
6.	Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής ( <i>LLR</i> ) για το δίκτυο TEN-155	76

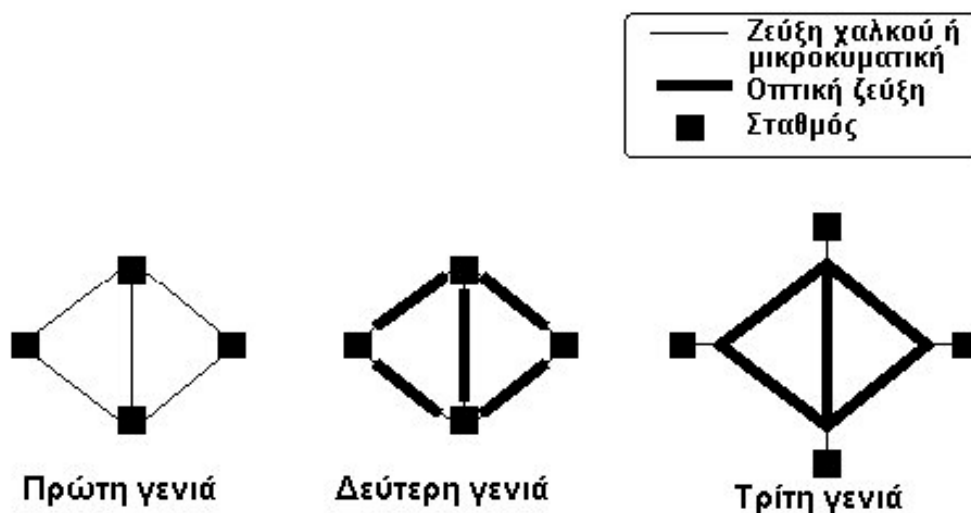
7. Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής ( <i>LLR</i> ) για το τροποποιημένο TEN-155	76
8. Γράφημα 8. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης με Τυχαία Κατανομή ( <i>Random</i> ) μήκους κύματος για το δίκτυο TEN-155	77
9. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης με Τυχαία Κατανομή ( <i>Random</i> ) μήκους κύματος για το τροποποιημένο TEN-155	77
10. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης και κατανομή μήκους κύματος Πρώτου Διαθέσιμου ( <i>First-Fit</i> ) για το δίκτυο TEN-155	78
11. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης και κατανομή μήκους κύματος Πρώτου Διαθέσιμου ( <i>First-Fit</i> ) για το τροποποιημένο TEN-155	78
12. Πιθανότητα Αποκλεισμού σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> ) με Τυχαία ( <i>Random</i> ) κατανομή μήκους κύματος για το δίκτυο TEN-155	79
13. Πιθανότητα Αποκλεισμού σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> ) με κατανομή Πρώτου Διαθέσιμου ( <i>First-Fit</i> ) για το δίκτυο TEN-155	79
14. Πιθανότητα Αποκλεισμού για τις μεθόδους δρομολόγησης σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών ανά σύνδεσμο. Μέθοδος κατανομής μήκους κύματος είναι Τυχαία ( <i>Random</i> ) και φόρτος κόμβων 35 Erlangs για το δίκτυο TEN-155	80
15. Πιθανότητα Αποκλεισμού για τις μεθόδους δρομολόγησης σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών ανά σύνδεσμο. Μέθοδος κατανομής μήκους κύματος είναι η Πρώτου Διαθέσιμου ( <i>First-Fit</i> ) και φόρτος κόμβων 35 Erlangs για το δίκτυο TEN-155	80
16. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης στο δίκτυο TEN-155 (T-SP, T-ASP, T-LLR) και στο τροποποιημένο TEN-155 (M-SP, M-ASP, M-LLR) σε σχέση με κατανομή μήκους κύματος Πρώτου Διαθέσιμου ( <i>First-Fit</i> )	81
17. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης στο δίκτυο TEN-155 (T-SP, T-ASP, T-LLR) και στο τροποποιημένο TEN-155 (M-SP, M-ASP, M-LLR) σε σχέση με Τυχαία ( <i>Random</i> ) κατανομή μήκους κύματος	81
18. Πιθανότητα Αποκλεισμού του τροποποιημένου δικτύου TEN-155 (M-155) και του αρχικού (T-155) όταν ο αριθμός ινών είναι 8, δρομολόγηση Συντομότερης Διαδρομής και κατανομής Πρώτου Διαθέσιμου ( <i>First-Fit</i> )	82



## Εισαγωγή

Οι γενιές των δικτύων, σε σχέση με την τεχνολογία που εφαρμόζεται σε φυσικό επίπεδο, μέχρι και σήμερα είναι τρεις [1]. Τα δίκτυα που υπήρχαν πριν την εμφάνιση των οπτικών ινών, όπως αυτά που είναι βασισμένα σε καλώδια χαλκού ή σε μικροκυματικές ζεύξεις, αναφέρονται ως δίκτυα πρώτης γενιάς. Σε αυτού του είδους τα δίκτυα συμπεριλαμβάνονται τα δίκτυα Ethernet (IEEE 802.3), IEEE 802.4 token bus, IEEE 802.5 token ring, ARPANET, IBM SNA και Digital DNA. Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν τις οπτικές ίνες με κλασικό τρόπο [1] όπου στα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (WAN) αναβαθμίζονται οι ζεύξεις από ζεύξεις χαλκού ή μικροκυματικές σε ζεύξεις διαμέσου οπτικών ινών. Άλλα παραδείγματα «κλασικής χρήσης» των οπτικών ινών είναι οι νεοσχεδιασθέντες τύποι δικτύων όπως τα δίκτυα τύπου Fiber Distributed Data Interface (FDDI) και IEEE 802.6 (DQDB) για Τοπικά Δίκτυα (LAN) ή Μετροπολιτικά Δίκτυα (MAN) και Broadband Integrated Services Digital Network (BISDN) για Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (WAN).

Στα τρίτης γενιάς δίκτυα αξιοποιούνται τα μοναδικά χαρακτηριστικά των οπτικών ινών [1] όπως η ικανότητα μεταφοράς όγκου δεδομένων με ρυθμούς μεγαλύτερους κατά τουλάχιστον τέσσερις βαθμούς τάξης μεγέθους από τη μέγιστη ταχύτητα επεξεργασίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Για την αξιοποίηση των παραπάνω χαρακτηριστικών και την αντιμετώπιση της ολοένα αυξανόμενης ανάγκης εύρους ζώνης, στα δίκτυα τρίτης γενιάς, εφαρμόζονται εντελώς νέες προσεγγίσεις.



Σχ. 1.1 Οι τρεις γενιές δικτύων

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην διερεύνηση θεμάτων που αφορούν παραπάνω δίκτυα τρίτης γενιάς με κίνητρο τις νέες εφαρμογές. Υπηρεσίες όπως “*fiber to the office*” και “*fiber to the home*” αναμένεται να υποστηρίξουν πολλαπλές συνδέσεις τηλεόρασης υψηλής ανάλυσης (*HDTV*), τηλεσυνδιάσκεψης, *Video On Demand*, ψηφιακού ήχου κλπ. Επιπλέον, προβλέπεται ότι ο μελλοντικός τελικός χρήστης θα έχει διαρκή ανάγκη εύρους ζώνης περίπου ενός *Gbps* το οποίο τα δίκτυα δεύτερης γενιάς, λόγω περιορισμών στα ηλεκτρονικά κυκλώματα δεν αναμένεται να είναι σε θέση να παράσχουν στις χιλιάδες τελικών χρηστών [2].

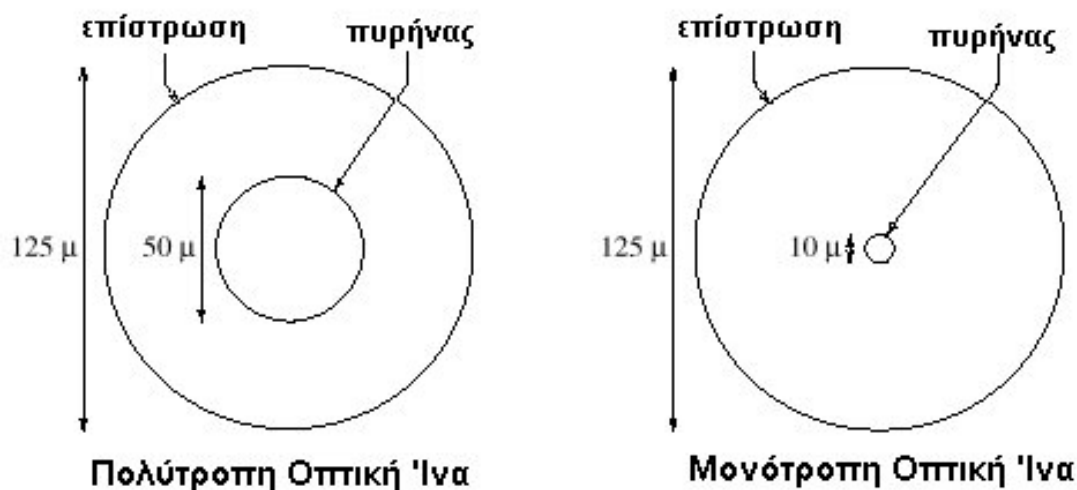
Σχεδιάζοντας ένα οπτικό δίκτυο τρίτης γενιάς, η ταυτόχρονη εκπομπή πολλαπλών χρηστών (*concurrent transmission*) επιτυγχάνεται είτε σύμφωνα με το μήκος κύματος (*wavelength division multiple access, WDMA*) είτε σύμφωνα με θυρίδα χρόνου (*time slot*) (*time division multiple access, TDMA*) ή κυματομορφή (*spread spectrum, code division multiple access, CDMA*). Αν και τα *TDMA* και *CDMA* οπτικά δίκτυα έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές [1][2][3], η βασική τους αδυναμία που είναι ο συγχρονισμός των σταθμών σε μία χρονοθυρίδα (*TDMA*) ή σε μία μονάδα χρόνου εκπομπής ενός δεδομένου (*chip*) (*CDMA*) τα κάνει λιγότερο ελκυστικά από τα οπτικά δίκτυα *WDMA*. Τα *WDMA* δίκτυα, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν υπάρχουσες τεχνολογίες και συστήματα τα οποία επιτρέπουν τον τελικό χρήστη να έχει ηλεκτρονικό εξοπλισμό ικανό να χειριστεί το εύρος ζώνης ενός καναλιού ΔΜΚ (*WDM*) χωρητικότητας ίσης με την ικανότητα επεξεργασίας του.

# Κεφάλαιο 1ο

## Τεχνολογίες Οπτικών Δικτύων

### 1.1 Οπτικές Ύνες και Δίκτυα Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος

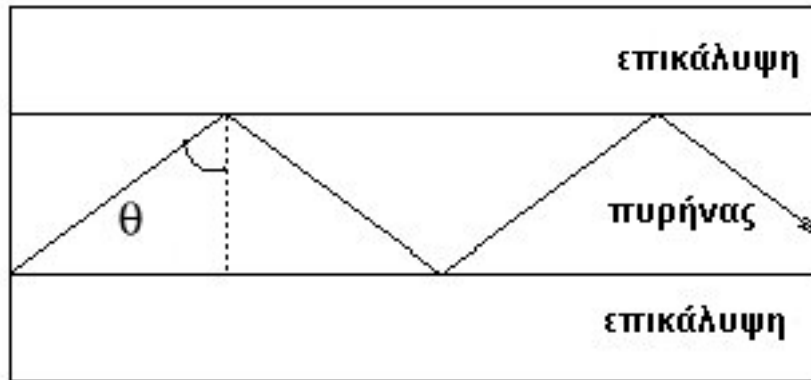
Η οπτική ίνα είναι ουσιαστικά ένα λεπτό φύλλο γυαλιού που ενεργεί σαν κυματοδηγός διαμέσου του οποίου οπτικά σήματα εσωτερικά ανακλώμενα μπορούν να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις. Οι οπτικές ίνες έχουν στο κέντρο τους τον πυρήνα μέσω του οποίου μεταδίδεται το οπτικό σήμα. Ο οπτικός πυρήνας περιβάλλεται από στρώμα υάλινης επικάλυψης η οποία με τη σειρά της περιβάλλεται από το εξωτερικό προστατευτικό υλικό. Η δέσμη φωτός εκπέμπεται στον πυρήνα της οπτικής ίνας και προσπίπτει με τέτοια γωνία στην επικάλυψη ώστε να υπάρχει ολική ανάκλαση και να μεταδίδεται σε όλο το μήκος της οπτικής ίνας. Υπάρχουν πολλές γωνίες με τις οποίες το φως μπορεί να εισέλθει σε μία οπτική ίνα και να δημιουργήσει διαφορετικές γωνίες προσβολής της επικάλυψης οι οποίες αναφέρονται και ως τρόποι (*modes*).



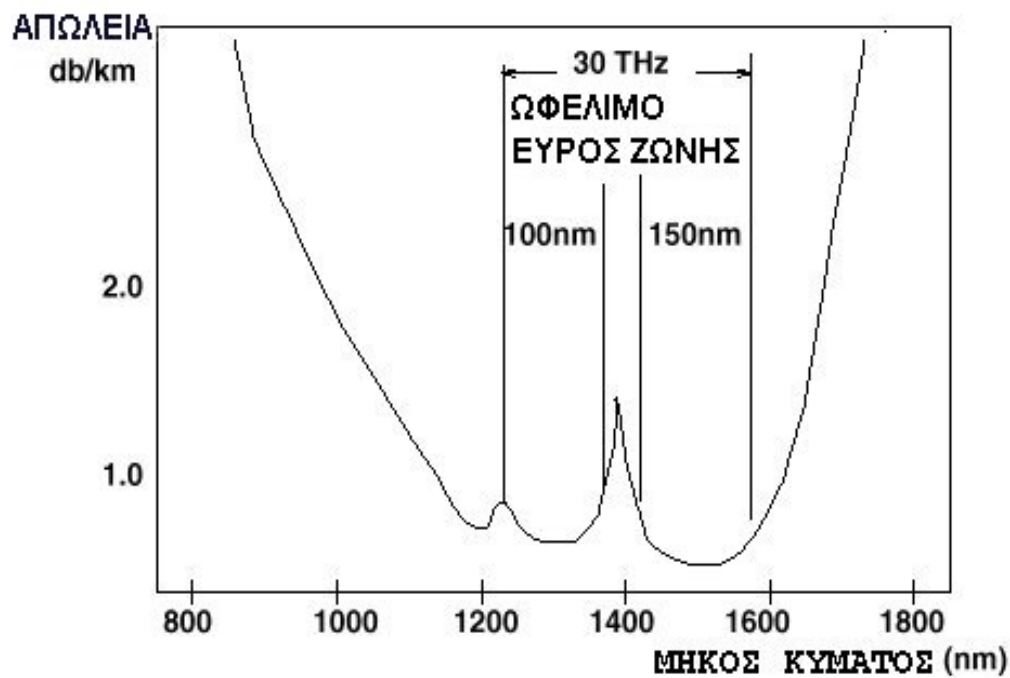
Σχ. 1.2 Οπτικές ίνες

Ο αριθμός των τρόπων (*modes*) αυξάνει καθώς αυξάνει η διάμετρος του πυρήνα. Οι μονότροπες (*single-mode*) οπτικές ίνες έχουν συνήθως διάμετρο πυρήνα περίπου 10 μm ενώ οι πολύτροπες 50 – 100 μm. Οι μονότροπες οπτικές ίνες, σε

αντίθεση με τις πολύτροπες δεν διαχέουν τη δέσμη φωτός αλλά απαιτούν συγκέντρωση φωτός μεγάλης έντασης σε πυρήνα μικρής διαμέτρου γεγονός που απαιτεί τη χρήση Laser. Οι τηλεπικοινωνίες σήμερα χρησιμοποιούν, ουσιαστικά, μόνο μονότροπες οπτικές ίνες



Σχ. 1.3 Εκπομπή δέσμης φωτός διαμέσου οπτικής ίνας



Σχ.1.4 Περιοχή χαμηλής απώλειας μονότροπων οπτικών ινών.

Η περιοχή χαμηλής απώλειας των μονότροπων οπτικών ινών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4, εκτείνεται σε μήκη κύματος από τα 1.2 στα 1.6 μm από όπου

προκύπτει ωφέλιμο οπτικό εύρος ζώνης της τάξεως των 30 THz. Λαμβάνοντας υπόψη, έτσι, ένα σχήμα διαμόρφωσης μήκους κύματος σύμφωνα με το οποίο 1 bit αντιστοιχεί σε 1 κύκλο, προκύπτει δυνατότητα μεταφοράς 30 Tb/s ικανή να παράσχει εκατοντάδες χιλιάδες κανάλια εύρους ζώνης των 100 Mb/s με τη χρήση μίας μόνο οπτικής ίνας. [3]. Έτσι, όταν οι χρήστες εκπέμπουν σε, και λαμβάνουν από μη επικαλυπτόμενα κομμάτια της περιοχής μήκους κύματος χαμηλής απώλειας της οπτικής ίνας, δημιουργούνται κανάλια ΔΜΚ που λειτουργούν παράλληλα και ταυτόχρονα. Σε ότι αφορά στο διάστημα μεταξύ διαδοχικών ΔΜΚ καναλιών, που απαιτείται λόγω της ύπαρξης συνακρόασης (*crosstalk*), μπορεί να μειωθεί δραματικά με τη χρήση Lasers καλής ποιότητας (χαμηλής ολίσθησης συχνότητας). Το διάστημα μεταξύ καναλιών μπορεί να είναι 1 nm ή μικρότερο με τη χρήση *Distributed-Feedback Laser (DFB)*, *Distributed-Bragg-Reflector (DBR)* ή άλλου τύπου στενής δέσμης φωτός Laser. Τα συστήματα με διάστημα μεταξύ καναλιών 1 nm ή μικρότερο, αναφέρονται ως «πυκνά» (*dense*) ΠΔΜΚ συστήματα [3]. Είναι, επίσης, δυνατή η εκμετάλλευση της οπτικής σηματοδοσίας για να υλοποιηθούν λειτουργίες όπως δρομολόγηση (*routing*), μεταγωγή (*switching*) καθώς και διαχωρισμό υπηρεσιών (*service segregation*). Βασικό, τέλος, χαρακτηριστικό των συστημάτων ΠΔΜΚ είναι το ότι τα διακριτά μήκη κύματος από ένα σύνολο φορέων μπορούν να διαχωριστούν, δρομολογηθούν και μεταχθούν χωρίς να αλληλοπαρεμβάλλονται.

Σε ένα δίκτυο ΠΔΜΚ ο χρήστης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να εκπέμψει σε πολλαπλά κανάλια και να δεχθεί από πολλαπλά κανάλια. Έτσι, βασικό στοιχείο για την ανάπτυξη ενός δικτύου ΔΜΚ είναι η ικανότητα συντονισμού των εκπομπών (Lasers) και των δεκτών (filters) να λειτουργήσουν σε ευρύ φάσμα καναλιών καθώς και ο μικρός χρόνος συντονισμού (τάξεως λίγων nsec) [4].

## 1.2 Lasers

Η λέξη Laser, η οποία υιοθετήθηκε αυτούσια στην Ελληνική, είναι ακρωνύμιο του *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Οι συσκευές Laser παράγουν δέσμες φωτονίων μέσω της διέγερσης με ηλεκτρικό ρεύμα ιονισμένων υλικών. Οι δέσμες φωτονίων ενισχύονται με σύστημα καθρεπτών και στη συνέχεια εξέρχονται με τη μορφή εξαιρετικά εστιασμένων ακτινών.

Lasers με ικανότητα συντονισμού έχουν, σήμερα, εξελιχθεί με τη χρήση μεθόδων συντονισμού μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται ο μηχανικός συντονισμός (*mechanical*), ο ακουστοπτικός συντονισμός (*acoustooptic*), ο ηλεκτροπτικός συντονισμός (*electroptic*) και ο injection-current-based συντονισμός [3]. Τα μηχανικά συντονιζόμενα Lasers μπορούν να συντονιστούν σε όλο το ωφέλιμο φάσμα (τάξεως των 100nm) αλλά ο χρόνος εναλλαγής καναλιών ανέρχεται σε msec εξ αιτίας των μηχανικών στοιχείων μέσω των οποίων γίνεται ο συντονισμός. Τα ακουστοπτικά Lasers συνδυάζουν μέσο εύρος και μέσο χρόνο συντονισμού (τάξεως των 10 μsec). Οι μικρότεροι χρόνοι εναλλαγής καναλιών μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση Laser ημιαγωγών όπως τα τύπου *Distributed-Feedback Laser (DFB)* και *Distributed-Bragg-Reflector (DBR)* που έχουν χρόνο συντονισμού μικρότερο των 10 nsec αλλά έχουν περιορισμένο εύρος μήκους κύματος (της τάξεως μερικών καναλιών).

Μέθοδος Συντονισμού	Κανάλια	Χρόνος Συντονισμού
Μηχανικός	100 – 1000	1 – 10 msec
Ακουστοπτικός	30 – 1000	10 μsec
Ηλεκτροπτικός	≤ 10	1 – 10 nsec
DFB και DBR	≤ 10	1 – 10 μsec

Πιν. 1. Laser με δυνατότητα συντονισμού, εύρος και ταχύτητα συντονισμού

### 1.3 Οπτικοί Δέκτες (*Filters*)

Οι οπτικοί δέκτες είναι συσκευές που με κατάλληλους καθρέπτες δέχονται τη δέση φωτός από την οπτική ίνα και συντονίζονται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ανάλογα με την απόσταση των καθρεπτών μεταξύ τους. Οπτικοί δέκτες με δυνατότητα συντονισμού υπάρχουν παθητικοί (*passive*), ενεργοί (*active*) και διόδου Laser (*Laser-diode-amplifier-based*). Το πλεονέκτημα των παθητικών δεκτών είναι ότι υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά και ότι μπορούν να πετύχουν υψηλή ανάλυση όπως οι δέκτες τύπου *Fabry-Perot* που χρησιμοποιήθηκαν στο πρωτότυπο *Rainbow* [38]. Το μειονέκτημα των παθητικών δεκτών είναι οι σημαντικές απώλειες και ο μεγάλος χρόνος συντονισμού (τάξεως msec) καθώς στην κατασκευή τους

περιλαμβάνουν μηχανικά στοιχεία. Οι ενεργοί και οι διόδου Laser δέκτες, μπορούν να συντονιστούν με μεγαλύτερες ταχύτητες (τάξεως  $nsec$ ) έχοντας όμως μικρότερη ανάλυση με αποτέλεσμα να μπορούν να συντονιστούν σε λιγότερα κανάλια. [20]

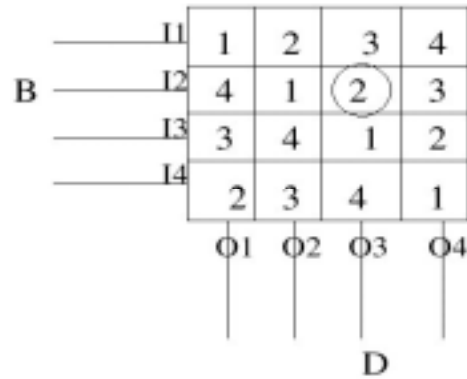
## 1.4 Οπτικοί Ενισχυτές

Ταυτόχρονα με τους εκπομούς (*Lasers*) και τους δέκτες (*filters*), οι οπτικοί ενισχυτές (*optical amplifiers*) είναι από τα βασικά στοιχεία στη σχεδίαση οπτικών δικτύων ΠΔΜΚ. Οι οπτικοί ενισχυτές παρέχουν το μέσο στα οπτικά σήματα ώστε να αναγεννιούνται χωρίς την ανάγκη χρήσης οπτικο-ηλεκτρονικών μεταλλακτών. Επιπλέον, οι οπτικοί ενισχυτές έχουν την ικανότητα να ενισχύουν κανάλια ΔΜΚ χωρίς την ανάγκη αποπολυπλεξίας. Οι οπτικοί ενισχυτές τύπου *Erbium-doped* (*Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA)*) που λειτουργούν σε οπτικό μήκος κύματος 1.5  $\mu m$  θεωρούνται ως «επανάσταση» στο πεδίο των επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων [3]. Με τη χρήση των παραπάνω οπτικών ενισχυτών EDFA είναι δυνατή η εκπομπή σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Σε πείραμα εκπομπής 20 καναλιών των 5 Gb/s έγινε επίδειξη εκπομπής σε απόσταση 9100 km [20].

## 1.5 Οπτικοί Δρομολογητές

Σε ένα κόμβο δικτύου, πολλές φορές, υπάρχει ανάγκη ύπαρξης κάποιας συσκευής οπτικής δρομολόγησης ικανής να δρομολογήσει οπτικά σήματα από μία οπτική ίνα σε μία άλλη. Αυτή η συσκευή μπορεί να είναι προ-ρυθμισμένη με παθητικά στοιχεία όπως ο οπτικός δρομολογητής *Waveguide Grating Router (WGR)* [2, 20] (*αναφερόμενος και ως Latin Router*) ή μπορεί να έχει ενεργά στοιχεία όπως ο δρομολογητής *Wavelength Routing Switch (WRS)* [3, 20]. Ένας οπτικός δρομολογητής *WGR* με  $M$  εισόδους και  $M$  εξόδους παρέχει πλήρη συνδεσιμότητα μεταξύ κάθε εισόδου και κάθε εξόδου παρέχοντας  $M^2$  παθητικές οπτικές συνδέσεις σε  $M$  μήκη κύματος. Οι δρομολογητές *WGR* έχουν προκαθορισμένο πίνακα δρομολόγησης μεταξύ των εισόδων και των εξόδων τους. Στόν 4x4 *WGR* του σχήματος 1.5 η είσοδος 2 είναι συνδεδεμένη με την έξοδο 3 σε μήκος κύματος  $\lambda_2$ . Από τη άλλη πλευρά, ένας οπτικός δρομολογητής *WRS*, είναι ουσιαστικά, ένας μεταγωγέας με ή χωρίς δυνατότητα επαναπροσδιορισμού των ρυθμίσεων και

μετάγωγής κάθε εισερχομένου μήκους κύματος από οποιαδήποτε είσοδο σε οποιαδήποτε έξοδο.



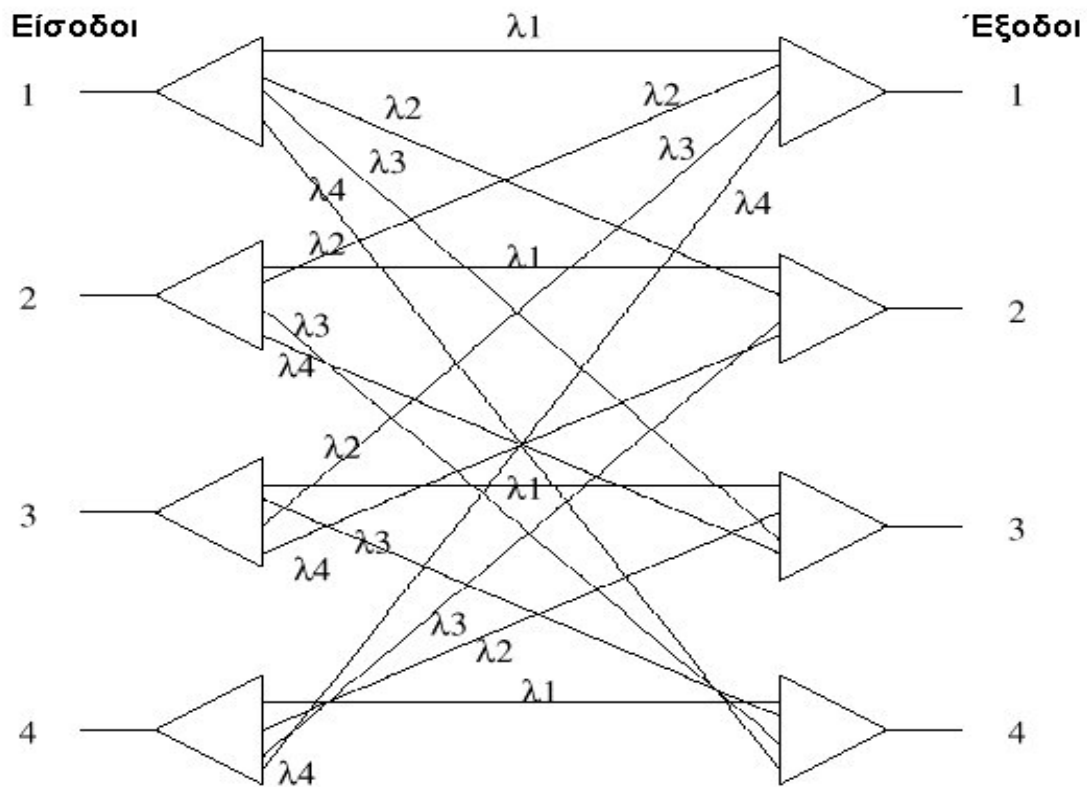
Σχ. 1.5 Σχηματικό διάγραμμα ενός WGR

Οι μη επαναπροσδιορίσιμοι (*Non-Reconfigurable*) WRS παρέχουν προκαθορισμένη δρομολόγηση του κάθε σήματος που εισέρχεται σε αντίθεση με τους επαναρυθμίσιμους που η λειτουργία τους μπορεί να ελεγχθεί ηλεκτρονικά.

### 1.5.1 Μη Επαναπροσδιοριζόμενοι WRS (*Non-Reconfigurable*)

Οι μη επαναρυθμίσιμοι δρομολογητές WRS αποτελούνται από μία βαθμίδα οπτικών πολυπλεκτών ακολουθούμενη από αντίστοιχη βαθμίδα οπτικών αποπολυπλεκτών. Οι δύο βαθμίδες είναι αλληλοσυνδεόμενες με καλώδια οπτικών ινών. Ο δρομολογητής έχει P εισόδους, P εξόδους και M κανάλια μήκους κύματος ανά είσοδο. Στο σχήμα 1.6 φαίνεται ένας μη επαναπροσδιοριζόμενος οπτικός δρομολογητής WRS.





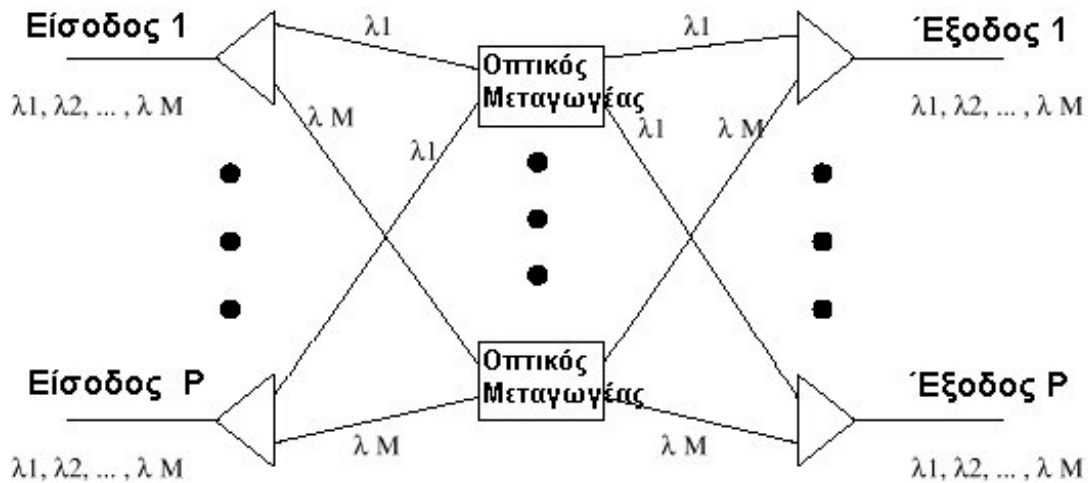
Σχ. 1.6 4 X 4 Μη επαναπροσδιοριζόμενος οπτικός δρομολογητής WRS.

### 1.5.2 Επαναπροσδιοριζόμενοι Οπτικοί Δρομολογητές WRS (Reconfigurable)

Οι επαναπροσδιοριζόμενοι δρομολογητές WRS έχουν την ικανότητα να ρυθμίζονται ώστε να ικανοποιούν τις εκάστοτε ανάγκες κυκλοφορίας. Οι παραπάνω δρομολογητές έχουν  $P$  εισόδους και  $P$  εξόδους. Η κάθε είσοδος έχει  $M$  κανάλια οπτικού μήκους κύματος και το κανάλι  $m$  που εισέρχεται στο δρομολογητή σε κάθε είσοδο είναι δυνατό να ορισθεί από το διάνυσμα  $I_m = (\lambda_{m1}, \dots, \lambda_{mP})$  όπου  $\lambda_{mi}$  το μήκος κύματος  $m$  στην είσοδο  $i$ ,  $1 \leq i \leq P$  το δε κανάλι  $m$  που εξέρχεται από το δρομολογητή μπορεί να ορισθεί από το διάνυσμα  $O_m = (\lambda_{m1}, \dots, \lambda_{mP})$  όπου  $\lambda_{mi}$  το μήκος κύματος  $m$  στην έξοδο  $i$ ,  $1 \leq i \leq P$ . Τότε,  $O_m$  είναι συνδυασμός του  $I_m$  για  $m = 1, 2, \dots, M$ . [3]

Όπως και στους μη επαναπροσδιοριζόμενους, τα μήκη κύματος σε κάθε είσοδο διαχωρίζονται με τη χρήση οπτικών αποπολυπλεκτών και τελικά αφού πολλά

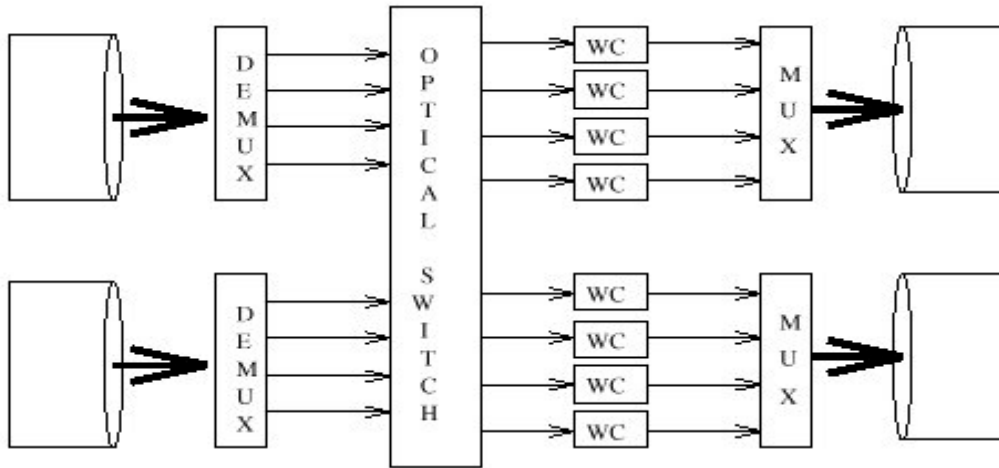
κανάλια ΠΔΜΚ πολυπλεθθούν εξέρχονται από τον δρομολογητή. Μεταξύ των βαθμίδων αποπολυπλεξίας και πολυπλεξίας υπάρχει σειρά οπτικών μεταγωγέων ικανοί να δρομολογήσουν οποιοδήποτε εισερχόμενο σήμα σε οποιαδήποτε έξοδο.



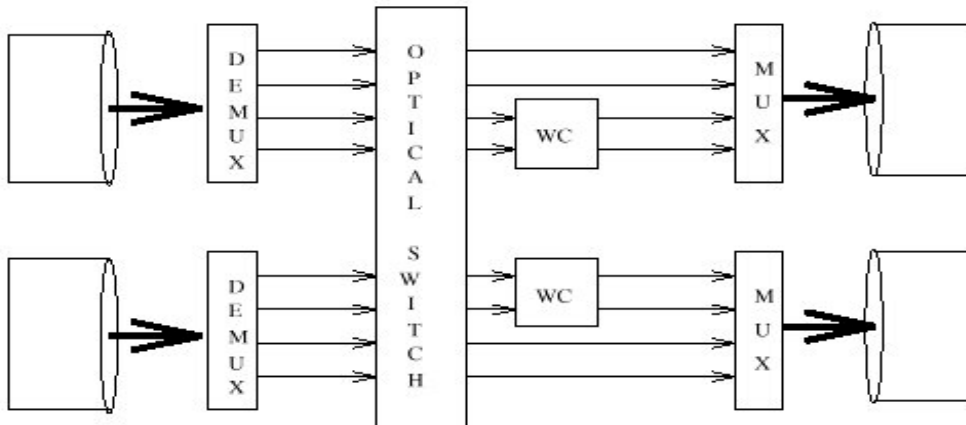
Σχ. 1.7 P x P Επαναπροσδιοριζόμενος οπτικός δρομολογητής WRS

## 1.6 Οπτικός Μεταγωγέας Εναλλακτών Μήκους Κύματος

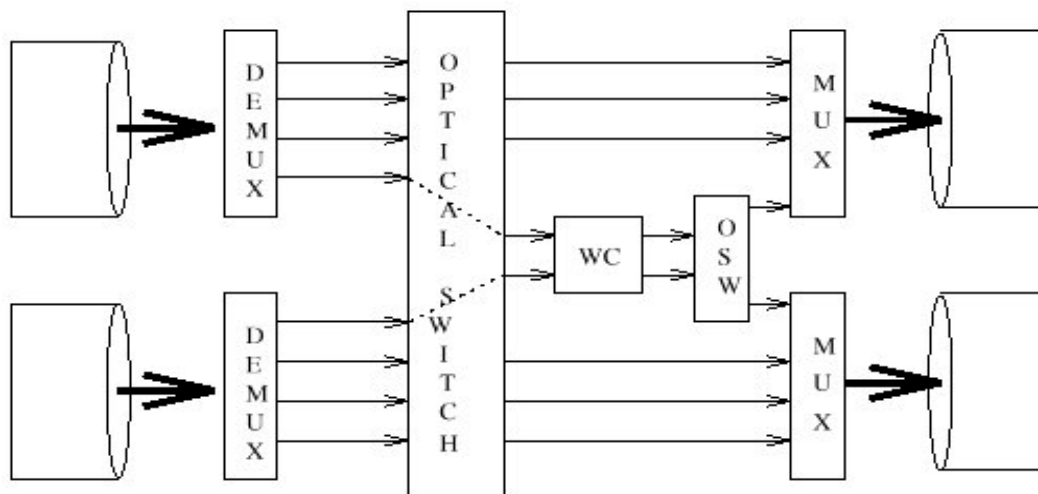
Ένας κόμβος μεταγωγής με δυνατότητα μετατροπής οπτικού μήκους κύματος αποτελείται από πολυπλέκτες, αποπολυπλέκτες, οπτικούς μεταγωγείς και μετατροπείς μήκους κύματος. Όταν ένα συνολικό οπτικό σήμα προερχόμενο από τον προηγούμενο κόμβο λαμβάνεται, πρώτα διαχωρίζεται σε σήματα που το κάθε ένα υποστηρίζει ένα κύκλωμα και έχει διαφορετικό μήκος κύματος. Κάθε μήκος κύματος, στη συνέχεια, δρομολογείται στην έξοδο που είναι συνδεδεμένη με τον επιθυμητό επόμενο κόμβο. Το εξερχόμενο από τον δρομολογητή οπτικό σήμα μπορεί να έχει παραμείνει το ίδιο ή να έχει αλλάξει μήκος κύματος από ένα μεταλλάκτη. Τέλος, πολλά μήκη κύματος συνενώνονται και σχηματίζουν το συνολικό σήμα που θα περάσει από την οπτική ίνα. Επειδή πολλά μήκη κύματος δεν απαιτούν μετατροπή, στον παραπάνω μεταγωγέα μπορεί να υπάρχουν συστάδες εναλλακτών μήκους κύματος τους οι οποίοι είναι κοινός με βάση τους κόμβους (*per-node*) ή με βάση τις συνδέσεις (*per-link*) που εμπλέκονται [3]. Στα σχήματα 1.8. 1.9. 1.10 φαίνονται οι τρεις αρχιτεκτονικές.



Σχ. 1.8. Οπτικός μεταγωγέας με αποκλειστικούς εναλλάκτες μήκους κύματος (*WC*).



Σχ. 1.9. Οπτικός μεταγωγέας με κοινούς ανά σύνδεση (*per-link*) εναλλάκτες μήκους κύματος (*WC*).



Σχ. 1.10. Οπτικός μεταγωγέας με κοινούς ανά κόμβο (*per-node*) εναλλάκτες (*WC*) μήκους κύματος.

## Κεφάλαιο 2ο

### Αρχές Λειτουργίας και Σχεδίασης Οπτικών Δικτύων Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος

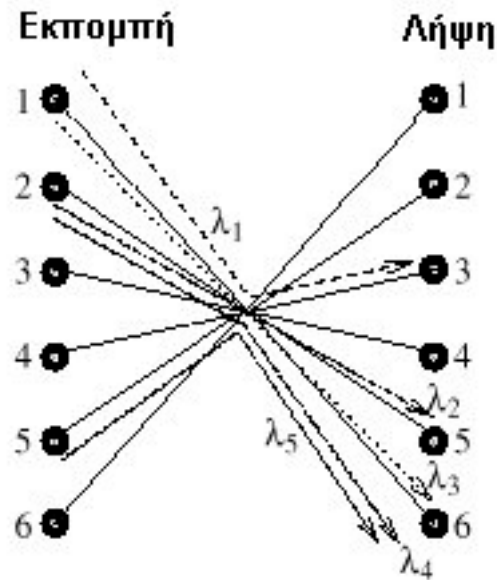
Αν και το διαθέσιμο εύρος ζώνης, με την εφαρμογή των δικτύων ΠΔΜΚ, έχει αυξηθεί δραματικά, η δρομολόγηση και η μεταγωγή στα σημερινά δίκτυα γίνεται μετά από μετατροπή των οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά και αντίστροφα. Ωστόσο, όσο ο όγκος πληροφορίας, που επεξεργάζεται στους κόμβους των δικτύων, αυξάνει, εμφανίζονται τεχνικά θέματα που αμφισβητούν την αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα των ηλεκτρονικών με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε στην ανάγκη ύπαρξης «αμιγώς οπτικών» (*all-optical*) δικτύων όπου τα σήματα παραμένουν οπτικά από την αρχή έως το τέλος και χωρίς την μεσολάβηση «ηλεκτρονικών» κόμβων [3].

#### 2.1 Broadcast-and-Select Οπτικά Δίκτυα Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος (ΠΔΜΚ)

Στα οπτικά δίκτυα Broadcast-and-Select (BSONs), που αρχικά προτάθηκαν και αναλύθηκαν λόγω της απλότητάς τους, υπάρχει ένα τουλάχιστον φυσικό μονοπάτι μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων [1] [20]. Επειδή τα BSON οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν παθητικούς οπτικούς διαιρέτες (*splitters*) και συζεύκτες (*combiners*), η εκπομπή κάθε κόμβου λαμβάνεται από όλους τους υπόλοιπους. Σε κάθε προορισμό το επιθυμητό σήμα φιλτράρεται από το συνολικό σήμα ΠΔΜΚ.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για τα BSON δίκτυα: α) απλού βήματος (*single-hop*) και β) πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*). Στα δίκτυα απλού βήματος, οι δύο κόμβοι που θέλουν να επικοινωνήσουν, με κάποια μέθοδο τυχαίας επιλογής, επιλέγουν ένα κανάλι για να εκπέμψουν και για να γίνει δυνατή η εκπομπή ενός πακέτου, ένα από τα lasers του αποστολέα κόμβου και ένας από τους δέκτες του παραλήπτη πρέπει να συντονιστούν στο ίδιο μήκος κύματος για το χρόνο που θα απαιτηθεί. Είναι επίσης σημαντικό τα lasers και οι δέκτες να έχουν την ικανότητα να συντονίζονται σε διαφορετικά μήκη κύματος και με σχετικά ταχείς ρυθμούς ώστε να υπάρχει αλληλουχία αποστολής και λήψης. Η πρόκληση στις αρχιτεκτονικές απλού

βήματος είναι η ανάπτυξη πρωτοκόλλων που θα συντονίζουν αξιόπιστα την αποστολή δεδομένων.



Σχ. 2.1 Οπτικό δίκτυο ΔΜΚ *Broadcast-and-Select (BSON)*

Στην αρχιτεκτονική πολλών βημάτων (*multi-hop*), ένα ή περισσότερα κανάλια ορίζονται ανά κόμβο στα οποία τα lasers και οι δέκτες συντονίζονται. Η σύνδεση μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων επιτυγχάνεται με την λειτουργία όλων των ενδιάμεσων ως δρομολογητές. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι υπεύθυνοι για την δρομολόγηση των δεδομένων μεταξύ των καναλιών έτσι ώστε τα δεδομένα που εκπέμπονται από ένα κανάλι του αποστολέα τελικά να φτάσει στον παραλήπτη αφού πρώτα διέλθει από πολλούς ενδιάμεσους κόμβους.

Επειδή τα οπτικά σήματα μοιράζονται την ίδια υποδομή οπτικών ινών τα χωριστά μήκη κύματος,  $N_\lambda$ , που απαιτούνται είναι ίσα με τον αριθμό καναλιών επικοινωνίας που δημιουργούνται στο δίκτυο - πολλές φορές ίσος με τον αριθμό των κόμβων  $N$  [3]. Όσο τα μήκη κύματος και ο αριθμός των κόμβων αυξάνουν, η συνολική ισχύς του οπτικού σήματος λόγω των συνεχών διαιρέσεων ( $I/N$ ) μειώνεται και τα lasers τείνουν προς την αστάθεια. Για τον παραπάνω λόγο η εφαρμογή των δικτύων BSON περιορίζεται στα μητροπολιτικά (MAN) και τοπικά (LAN) δίκτυα όπου ο αριθμός των κόμβων είναι μικρός [20].

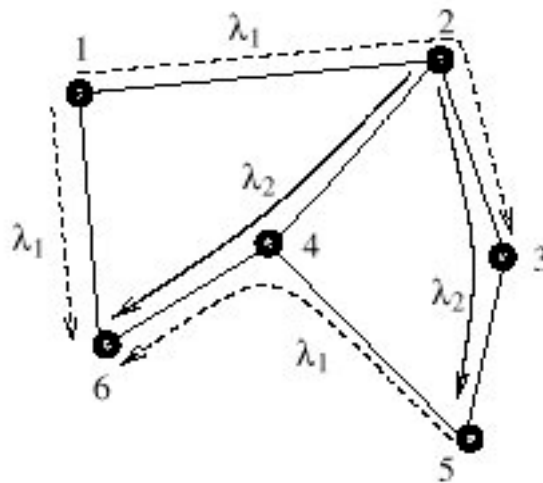
## 2.2 Οπτικά Δίκτυα Δρομολόγησης Μήκους Κύματος (*Wavelength-Routed Optical Networks (WRONs)*)

Δρομολόγηση μήκους κύματος ορίζεται ως η επιλεκτική δρομολόγηση οπτικών σημάτων σύμφωνα με το μήκος κύματος τους. Λόγω της ιδιότητας της επιλεκτικής δρομολόγησης του οπτικού σήματος, είναι δυνατή η χρήση του ίδιου μήκους κύματος σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Τα υψηλής χωρητικότητας οπτικά σήματα δρομολογούνται σύμφωνα με το μήκος κύματος τους χωρίς τη μετατροπή τους σε ηλεκτρικά και χωρίς άλλη επεξεργασία [3] [20].

Ακόμη πιο σημαντική, στα δίκτυα ΠΔΜΚ, είναι η ικανότητά τους να σχηματίζουν, μεταξύ ζευγών κόμβων, από άκρη-ως-άκρη (*end-to-end*) οπτικές διαδρομές - κανάλια μήκους κύματος (*wavelength-channels*) ή άλως οπτικά μονοπάτια (*lightpaths*) [3]. Με τις οπτικές διαδρομές (*lightpaths*) τα δίκτυα ΠΔΜΚ αποκτούν το πλεονέκτημα να υποστηρίζουν, με πλήρη διαφάνεια, πρωτοκόλλα υψηλότερων επιπέδων (SDH, SONET, αναλογικά σήματα κλπ). Ένα σύνολο τέτοιων καναλιών, που δημιουργούν μία ιδεατή τοπολογία (*virtual topology*), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δρομολογήσουν πακέτα όπως ένα κλασικό δίκτυο μεταγωγής πακέτων. Τα λογικά μονοπάτια, σε μια τέτοια τοπολογία, διατηρούνται όσο διαρκεί η μεταφορά δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη που μπορεί να είναι ακόμα και μήνες .

Στα δρομολογούμενα οπτικά δίκτυα επιτυγχάνεται λογική αρχιτεκτονική απλού βήματος όταν κάθε απαιτούμενη σύνδεση ικανοποιείται μέσω αποκλειστικού καναλιού. Έτσι, μειώνεται η επεξεργασία που απαιτείται από μία λογική αρχιτεκτονική πολλαπλών βημάτων κατά την οποία, λόγω ελλείψεως καναλιών οπτικού μήκους κύματος, δεν είναι δυνατό να αφιερωθούν αποκλειστικά κανάλια σε όλα τα ζεύγη κόμβων.

Οι κόμβοι στα παραπάνω δίκτυα αναφέρονται και ως κόμβοι δρομολόγησης μήκους κύματος (*wavelength-routing nodes (WRNs)*) [8] ή ως οπτικοί «σύνδεσμοι» (*optical cross-connects (OXC)*).

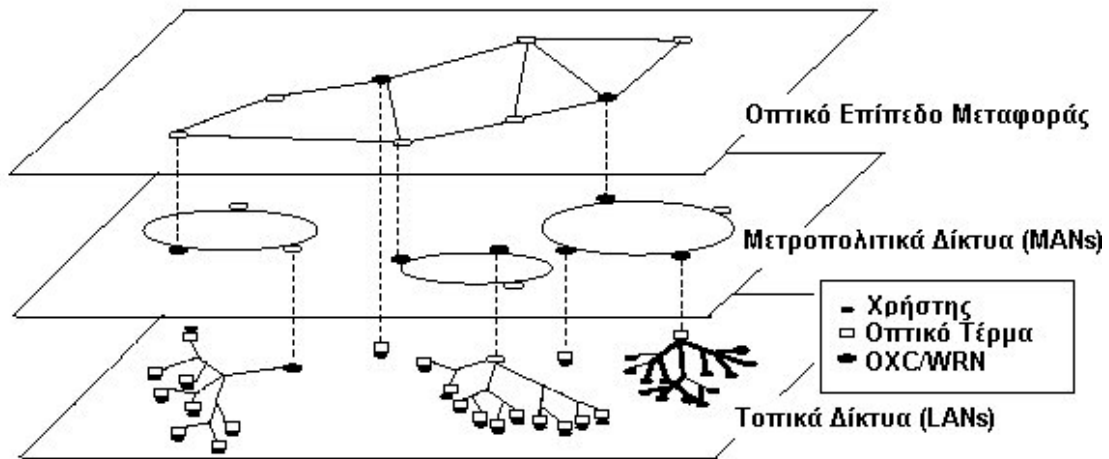


Σχ. 2.2 Οπτικό δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος.

Στα WRONs τα οπτικά κανάλια ακολουθούν επιλεγμένα μονοπάτια του δικτύου και τα οπτικά μήκη κύματος μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά σημεία του δικτύου με αποτέλεσμα να μειωθούν τα απαιτούμενα μήκη κύματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2. Ακόμα, απαλείφεται η διαίρεση της ισχύος  $1/N$  που συντελείται στα BSONs και για το λόγο ότι μόνο συγκεκριμένα οπτικά κανάλια φτάνουν στους κόμβους, περιορίζεται το πρόβλημα της λήψης.

Τα WRONs προσδίδουν σημαντικά πλεονεκτήματα στη λειτουργικότητα ενός δικτύου με την ικανότητα αποκατάστασης του οπτικού μονοπατιού (*optical path restoration*) σε περίπτωση διακοπής μίας σύνδεσης (*link failure*). Ειδικότερα, η δρομολόγηση μήκους κύματος επιτρέπει την πλήρη αποκατάσταση μέσω της ανακατανομής λίγων μόνο καναλιών μεγάλης χωρητικότητας και όχι τον επαναπροσδιορισμό πολλών κυκλωμάτων μικρού εύρους ζώνης, όπως γίνεται στα ψηφιακά δίκτυα, έχοντας σαν αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου και της πολυπλοκότητας αποκατάστασης.

Τα δίκτυα δρομολόγησης οπτικού μήκους κύματος (WRONs) είναι προφανές ότι έχουν τα χαρακτηριστικά για να αναπτύξουν ένα Οπτικά Επίπεδο Μεταφοράς (*Optical Transport Layer*) όπου υψηλού επιπέδου λειτουργίες θα επιτελούνται [3 ] [20 ].



Σχ. 2.3 Ιεραρχικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο

Το οπτικό επίπεδο μεταφοράς αλληλοσυνδέει μεγάλο αριθμό τοπικών και μητροπολιτικών δικτύων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.4, δημιουργώντας ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο με ιεραρχική αρχιτεκτονική.

Το υψηλότερο επίπεδο αποτελείται, κυρίως, από *broadcast-and-select* οπτικά τοπικά δίκτυα όπου οι χρήστες συνδέονται μοιραζόμενοι μικρό αριθμό οπτικών καναλιών. Το μεσαίο επίπεδο αποτελείται κυρίως από μετροπολιτικά δίκτυα τα οποία με τη σειρά τους αλληλοσυνδέουν πολλαπλά τοπικά δίκτυα παρέχοντας επαναχρησιμοποίηση των καναλιών οπτικού μήκους κύματος με τη χρήση WRNs. Ψηφιακά τοπικά δίκτυα καθώς και μεμονωμένοι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο οπτικό επίπεδο μεταφοράς διαμέσου οπτικών τερματικών συσκευών. Το οπτικό επίπεδο μεταφοράς μπορεί να ενσωματώσει πρωτόκολλα που σήμερα μεταφέρονται από SDH συστήματα όπως ATM, IP κλπ. Η δρομολόγηση WDM καναλιών, αναμένεται να συμπληρώσει και τελικά να υπερκεράσει τα συστήματα SDH παρέχοντας ένα ταχύτερο και πιο αξιόπιστο φυσικό μέσο μεταφοράς. Το οπτικό επίπεδο μεταφοράς, διαμέσου υψηλής χωρητικότητας οπτικά κανάλια, διασυνδέει κυρίως μητροπολιτικά και ευρείας περιοχής δίκτυα.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον στα WRNs αντικατοπτρίζεται στον σχετικά μεγάλο αριθμό πειραμάτων που έγιναν τα τελευταία χρόνια και εξετάζουν την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα τους.



## 2.3 Δίκτυα ΔΜΚ Δρομολόγησης Μήκους Κύματος Single-Hop

Η μεγάλες δυνατότητες της δρομολόγησης οπτικού μήκους κύματος φάνηκαν και από τον μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων, συνεδρίων και περιοδικών με το παραπάνω θέμα. Οι εργασίες αυτές στοχεύουν στην αναγνώριση θεωρητικών και πειραματικών θεμάτων που σχετίζονται με την εφαρμογή των WRONs και να προτείνουν πιθανές λύσεις. Ωστόσο, πολλά θέματα είναι ακόμη ανοιχτά και αναφέρονται παρακάτω.

### 2.3.1 Απαιτούμενα Μήκη Κύματος

Ένα από τα βασικά θέματα στα δίκτυα μεταφοράς (*WRONs*) είναι και ο αριθμός των χωριστών καναλιών που απαιτούνται για τη διασύνδεση των κόμβων, ώστε να ικανοποιείται δεδομένη ζήτηση, και ο οποίος καθορίζει τις παραμέτρους σχεδίασης ενός δικτύου και την πολυπλοκότητα των απαιτούμενων συσκευών.

Τα απαιτούμενα μήκη κύματος έχουν μελετηθεί σε πολλές εργασίες με βάση δυναμικά μεταβαλλόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης όπου οι αιτήσεις μονοπατιών (*lightpath requests*) φτάνουν με τρόπο τυχαίο (*random*) ή βάσει κάποιας στατιστικής πιθανότητας (π.χ. *Poisson*, *uniform* κλπ) έτσι ώστε τα μονοπάτια να δημιουργηθούν και να ελευθερωθούν μόνο κατόπιν ζήτησης [4]. Έτσι, οι απαιτήσεις μήκους κύματος μοιάζουν, αναλογικά, με δρομολόγηση τηλεφωνικού δικτύου όπου κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των συνδέσεων που αποκλείονται δεδομένης της σταθερής χωρητικότητας του δικτύου.

Ο αριθμός των απαιτούμενων οπτικών καναλιών προκύπτει λύνοντας το πρόβλημα της δρομολόγησης και κατανομής μήκους κύματος (*routing and wavelength assignment, or allocation (RWA)*) βελτιστοποιώντας, δηλαδή, την κατανομή και τη δρομολόγηση των καναλιών για δεδομένο σύνολο αιτήσεων σύνδεσης σε δεδομένη φυσική τοπολογία.

Από το παραπάνω προκύπτει ότι ένας βασικός παράγοντας στη σχεδίαση WRONs είναι ο αριθμός από μήκη κύματος, που απαιτείται ώστε να διασυνδεθούν οι κόμβοι του δικτύου και να ικανοποιηθούν δεδομένες απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Το πρόβλημα της δρομολόγησης και κατανομής μήκους κύματος (RWA) [4] ορίζεται ως *NP-complete*, δεν υπάρχει, δηλαδή, worst-case αλγόριθμος RWA που τρέχει σε πολυνομικό χρόνο. Σύμφωνα με το παραπάνω συνάγεται ότι μόνο δίκτυα μικρού μεγέθους μπορούν να σχεδιαστούν αποτελεσματικά.

Επίσης, τα θεωρητικά ανώτατα και κατώτατα όρια προήλθαν από το πρόβλημα της δρομολόγησης *permutation routing (PR)*. Στα δίκτυα PR κάθε κόμβος έχει μόνο ένα laser και ένα δέκτη, ικανό να συντονίζεται στα διάφορα μήκη κύματος κάνοντας τον αποστολέα και παραλήπτη μόνο μίας συνόδου κάθε φορά. Αν και σημαντικές πληροφορίες - όρια προέρχονται από τις αναλύσεις στα δίκτυα PR, οι περιορισμοί που προέρχονται από την φυσική τοπολογία του δικτύου και που είναι σημαντικοί στον υπολογισμό πιο κλειστών ορίων του  $N_\lambda$ , δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η φυσική τοπολογία των WRONs στην οποία η ζήτηση μήκους κύματος πρέπει να απεικονιστεί και η οποία καθορίζει την πολυπλοκότητα των κόμβων δρομολόγησης (OXCs) είναι, ίσως, ο πιο σημαντικός παράγοντας στη σχεδίαση ενός οπτικού δικτύου.

### **2.3.2 Αποκατάσταση Οπτικής Διαδρομής (*Optical Path Restoration*)**

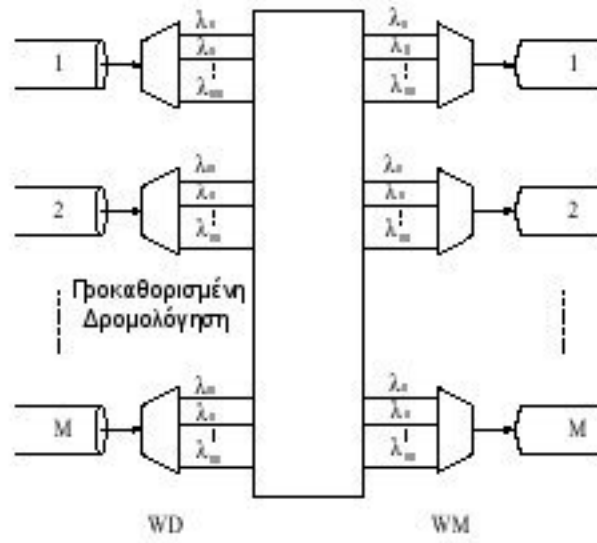
Οι διακοπές των συνδέσεων, λόγω προβλημάτων στα καλώδια, είναι από τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο επηρεάζουν την απόδοση των δικτύων [11], για το λόγο αυτό οι διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων WRON πρέπει αναπτύσσονται έτσι ώστε να επιτρέπουν την αποδοτική αποκατάσταση του οπτικού μονοπατιού. Η στρατηγική που θα ακολουθηθεί είναι κρίσιμη για την μείωση του διαθέσιμου μήκους κύματος και χωρητικότητας ώστε επιτευχθεί αλλαγή δρομολόγησης σε περιπτώσεις αστοχίας συνδέσεων.

Διάφοροι ευρετικοί (*heuristic*) αλγόριθμοι έχουν προταθεί για την κατανομή των οπτικών μονοπατιών ενεργών ή αποκατάστασης. Δύο, κυρίως αρχιτεκτονικές είναι οι επικρατέστερες όπου για κάθε οπτικό μονοπάτι το μήκος κύματος α) πρέπει να είναι το ίδιο ή β) να μπορεί να είναι άλλο από το ενεργό.

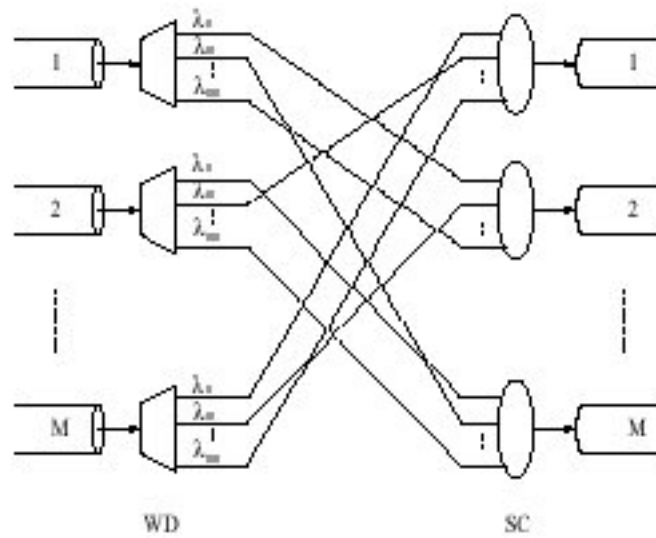
### 2.3.3 Λειτουργία των OCX και Μετατροπή του Οπτικού Μήκους Κύματος.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3, στα οπτικά δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος, τα οπτικά μονοπάτια - διαδρομές μπορεί να διέρχονται διαμέσου ενδιάμεσων οπτικών συνδέσμων (OCXs) ή κόμβων δρομολόγησης WRN. Ένας κόμβος δρομολόγησης συνήθως έχει πολλές εισερχόμενες και εξερχόμενες οπτικές ίνες ή θύρες. Η λειτουργία των κόμβων δρομολόγησης είναι να δρομολογούν τα εισερχόμενα οπτικά μονοπάτια που εισέρχονται από συγκεκριμένες εισόδους με συγκεκριμένα μήκη κύματος προς τις εξόδους ανεξάρτητα από τα άλλα σήματα. Η δρομολόγηση μπορεί να είναι προκαθορισμένη ή δυναμική.

Όταν οι οπτικοί δρομολογητές δεν έχουν την ικανότητα ρύθμισης, κάθε κανάλι ακολουθεί την ίδια διαδρομή στον κόμβο δρομολόγησης, κατά συνέπεια και στο δίκτυο, ώστε η δρομολόγηση να θεωρείται ως προκαθορισμένη (*fixed*). Στην περίπτωση αυτή οι δρομολογητές (WRNs) ονομάζονται προκαθορισμένοι (*fixed WRNs*) και το αντίστοιχο δίκτυο μη επαναπροσδιορίσιμο (*non-configurable*) [3]. Τα λειτουργικά στοιχεία των προκαθορισμένων δρομολογητών φαίνονται στο σχήμα 2.4. Τα εισερχόμενα οπτικά μονοπάτια πρώτα αποπολυπλέκονται, κατόπιν δρομολογούνται ακολουθώντας κάποιο προκαθορισμένο μονοπάτι και τελικά επαναπολυπλέκονται προς τις εξερχόμενες οπτικές ίνες. Όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 2.5 στην περίπτωση που δύο σήματα με το ίδιο μήκος κύματος εισέρχονται στον δρομολογητή από δύο διαφορετικές εισόδους, δεν είναι δυνατό να δρομολογηθούν στην ίδια έξοδο. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται «σύγκρουση» μήκους κύματος (*wavelength collision*) και επιλύεται με την μετατροπή (αλλαγή) ενός από τα δύο σήματα πριν εισέλθει στο στάδιο της πολυπλεξίας.



Σχ. 2.4 Προκαθορισμένος Δρομολογητής (*fixed WRN*)



Σχ. 2.5 Παράδειγμα Προκαθορισμένης Δρομολόγησης  
(WD, wavelength demultiplexer; WM, wavelength multiplexer; SC, star coupler).

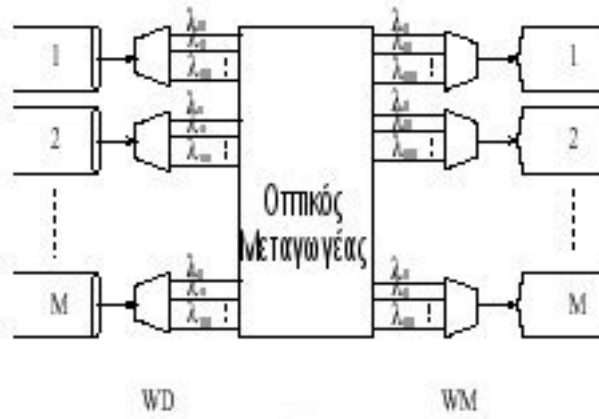
Ωστόσο, όταν η δρομολόγηση είναι προκαθορισμένη, το όφελος της χρήσης εναλλακτών οπτικού μήκους κύματος είναι περιορισμένο εφόσον η κατανομή των μονοπατιών και του μήκους κύματος μπορεί να προκαθοριστεί ώστε να μη υπάρχουν συμπτώσεις.

Όταν η δρομολόγηση είναι δυναμική, όπως προελέχθη, ο πίνακας δρομολόγησης μπορεί να αλλάξει σε περίπτωση αλλαγής της ζήτησης εύρους ζώνης ή για την αποκατάσταση του δικτύου σε περίπτωση αστοχίας κάποιας διασύνδεσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή οπτικών μεταγωγέων μεταξύ του σταδίου πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας. Τα αντίστοιχα δίκτυα καλούνται επαναρυθμίσιμα (*reconfigurable*) [3]. Στην περίπτωση της δυναμικής δρομολόγησης, οι οπτικοί σύνδεσμοι (*OCXs*) αναφέρονται ως οπτικοί σύνδεσμοι επιλεγόμενου μήκους κύματος (*wavelength selective cross-connects (WSXCs)*) όταν στον δρομολογητή δεν περιλαμβάνονται εναλλάκτες μήκους κύματος και οπτικοί σύνδεσμοι εναλλαγής μήκους κύματος (*wavelength interchanging cross-connects (WIXCs)*) όταν η μετατροπή μήκους κύματος είναι δυνατή [20] σχ. 2.6, 2.7. Έτσι, σε αντίθεση με τους *WSXCs* όπου γίνεται αλλαγή εισόδου – εξόδου, οι *WIXCs* έχουν τη δυνατότητα να εναλλάσσουν είσοδο – έξοδο καθώς και μήκος κύματος.

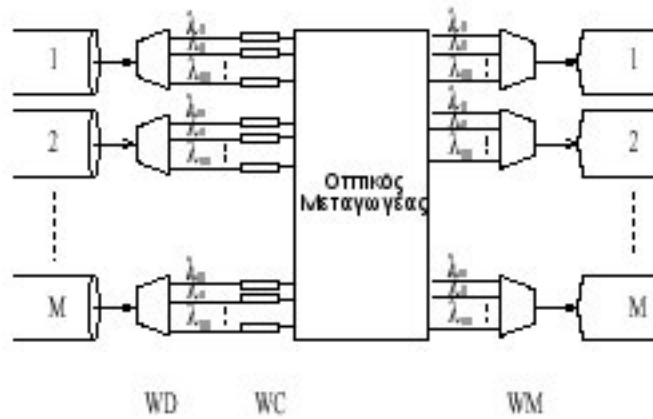
Με στόχο την εξαγωγή του άνω ορίου διασυνδέσεων σε δεδομένο δίκτυο, στην εργασία [13], φαίνεται ότι η προκαθορισμένη δρομολόγηση είναι αποτελεσματική μόνο όταν η ζήτηση εύρους ζώνης είναι γνωστή και δεν μεταβάλλεται. Φαίνεται, έτσι, ότι το πιο σημαντικό πλεονέκτημα των επαναρυθμίσιμων οπτικών συνδέσμων είναι η δυνατότητα που προσδίδουν στο δίκτυο ώστε να προσαρμόζεται στις άγνωστες ανάγκες εύρους ζώνης.

Επιτρέποντας αποτελεσματική αποκατάσταση μονοπατιού σε περίπτωση αστοχίας κάποιας διασύνδεσης, οι επαναπροσδιορίσιμοι οπτικοί σύνδεσμοι είναι το κλειδί στα οπτικά δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος. Πολλές αρχιτεκτονικές για *WSXCs* και *WIXCs* έχουν προταθεί [20] όπως στο σχήμα 2.8 και 2.9 ώστε να προκύψουν οπτικοί σύνδεσμοι κλιμακούμενοι ώστε να υποστηρίζουν την αύξηση των απαιτήσεων. Σημειώνεται, ότι η ικανότητα προσθήκης μεταβλητού αριθμού εισερχομένων και εξερχομένων οπτικών ινών και αριθμού από μήκη κύματος ανά ίνα είναι από τα κρισιμότερα χαρακτηριστικά των οπτικών συνδέσμων (*OCXs*).

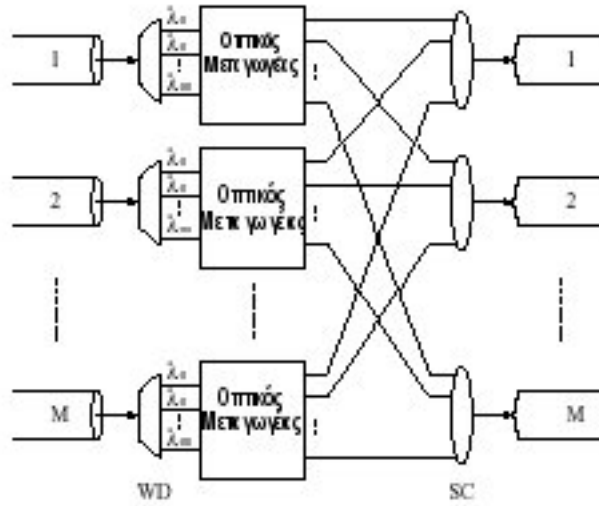
Μειονέκτημα των *WIXCs* είναι ο μεγάλος αριθμός εναλλακτών που απαιτούνται και που ισούται με το γινόμενο του αριθμού εισόδων επί τα μήκη κύματος ( $M \times W$ ).



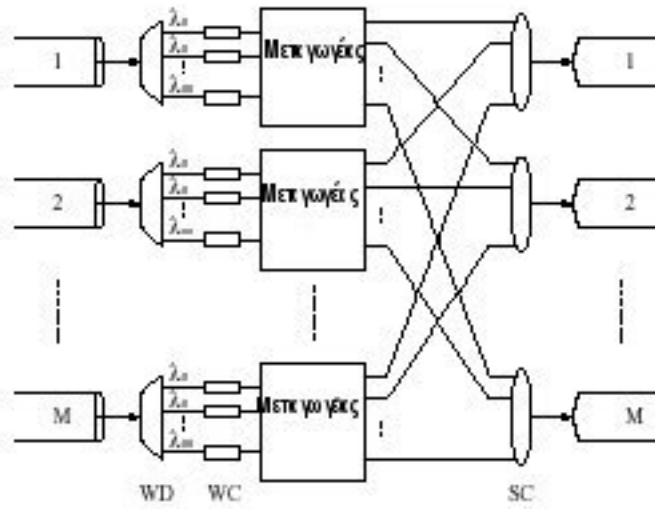
Σχ. 2.6 Επαναπροσδιοριζόμενος Οπτικός Δρομολογητής WSXC



Σχ. 2.7 Επαναπροσδιοριζόμενος Οπτικός Δρομολογητής WIXC  
(WD, wavelength demultiplexer; WM, wavelength multiplexer; WC, wavelength converter)



Σχ. 2.8 Αρχιτεκτονική WSXC



Σχ. 2.9 Αρχιτεκτονική WIXC

### 2.3.4 Εκπομπή Διαιρούμενου Μήκους Κύματος στα Οπτικά Δίκτυα Δρομολόγησης

Η υλοποίηση οπτικών δικτύων δρομολόγησης είναι, επίσης, άμεσα εξαρτημένη από την ικανότητα εκπομπής των οπτικών μονοπατιών διαμέσου ενισχυτών ΠΔΜΚ και συνδέσμων χωρίς πολύπλοκα συστήματα ελέγχου του δικτύου. Η θεωρητική μελέτη εκπομπής ΠΔΜΚ σχεδόν πάντα περιορίζεται στα συστήματα point-to-point ξεχωρίζοντας έτσι από το πρόβλημα της δρομολόγησης και κατανομής μήκους κύματος (*RWA*) [3]. Οι μελέτες εστιάζονται κυρίως σε παραμέτρους εκπομπής όπως σχεδίαση και τοποθέτηση οπτικών ενισχυτών *EDFA*, διαστήματα μεταξύ οπτικών καναλιών, ισχύ καναλιών, μεγιστοποίηση αριθμού καναλιών και απόστασης. Αναγνωρίζεται, ωστόσο, η κρίσιμότητα των περιορισμών που επιβάλλονται από τα χαρακτηριστικά απολαβής (*gain*) των ενισχυτών *EDFA* και τα οποία χαρακτηριστικά σχετίζονται άμεσα με το μήκος κύματος και οδηγούν σε διαφορετικές αποδώσεις. Αν και πολλές προσεγγίσεις έχουν μέχρι σήμερα μελετηθεί με απώτερο στόχο την βελτίωση της επίπεδης απολαβής [20] των *EDFA*, η παραπέρα διερεύνηση είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη μεγάλων οπτικών δικτύων δρομολόγησης μήκους κύματος.

Αν και έχουν αναφερθεί πολλοί αλγόριθμοι κατανομής οπτικών μονοπατιών (*lightpath allocation*) δεν έχει ληφθεί υπόψη η ανάθεση απόλυτου μήκους κύματος από το εύρος ζώνης των *EDFA* [3]. Η ανάθεση απόλυτου μήκους κύματος στα οπτικά μονοπάτια είναι ιδιαίτερα σημαντική στα μεγάλα δίκτυα, όπου κανάλια προστίθενται και αφαιρούνται σε ενδιάμεσους συνδέσμους, ώστε μία μόνο λάθος ανάθεση να έχει σαν αποτέλεσμα αυστηρούς περιορισμούς στην εκπομπή. Προκύπτει, έτσι, από τα παραπάνω, ότι η συνδυασμένη ανάλυση δρομολόγησης και ανάθεσης μήκους κύματος και εκπομπής είναι καθοριστική στη μελέτη αποτελεσματικής εκπομπής σε ένα δίκτυο.



## 2.4 Τοπολογίες Οπτικών Δικτύων

Στα αμιγώς οπτικά δίκτυα (*all-optical networks*) τα «σήματα» παραμένουν στο Οπτικό Επίπεδο Μεταφοράς από την προέλευση έως τον προορισμό περιορίζοντας έτσι την κυκλοφοριακή συμφόρηση που προκαλείται στα ηλεκτρο-οπτικά. Παρότι η παραπάνω προσέγγιση παρέχει δυνατότητες ρυθμών μετάδοσης που πλησιάζουν τους ρυθμούς που οι οπτικές συσκευές επιτρέπουν και που είναι κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτεροι από αυτούς των ηλεκτρονικών δικτύων, στη σχεδίαση οπτικών δικτύων ανακύπτουν σημαντικές προκλήσεις που οφείλουν να αντιμετωπιστούν. Οι αρχιτεκτονικές αμιγώς οπτικών δικτύων που έχουν εξελιχθεί επαρκώς είναι, όπως προαναφέρθηκε, δύο [10] α) *broadcast-and-select* και β) δρομολόγησης οπτικού μήκους κύματος.

Τα *broadcast-and-select* οπτικά δίκτυα είναι ικανά να εξυπηρετήσουν κυρίως τοπικά δίκτυα με μικρό αριθμό χρηστών. Στα *broadcast-and-select* δίκτυα  $N$  κόμβοι αλληλοσυνδέονται διαμέσου ενός  $N \times N$  παθητικού αστέρα (*passive star coupler*) όπου η εκπομπή κάθε κόμβου λαμβάνεται από όλους τους κόμβους του δικτύου. Έτσι, όλες οι παραπάνω συνδέσεις είναι απλού οπτικού βήματος (*single-hop*) καθιστώντας την δρομολόγηση, διαχείριση και τον έλεγχο τους σχετικά απλό.

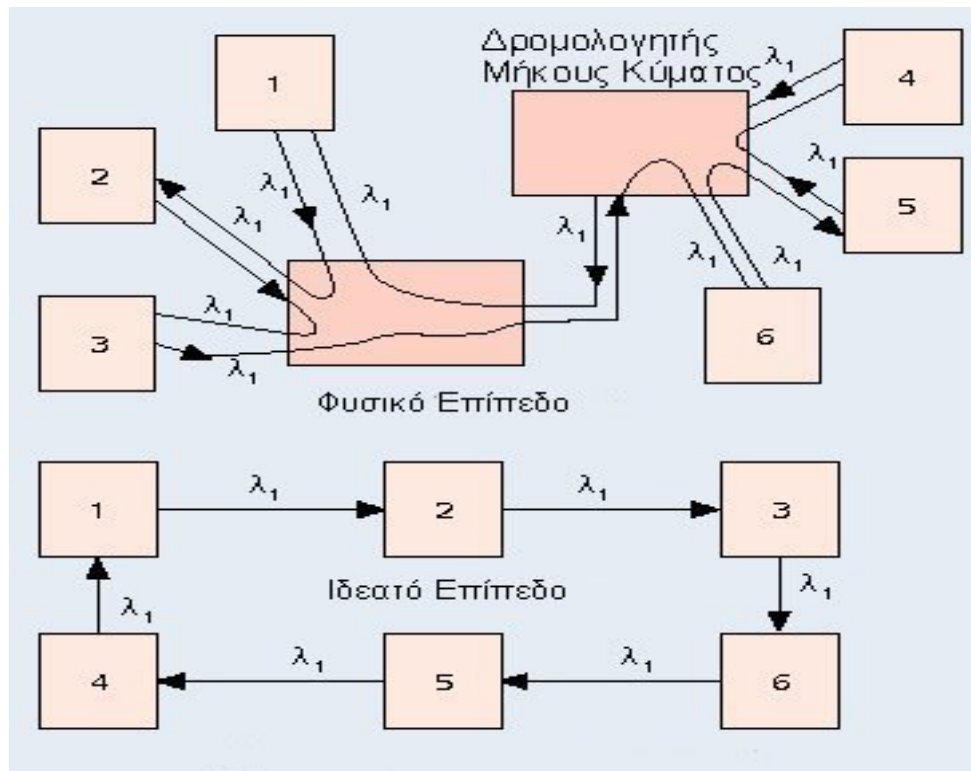
Η αρχιτεκτονική *broadcast-and-select* είναι ανεπαρκής για δίκτυα ευρείας περιοχής κυρίως λόγω της ανικανότητάς μεταγωγής οπτικού μήκους κύματος που έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλή ισχύ του οπτικού σήματος και την αδυναμία επαναχρησιμοποίησης του οπτικού μήκους κύματος. Τα οπτικά δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος εισάγονται στο σημείο αυτό για να καλύψουν τις παραπάνω αδυναμίες.

Ένας οπτικός δρομολογητής είναι ουσιαστικά ένας μεταγωγέας που διαθέτει την ικανότητα να δρομολογεί ένα οπτικό σήμα αναλόγως της θύρας εισόδου του και του μήκους κύματος του και επιπλέον, μπορεί να έχει την ικανότητα να εναλλάσσει το μήκος κύματος του σήματος που δρομολογεί.

### 2.4.1 Ιδεατές και Φυσικές Τοπολογίες

Ένα από τα πλεονεκτήματα των οπτικών δικτύων είναι η μεγάλη ευελιξία ρύθμισης και προσδιορισμού τους κατά διαφορετικούς τρόπους που παρέχουν στους σχεδιαστές δικτύων. Αν και το φυσικό επίπεδο, των οπτικών δικτύων, είναι

προκαθορισμένο, η λογική ή ιδεατή τοπολογία τους μπορεί να μεταβάλλεται αναλόγως της συχνότητας συντονισμού των εκπομπών – δεκτών. Η ιδεατή τοπολογία του δικτύου που φαίνεται στο σχήμα 2.10 διαφέρει δραματικά από την φυσική αντίστοιχη.



Σχ. 2.10 Φυσικό και ιδεατό επίπεδο οπτικού δικτύου δρομολόγησης μήκους κύματος

Στο παραπάνω σχήμα η ιδεατή τοπολογία, τύπου δακτυλίου, με την κατάλληλη ρύθμιση των εκπομπών – δεκτών, ενσωματώνεται σε φυσική τοπολογία αστέρα. Στο σχήμα 2.10 φαίνεται ότι ο κόμβος 1 φτάνει στον κόμβο 3 μετά από ένα μόνο βήμα μέσω του μήκους κύματος  $\lambda_1$  ενώ στον κόμβο 4 φτάνει μετά από δύο βήματα.

Οι πολλαπλού βήματος τοπολογίες οπτικών δικτύων μπορεί να είναι κανονικές ή τυχαίες [28]. Παραδείγματα κανονικών τοπολογιών που έχουν προταθεί αποτελούν και οι : ShuffleNet [28], Manhattan Street Network (2-D Torus) [28], γράφημα de Bruijn [29], GEMNet [30][31], Υπερκύβου (Hypercube) [28], καθώς και «απλές» τοπολογίες Κοινού Διαύλου (Bus), Αστέρα (Star) και Δακτυλίου (Ring). Στις τυχαίες τοπολογίες δεν υπάρχει προκαθορισμένος τρόπος διασύνδεσης και νέοι κόμβοι μπορούν να προστεθούν στους υπάρχοντες. Το Internet είναι ίσως το πιο

χαρακτηριστικό παράδειγμα τυχαίας τοπολογίας όπως τυχαίας τοπολογίας είναι και τα NSFNET, ARPANET, EURONET, TEN-155.

### 2.4.2 Τοπολογίες Κοινού Διαύλου, Δακτυλίου και Αστέρα

Στην τοπολογία κοινού διαύλου κάθε κόμβος διαθέτει δύο εκπομπές και δύο δέκτες συντονισμένους σε σταθερές συχνότητες. Έτσι, ένας εκπομπός του κόμβου  $i$  συνδέεται με ένα δέκτη του κόμβου  $(i + 1)$  και ο άλλος με τον δέκτη του κόμβου  $(i - 1)$ . Ο παραπάνω τρόπος διασύνδεσης ισχύει για όλους τους κόμβους πλην του πρώτου και του τελευταίου που χρησιμοποιούν μόνο ένα εκπομπό και ένα μόνο δέκτη. Η μέσος όρος των βημάτων ενός δικτύου κοινού διαύλου με  $N$  κόμβους είναι  $N/3$  [28].

Αν σε ένα δίκτυο κοινού διαύλου ο ελεύθερος εκπομπός του τελευταίου κόμβου διασυνδεθεί με τους αντίστοιχους του πρώτου, τότε προκύπτει η τοπολογία δακτυλίου και ο μέσος όρος των βημάτων ενός τέτοιου είναι τότε  $N/4$  [28]. Σε ένα δίκτυο τοπολογίας δακτυλίου υπάρχουν δύο ξεχωριστές διαδρομές μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων όταν στην τοπολογία κοινού διαύλου η διαδρομές είναι μοναδικές. Οι τοπολογίες δακτυλίου είναι ελκυστικές για την απλότητά τους και την ευκολία διαχείρισης.

Στις τοπολογίες αστέρα, όλοι οι κόμβοι εκπέμπουν και δέχονται οπτικά σήματα μέσω ενός κεντρικού κόμβου που μπορεί να είναι ένας αστεροειδής συζεύκτης (*star coupler*) ή ένας οπτικός δρομολογητής – μεταγωγέας. Η απόσταση, σε βήματα, μεταξύ δύο κόμβων, σε ένα τέτοιο δίκτυο, είναι πάντα δύο και η διαδρομή μοναδική. Σημειώνεται ότι οι τοπολογίες Κοινού Διαύλου, Δακτυλίου και δενδροειδής απαντώνται συνήθως στο φυσικό παρά στο ιδεατό επίπεδο.

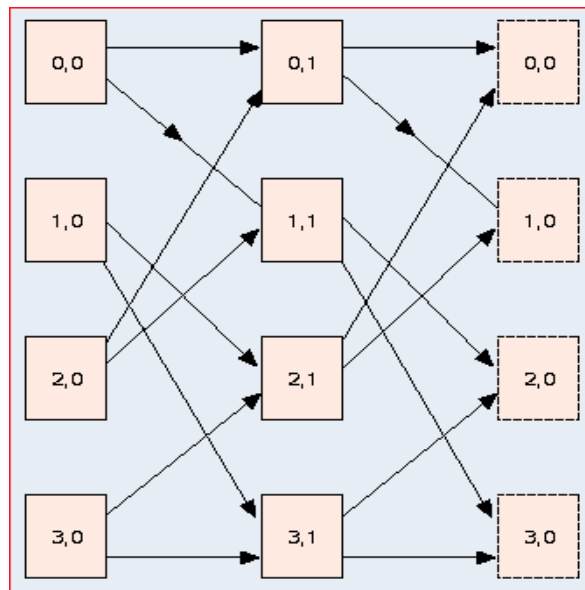
### 2.4.3 *ShuffleNet*

Η τοπολογία *ShuffleNet* προτάθηκε (*Stone 1971*) για να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παράλληλης επεξεργασίας και στην συνέχεια σαν ιδεατή τοπολογία οπτικών δικτύων (*Acampora 1987*) [28]. Ένα δίκτυο  $(p, k)$  τύπου *ShuffleNet* αποτελείται από  $N = kp^k$  κόμβους ( $k = 1, 2, 3, \dots, p = 1, 2, 3, \dots$ ) διευθετημένους σε  $k$  στήλες των  $p^k$  κόμβων με την Νο.  $k$  στήλη συνδεδεμένη με την πρώτη και ο κάθε κόμβος  $(r, c)$  διασυνδέεται με τους κόμβους  $(p.r \bmod p^k, (c + 1) \bmod k)$ ,  $(p.r \bmod p^{k+1}, (c + 1) \bmod k) \dots (p.r \bmod p^{k+p}, (c + 1) \bmod k)$ . Η τοπολογία *ShuffleNet*, όπως

φαίνεται και στο σχήμα 2.11, είναι συμμετρική και ομογενής. Η μέση απόσταση  $\bar{h}$ , σε βήματα, μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων σε ένα δίκτυο  $(p, k)$  δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{h} = \frac{k p^k (p-1)(3k-1) - 2k(p^k - 1)}{2(p-1)(k p^k - 1)}$$

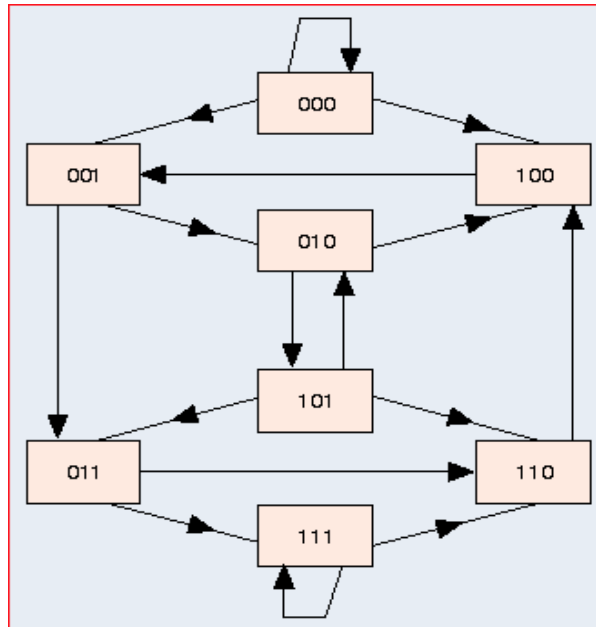
και η διάμετρος του δικτύου  $2k - 1$ .



Σχ. 2.11 Δίκτυο *ShuffleNet* 8 κόμβων ( $p=2, k=2$ )

#### 2.4.4 Γράφημα *de Bruijn*

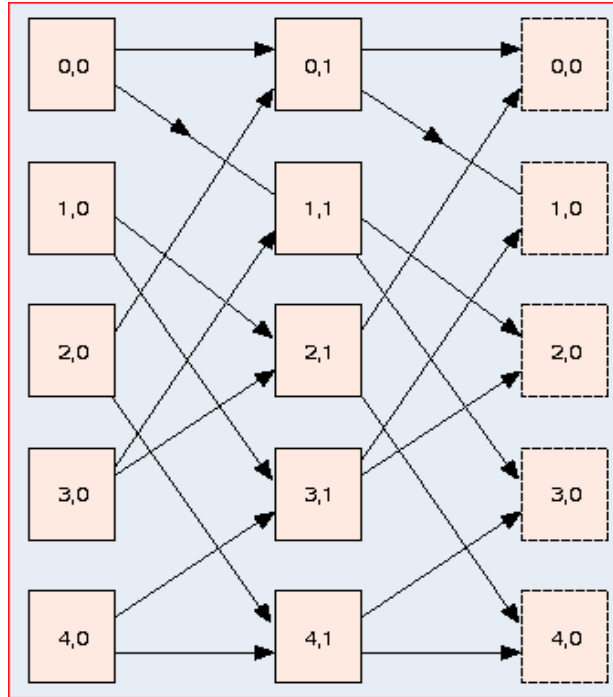
Ο τρόπος διασύνδεσης της τοπολογίας προτάθηκε το 1949 από τον *De Bruijn*. Στις εργασίες [29] και [32] γράφημα *De Bruijn* προτάθηκε σαν ιδεατή τοπολογία οπτικών δικτύων. Το γράφημα *De Bruijn*  $G(D, D)$  [28] περιέχει το σύνολο των κόμβων  $(0, 1, 2, \dots, D)^D$  όπου κάθε κόμβος αναπαριστάται με  $D$  ψηφία κάθε ένα εκ των οποίων παίρνει τιμές  $0, 1, 2, \dots, D$ . Κάθε κόμβος έχει βαθμό εισόδου και εξόδου  $D$  και  $D$  κόμβοι έχουν βρόγχους. Από κάθε κόμβο  $(a_1, a_2, \dots, a_D)$  υπάρχει κατευθυνόμενη ακμή προς τους κόμβους  $(b_1, b_2, \dots, b_D)$  όταν και μόνο όταν  $b_i = a_{i+1}$  για  $1 \leq i \leq D-1$ . Το σύνολο των κόμβων είναι ίσο με  $D^D$ , η διάμετρος του δικτύου είναι ίση με  $D$  και υπάρχουν μόνο ανώτατα και κατώτατα όρια για τη μέση απόσταση  $\bar{h}$ .



Σχ. 2.12 Γράφημα de Bruijn

## 2.4.5 GEMNet

Η τοπολογία GEMNet προτάθηκε τα τελευταία χρόνια και ανήκει στην τάξη των αρχιτεκτονικών που ανήκουν και οι τοπολογίες ShuffleNet (σχήμα 2.11) και de Bruijn (σχήμα 2.12) [28][30][31]. Σε ένα δίκτυο GEMNet  $(K, M, p)$ , με βαθμό κόμβων (*nodal degree*)  $p$ ,  $N = (K \cdot M)$  κόμβοι είναι διευθετημένοι σε  $K$  στήλες ( $K \geq 1$ ) και  $M$  σειρές ( $M \geq p$ ) (σχήμα 2.13). Ένας κόμβος  $a$  ( $a = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ) βρίσκεται στη στήλη  $c$  ( $c = 0, 1, 2, \dots, K - 1$ ) και σειρά  $r$  ( $r = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ ) [28]. Αντίθετα με τα δίκτυα ShuffleNet και de Bruijn, ο αριθμός των κόμβων  $M$  σε μια στήλη, δεν περιορίζεται στους  $p^K$ . Η διάμετρος  $D$  ενός δικτύου GEMNet δίνεται από τον τύπο  $D = \lceil \log_p M \rceil + K - 1$  και η μέση απόσταση, σε βήματα, μπορεί να υπολογιστεί μόνο ως προς τα ανώτατα και κατώτατα όρια [31].



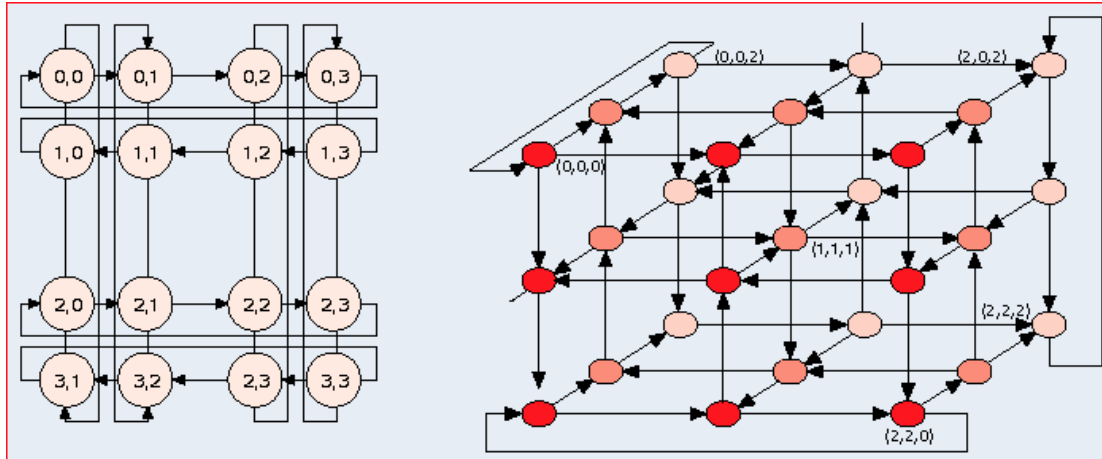
Σχήμα 2.13 Δίκτυο GEMNet

## 2.4.6 Manhattan Street Network ή Torus Δύο Διαστάσεων

Τα δίκτυα τύπου Manhattan Street αναπτύχθηκαν από τον Maxemchuck το 1985 [28] και μοιάζουν με απεικόνιση των οδών και των λεωφόρων του Manhattan. Σε κάθε κόμβο υπάρχουν δύο εισερχόμενες και δύο εξερχόμενες διασυνδέσεις δημιουργώντας ένα λογικό πλέγμα στο οποίο γειτονικές στήλες ή γειτονικές σειρές έχουν αντίθετο προσανατολισμό. Ο μέσος αριθμός βημάτων  $\bar{h}$  ενός δικτύου Manhattan Street με  $N = (m \times n)$  κόμβους ( $m$  σειρές,  $n$  στήλες) [3] μπορεί να υπολογιστεί από τους τύπους :

$$\begin{aligned} \bar{h} &= \frac{[N/4(m+n+4) - n - 4]}{N-1}, & \text{για άρτιο } m/2 \text{ και περιττό } n/2, \\ &= \frac{[N/4(m+n+4) - n]}{N-1}, & \text{για άρτιο } m/2 \text{ και άρτιο } n/2, \\ &= \frac{[N/4(m+n+4) - m - n - 4]}{N-1}, & \text{για περιττό } m/2 \text{ και περιττό } n/2. \end{aligned}$$

Ωστόσο, για μεγάλο  $N$  και  $m = n$ ,  
 $\bar{h} = \sqrt{N}$ .

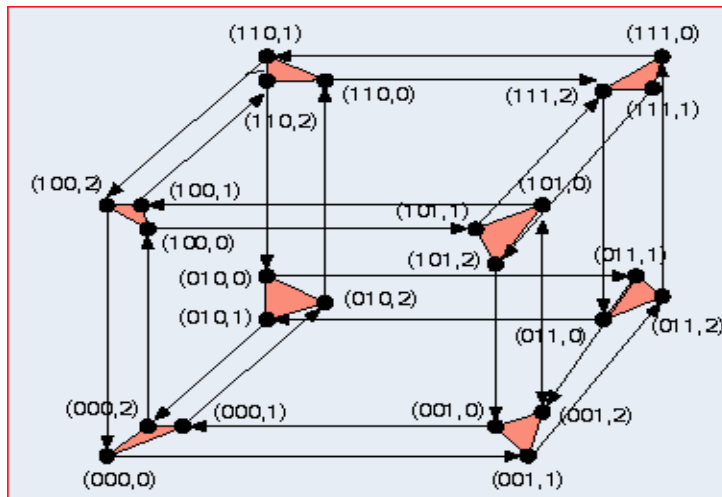


Σχήμα 2.14 α) Manhattan Street (2-D Torus) δίκτυο 16 κόμβων (4 x 4) β) Τριών διαστάσεων 3 x 3 x 3 Torus.

### 2.4.7 Υπερκύβος (Hypercube)

Οι δυαδικοί ( $p=2$ ) υπερκύβοι έχουν, εκτεταμένα, μελετηθεί ως αρχιτεκτονικές διασύνδεσης πολυεπεξεργαστικών συστημάτων λόγω των, ικανών να υποστηρίξουν παράλληλους αλγορίθμους, δομικών ιδιοτήτων τους. Στη συνέχεια προτάθηκαν για χρήση σε δίκτυα υπολογιστών [3]. Ένας υπερκύβος  $n$  διαστάσεων με βαθμό κόμβων  $p$  αποτελείται από  $p^n$  κόμβους. Οι κόμβοι αριθμούνται με αριθμούς βάσης- $p$  και δύο κόμβοι,  $i$  και  $j$ , συνδέονται με αμφίδρομο σύνδεσμο μόνο εάν ο αριθμός τους διαφέρει μόνο κατά ένα αριθμό των συντεταγμένων του π.χ. ο κόμβος  $(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_i, \dots, x_0)_{\text{base } p}$  συνδέεται με τον κόμβο  $(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_i, \dots, x_0)_{\text{base } p}$  εάν  $(x \neq \underline{x})$ ,  $0 \leq i < n$ . Κατ' αυτό τον τρόπο ο βαθμός των κόμβων ισούται με  $n(p-1)$ .

Οι υπερκύβοι, αν και αποτελούν μία από τις τοπολογίες των οπτικών δικτύων, δεν θεωρούνται πρακτικοί λόγω της αύξησης του βαθμού κόμβων όσο αυξάνει ο το μέγεθος του δικτύου. Ο μέσος αριθμός βημάτων ενός δικτύου τοπολογίας υπερκύβου  $n$  διαστάσεων και  $p$  βαθμού κόμβων ισούται με  $n(1-p^{-1})$  ενώ μειώνεται σε  $n/2$  όταν πρόκειται για δυαδικό ( $p=2$ ) υπερκύβο.



Σχ. 2.15 Υπερκύβος 24 κόμβων



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Υπόβαθρο Δρομολόγησης και Κατανομής Οπτικού Μήκους Κύματος

#### 3.1 Δίκτυα Δρομολόγησης Οπτικού Μήκους Κύματος

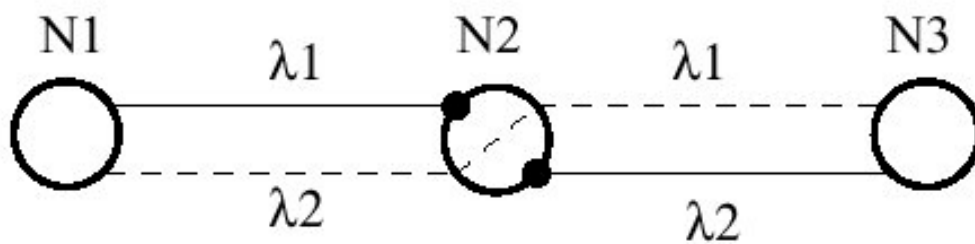
Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των οπτικών δικτύων, μια σειρά οπτικών στοιχείων, όπως προαναφέρθηκε, έχουν γίνει διαθέσιμα στους σχεδιαστές δικτύων ΔΜΚ. Με τη χρήση τέτοιων στοιχείων είναι δυνατή η δρομολόγηση δεδομένων προς τους προορισμούς τους με βάση το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπονται. Έτσι, στα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος, κάθε σύνδεση μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων γίνεται μέσω ενός μονοπατιού και χρησιμοποιώντας μήκος κύματος τέτοιο που οι συνδέσεις, των οποίων τα μονοπάτια έχουν κοινούς συνδέσμους, να χρησιμοποιούν διαφορετικά μήκη κύματος. Μέσω των οπτικών μονοπατιών επικοινωνίας δύο κόμβων μπορεί να δρομολογηθούν οπτικά μήκη κύματος για την δημιουργία δικτύων ευρείας περιοχής (WAN) καθώς και μητροπολιτικά (MAN) δίκτυα. Τα παραπάνω δίκτυα δρομολόγησης οπτικού μήκους κύματος (ΔΜΚ), σε σχέση με τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που χρησιμοποιούν ψηφιακά συστήματα διασύνδεσης, προσφέρουν το πλεονέκτημα της διαφάνειας πρωτοκόλλου, της απλής διαχείρισης και επεξεργασίας [20].

Τα θέματα προς διερεύνηση στα οπτικά δίκτυα ΔΜΚ μπορούν, γενικότερα, να κατηγοριοποιηθούν σε: θέματα σχεδίασης και σε θέματα λειτουργίας. Το πρόβλημα της σχεδίασης είναι, γενικότερα, πρόβλημα βελτιστοποίησης [4], [14] με παραμέτρους τη στατική ζήτηση εύρους ζώνης, την τοπολογία του δικτύου και ειδικές απαιτήσεις όπως αξιοπιστία, χρόνος αποκατάστασης του δικτύου κλπ. Στόχος της βελτιστοποίησης μπορεί να αποτελεί η ελαχιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων πόρων συμπεριλαμβανομένου του αριθμού από τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται, του αριθμού των οπτικών ινών ή του αριθμού των θυρών των οπτικών συνδέσμων που χρειάζονται για να καλυφθούν οι απαιτήσεις του δικτύου. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι ο τρόπος στησίματος του δικτύου και η διαδρομή με το αντίστοιχο μήκος κύματος. Το πρόβλημα της σχεδίασης μπορεί να οριστεί σαν πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP) ή μεικτού γραμμικού

προγραμματισμού (MILP). Επειδή ο αριθμός των μεταβλητών και των περιορισμών μπορεί να είναι πολύ μεγάλος, συνήθως χρησιμοποιούνται ευρετικοί αλγόριθμοι για την εύρεση γρήγορων λύσεων.

Ένα από τα κρίσιμα προβλήματα, μετά το στήσιμο ενός δικτύου, είναι η λειτουργία του έτσι ώστε η απόδοσή του να είναι η βέλτιστη σε συνθήκες δυναμικά μεταβαλλόμενων απαιτήσεων εύρους ζώνης. Καθώς οι αιτήσεις φτάνουν και αναχωρούν τυχαία, η ένταση της δυναμικά μεταβαλλόμενης απαίτησης εύρους ζώνης είναι συνήθως γνωστή. Επειδή, όμως, οι πόροι του δικτύου δεν είναι επαρκείς ώστε η εξυπηρέτηση κάθε δυναμικού αιτήματος εύρους να είναι εγγυημένη, η μέση πιθανότητα αποκλεισμού για δεδομένο ποσοστό εκμετάλλευσης (*utilization*) αποτελεί ένα από τα μεγέθη μέτρησης της απόδοσης ενός δικτύου. Μεγέθη μέτρησης, επίσης, αποτελούν και η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων και ο φόρτος ελέγχου ενός δικτύου (*control overhead*.)

Στα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος WDM, η διαδρομή του σήματος καθορίζεται από την τοποθεσία του εκπομπού, το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται και την κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι συσκευές του δικτύου. Ένα τέτοιο δίκτυο με δύο μήκη κύματος σε κάθε σύνδεσμο φαίνεται στο σχήμα 3.1



Σχ. 3.1 Περιορισμός συνέχειας μήκους κύματος σε διαδρομή δύο βημάτων.

Στο παραπάνω δίκτυο υπάρχουν δύο σύνοδοι σε εξέλιξη, μία από τον κόμβο N1 προς τον κόμβο N2 με μήκος κύματος  $\lambda_1$  και μία από τον κόμβο N2 προς τον N3 με μήκος κύματος  $\lambda_2$ . Μία πιθανή αίτηση διασύνδεσης από τον N1 προς τον N3, αν και υπάρχουν ελεύθερα μήκη κύματος στους δύο συνδέσμους, εξ αιτίας του περιορισμού συνέχειας που προϋποθέτει το ίδιο μήκος κύματος σε όλο το μήκος της διαδρομής, πρέπει να αποκλειστεί.

### 3.2 Αλγόριθμοι Δρομολόγησης

Όταν σε ένα οπτικό δίκτυο δημιουργείται μία σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης και κατανομής οπτικού μήκους κύματος είναι υπεύθυνοι για την επιλογή της διαδρομής και του μήκους κύματος ανάμεσα από πολλές πιθανές αντίστοιχες. Οι παραπάνω αλγόριθμοι είναι κρίσιμοι για την βελτίωση της απόδοσης των δικτύων πολυπλεξίας διαιρούμενου οπτικού μήκους κύματος (WDM). Εκτεταμένες μελέτες των αλγόριθμων δρομολόγησης έχουν γίνει για τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος (*circuit-switched*) [10] και μεταγωγής πακέτων (*packet-switched*) [2,11]. Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης μπορούν, γενικότερα, να κατηγοριοποιηθούν σε αλγόριθμους στατικής δρομολόγησης και σε αλγόριθμους δυναμικής δρομολόγησης. Στη στατική δρομολόγηση οι διαδρομές μεταξύ κόμβων είναι προκαθορισμένες και παραμένουν αμετάβλητες ανεξαρτήτως της κατάστασης του δικτύου. Στους αλγόριθμους στατικής δρομολόγησης ανήκουν οι αλγόριθμοι δρομολόγησης σταθερής διαδρομής (*fixed path routing FPR*) και οι αλγόριθμοι δρομολόγησης εναλλακτικής διαδρομής (*alternate path routing APR*). Στην δυναμική δρομολόγηση, οι διαδρομές μεταξύ κόμβων επιλέγονται ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται το δίκτυο. Τυπικό παράδειγμα δυναμικής δρομολόγησης είναι η δρομολόγηση της λιγότερο κορεσμένης διαδρομής (*least-congestion routing LCR*). Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι δρομολόγησης έχουν προταθεί κατ' αρχήν σε δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και κατόπιν εφαρμόστηκαν σε οπτικά δίκτυα WDM.

Οι αλγόριθμοι σταθερής διαδρομής θεωρούνται οι απλούστεροι από όλους και χάριν της απλότητάς τους χρησιμοποιούνται σε πολλές εργασίες και αναλυτικά μοντέλα αλγόριθμων κατανομής μήκους κύματος. Ωστόσο, η απλότητα τους και η ύπαρξη μίας μόνο διαδρομής για κάθε ζεύγος κόμβων, έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της απόδοσης του δικτύου και κάθε αίτημα διασύνδεσης αποκλείεται όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο μήκος κύματος. Η δρομολόγηση εναλλακτικής διαδρομής, όπου υπάρχουν περισσότερες από μία υποψήφιες διαδρομές, όπως αποδεικνύεται στις εργασίες [15] [21] [24], βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του δικτύου σε σχέση με τη δρομολόγηση σταθερής διαδρομής. Ωστόσο, οι υποψήφιες διαδρομές και η σειρά τους είναι προκαθορισμένες και δεν λαμβάνεται υπόψη η

κατάσταση του δικτύου. Τέλος, η απόδοση των στατικών αλγορίθμων δεν μπορεί να βελτιωθεί επιπλέον. Η δρομολόγηση της λιγότερο κορεσμένης διαδρομής, που λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, επιλέγει τη λιγότερο κορεσμένη διαδρομή ώστε να δημιουργηθεί η σύνδεση. Τα αποτελέσματα στην εργασία [22] δείχνουν ότι, σε δίκτυα mesh-torus, η πιθανότητα αποκλεισμού, που προκύπτει από τη χρήση δρομολόγησης της λιγότερο κορεσμένης διαδρομής, είναι από ένα έως δύο βαθμούς μικρότερη από αυτή της δρομολόγησης εναλλακτικής διαδρομής.

### **3.3 Αλγόριθμοι Κατανομής Οπτικού Μήκους Κύματος**

Το πρόβλημα της κατανομής μήκους κύματος είναι ιδιαίτερο πρόβλημα που απασχολεί τα δίκτυα WDM. Σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος, το ίδιο μήκος κύματος πρέπει να είναι διαθέσιμο σε όλους τους συνδέσμους μίας διαδρομής έτσι ώστε να επιτευχθεί διασύνδεση στα οπτικά δίκτυα WDM που δεν διαθέτουν εναλλάκτες μήκους κύματος. Όταν σε κάθε κόμβο υπάρχουν εναλλάκτες μήκους κύματος το πρόβλημα της κατανομής μπορεί να χαρακτηριστεί ως «τετριμμένο». Ωστόσο, η τεχνολογία των εναλλακτών οπτικού μήκους κύματος δεν μπορεί να θεωρηθεί, ακόμα, ως ώριμη και οι εναλλάκτες, στο άμεσο μέλλον, αναμένεται να είναι υψηλού κόστους ώστε αποδοτικοί αλγόριθμοι κατανομής οπτικού μήκους κύματος σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους δρομολόγησης είναι κρίσιμοι για την απόδοση και το κόστος ενός τέτοιου δικτύου.

Οι αλγόριθμοι κατανομής οπτικού μήκους κύματος μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: στους αλγόριθμους που έχουν προταθεί για δίκτυα πολλαπλών οπτικών ινών και σε αντίστοιχους για δίκτυα απλής οπτικής ίνας.

#### **3.3.1 Απλής Οπτικής Ίνας**

Οι παρακάτω αλγόριθμοι έχουν προταθεί για δίκτυα απλής οπτικής ίνας:

1. Τυχαίας Κατανομής (*Random* ή *R*) : Ο αλγόριθμος τυχαίας κατανομής επιλέγει το οπτικό μήκος κύματος τυχαία από τα διαθέσιμα και σύμφωνα με κανονική στατιστική κατανομή.
2. Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit* ή *FF*) : Υποθέτοντας ότι τα μήκη κύματος είναι τυχαία διατεταγμένα π.χ.  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w$ , όπου  $w$  ο μέγιστος αριθμός από μήκη κύματος ανά οπτική ίνα, ο αλγόριθμος ελέγχει με τη σειρά την κατάσταση (διαθέσιμο ή μη) του κάθε μήκους και επιλέγει το πρώτο διαθέσιμο.
3. Περισσότερο Χρησιμοποιούμενου (*Most-Used* ή *MU*) : Επιλέγεται το διαθέσιμο μήκος κύματος που χρησιμοποιείται στους περισσότερους συνδέσμους του δικτύου.
4. Ελάχιστα Χρησιμοποιούμενου (*Least-Used* ή *LU*) : Επιλέγεται το διαθέσιμο μήκος κύματος που χρησιμοποιείται στους λιγότερους συνδέσμους του δικτύου.

Λόγω της απλότητας του, ο αλγόριθμος τυχαίας κατανομής οπτικού μήκους κύματος χρησιμοποιείται ευρέως σε αναλυτικές μεθόδους. Ωστόσο, επειδή τα χρησιμοποιημένα μήκη κύματος είναι τυχαία κατανεμημένα και «ανακατεμένα» με τα ελεύθερα, είναι δύσκολο σε μία αίτηση διασύνδεσης να εντοπίσει ελεύθερο μήκος κύματος σε διαδοχικούς συνδέσμους από τον κόμβο προέλευσης προς τον κόμβο προορισμού ( $s-d$ ). Ο αλγόριθμος του ελάχιστα χρησιμοποιούμενου προσπαθεί να δρομολογήσει μία διασύνδεση στο μήκος κύματος που έχει το μικρότερο ποσοστό εκμετάλλευσης ώστε να επιτευχθεί κανονική στατιστική κατανομή του φόρτου στην ομάδα από τα μήκη κύματος. Τα αποτελέσματα στη εργασία [23] δείχνουν ότι ο αλγόριθμος τυχαίας κατανομής και του ελάχιστα χρησιμοποιούμενου κατανέμουν το φόρτο ομοιόμορφα σε όλα τα μήκη κύματος. Οι αλγόριθμοι του πρώτου διαθέσιμου και του περισσότερο χρησιμοποιούμενου μήκους κύματος προσπαθούν να συγκεντρώσουν τις διασυνδέσεις όλες μαζί ώστε να χρησιμοποιηθούν λιγότερα μήκη κύματος και να παραμείνουν περισσότερα ελεύθερα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στις εργασίες [19][23][25] δείχνουν ότι η πιθανότητα αποκλεισμού των αλγορίθμων τυχαίας κατανομής και του ελάχιστα χρησιμοποιούμενου οπτικού μήκους κύματος είναι μεγαλύτερη από αυτή των αλγορίθμων πρώτου διαθέσιμου και του περισσότερο χρησιμοποιούμενου. Ο αλγόριθμος τυχαίας κατανομής παρουσιάζει παρόμοια αλλά καλύτερη απόδοση από τον αλγόριθμο του ελάχιστα χρησιμοποιούμενου μήκους κύματος. Η πιθανότητα αποκλεισμού, του συνδυασμού του αλγορίθμου του πρώτου ελεύθερου μήκους κύματος με τον αλγόριθμο

δρομολόγησης σταθερής διαδρομής, είναι σημαντικά μικρότερη από την πιθανότητα που προκύπτει με τον αλγόριθμο τυχαίας κατανομής οπτικού μήκους κύματος. Ο, δε, ο αλγόριθμος του περισσότερου χρησιμοποιούμενου έχει καλύτερη απόδοση από τους δύο προηγούμενους [25].

### 3.3.2 Πολλαπλών Οπτικών Ινών

Με την εξέλιξη των δικτύων και της τεχνολογίας των οπτικών, όλο και περισσότεροι ερευνητές αντιλήφθηκαν ότι ένα δίκτυο μίας και μόνο οπτικής ίνας δεν έχει την χωρητικότητα να υποστηρίξει την ραγδαία αύξηση απαιτήσεων εύρους ζώνης και είναι γεγονός ότι σχεδόν όλα τα υπάρχοντα οπτικά δίκτυα είναι πολλαπλών οπτικών ινών. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα της συνέχειας μήκους κύματος, απαλύνεται με την μεταγωγή του μήκους κύματος, που δεν μπορεί να συνεχίσει σε μία οπτική ίνα, σε κάποια άλλη εφόσον, βέβαια, είναι διαθέσιμο. Η παρούσα εργασία εξετάζει και την επίδραση που έχουν οι πολλαπλές ίνες στην απόδοση ενός οπτικού δικτύου. Αν και οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι κατανομής οπτικού μήκους κύματος εφαρμόζονται σε δίκτυα απλής οπτικής ίνας και σε δίκτυα πολλαπλών οπτικών ινών, επιπλέον μέθοδοι έχουν προταθεί:

1. Ελάχιστου Φόρτου (*Least-loaded ή LL*): Ο αλγόριθμος που προτάθηκε στην εργασία [25] επιλέγει το μήκος κύματος που έχει τη μεγαλύτερη υπολειπόμενη χωρητικότητα στον σύνδεσμο με τον μεγαλύτερο φόρτο κατά μήκος της διαδρομής.
2. Ελάχιστου Αθροίσματος (*Minimum Sum ή MS*): Ο αλγόριθμος που προτάθηκε στην εργασία [25] επιλέγει το μήκος κύματος που έχει το χαμηλότερο μέσο όρο ποσοστού εκμετάλλευσης.
3.  $M\Sigma$  : ο αλγόριθμος  $M\Sigma$  που παρουσιάστηκε στην εργασία [26] επιλέγει το μήκος κύματος που αφήνει το δίκτυο σε «καλή» κατάσταση για μελλοντικά αιτήματα. Το πόσο «καλή» είναι η κατάσταση ενός δικτύου μπορεί να μετρηθεί με ένα νέο δείκτη που αναφέρεται ως «αξία» (*value*) ενός δικτύου. Η συνάρτηση αξίας  $V(\alpha)$  της κατάστασης  $\alpha$  που βρίσκεται ένα δίκτυο μετά από αίτημα, είναι ουσιαστικά συνάρτηση που απεικονίζει τη χωρητικότητα των διαδρομών ενός δικτύου π.χ.

$V(a) = g([C(a, p) : p : P])$  όπου  $P$  το σύνολο όλων των πιθανών διαδρομών και  $C(a, p)$  η χωρητικότητα του  $p$  σε τυχαία κατάσταση  $\emptyset$ .

4. Σχετικής Απώλειας Χωρητικότητας (*Relative Capacity Loss* ή *RCL*) : ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στην εργασία [27] επιλέγει το μήκος κύματος που μειώνει την σχετική απώλεια χωρητικότητας. Η σχετική απώλεια χωρητικότητας, μίας διαδρομής  $p$  στο μήκος κύματος  $\lambda$ ,  $R_c(p, \lambda)$  ορίζεται ως :

$$R_c(p, \lambda^*) = \frac{P_c(p, \lambda^*) - P_c(p, \lambda^*)}{\sum_{\lambda} P_c(p, \lambda)}$$

όπου  $P_c(p, \lambda)$  η χωρητικότητα της διαδρομής  $p$  και κύματος  $\lambda$  [27].

Τα αποτελέσματα στην εργασία [25] δείχνουν ότι οι αλγόριθμοι Ελάχιστου Φόρτου και Ελάχιστου Αθροίσματος αποδίδουν καλύτερα από τους αλγόριθμους Τυχαίας Κατανομής, Πρώτου Διαθέσιμου και Περισσότερο Χρησιμοποιούμενου μήκους κύματος. Ο  $M\sum$  στην εργασία [26], με κόστος τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, έχει καλύτερα αποτελέσματα από όλους τους άλλους πλην του αλγόριθμου Σχετικής Απώλειας Χωρητικότητας. Η πιθανότητα αποκλεισμού που προκύπτει από τη χρήση του αλγόριθμου Σχετικής Απώλειας Χωρητικότητας, ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, παρουσιάζεται ως 5% - 30% μικρότερη από τον  $M\sum$  [27].

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Οι Αλγόριθμοι και τα Δίκτυα

Μία από τις κύριες απαιτήσεις των αμιγώς οπτικών δικτύων Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Μήκους Κύματος (*WDM*), όπως έχει ήδη προαναφερθεί, είναι η απαίτησή της χρήσης ίδιου μήκους κύματος σε όλους τους συνδέσμους μιας διαδρομής όταν στους κόμβους δρομολόγησης δεν υπάρχουν εναλλάκτες. Λόγω, λοιπόν, του περιορισμού συνέχειας που ισχύει, ένα αίτημα διασύνδεσης έχει μεγαλύτερη πιθανότητα αποκλεισμού σε ένα οπτικό δίκτυο ΠΔΜΚ παρά σε αντίστοιχο μεταγωγής κυκλώματος (*circuit-switched*) [16]. Για το λόγο αυτό η δρομολόγηση και η κατανομή οπτικού μήκους κύματος είναι κρίσιμη στα δίκτυα ΠΔΜΚ [3][20]. Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει την χρήση των αλγορίθμων της συντομότερης διαδρομής (*Shortest Path* ή *SP*) και της εναλλακτικής συντομότερης διαδρομής (*Alternate Shortest Path* ή *ASP*) [7][10][15][16][19][22][24][25]. Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης της συντομότερης διαδρομής και της εναλλακτικής διαδρομής βασίζονται σε στατικές προκαθορισμένες διαδρομές (*fixed-path*) και δεν λαμβάνουν υπόψη τους την εκάστοτε κατάσταση του δικτύου. Σε αντίθεση, στις εργασίες [10][15][24][25][35] παρουσιάζονται μέθοδοι δυναμικής δρομολόγησης στις οποίες ο φόρτος του κάθε κόμβου του δικτύου αποτελεί βασική παράμετρο. Στην εργασία [23] η μέθοδος δρομολόγησης εξετάζεται σε συνδυασμό με μεθόδους κατανομής μήκους κύματος.

Αλγόριθμοι της λιγότερο κορεσμένης διαδρομής (*Least Loaded Routing LLR* ή *Least Congested Routing LCR*) παρουσιάζονται στις εργασίες [16] και [35] ως μέθοδοι δυναμικής δρομολόγησης. Το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται στους παραπάνω αλγόριθμους είναι η μεγαλύτερη καθυστέρηση στον προσδιορισμό της διαδρομής καθώς και μεγαλύτερος επεξεργαστικός φόρτος για τον έλεγχο της κατάστασης του δικτύου συμπεριλαμβανομένης, μερικές φορές, της εισαγωγής κεντρικού κόμβου ελέγχου της κατάστασης ολοκλήρου του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνονται οι στατικοί αλγόριθμοι της συντομότερης διαδρομής (*SP*) και της εναλλακτικής συντομότερης διαδρομής (*ASR*) καθώς και ο δυναμικός αλγόριθμος δρομολόγησης της λιγότερο κορεσμένης διαδρομής (*LLR*).



Η κατανομή μήκους κύματος είναι ένα άλλο μοναδικό πρόβλημα των οπτικών δικτύων. Αλγόριθμοι για την κατανομή μήκους κύματος και την βελτίωση της απόδοσης ενός δικτύου προτάθηκαν στις εργασίες [25][26][36].

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται και εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι :

1. Τυχαίας Κατανομής (Random Assignment) : Το μήκος κύματος που ορίζεται στην εκάστοτε κλήση επιλέγεται τυχαία από τα διαθέσιμα.
2. Πρώτου Διαθέσιμου (First-Fit Assignment) : Από μία σειρά επιλέγεται το πρώτο που είναι διαθέσιμο [19].

Στην εργασία [17] παρουσιάζεται πρωτόκολλο δέσμευσης (*reservation protocol*) και ελέγχου του δικτύου. Το πρωτόκολλο δέσμευσης που παρουσιάζεται χρησιμοποιεί μέθοδο εκκίνησης των δεσμεύσεων από την αφετηρία (*source initiated reservation*). Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιείται στην προσομοίωση που ακολουθεί.

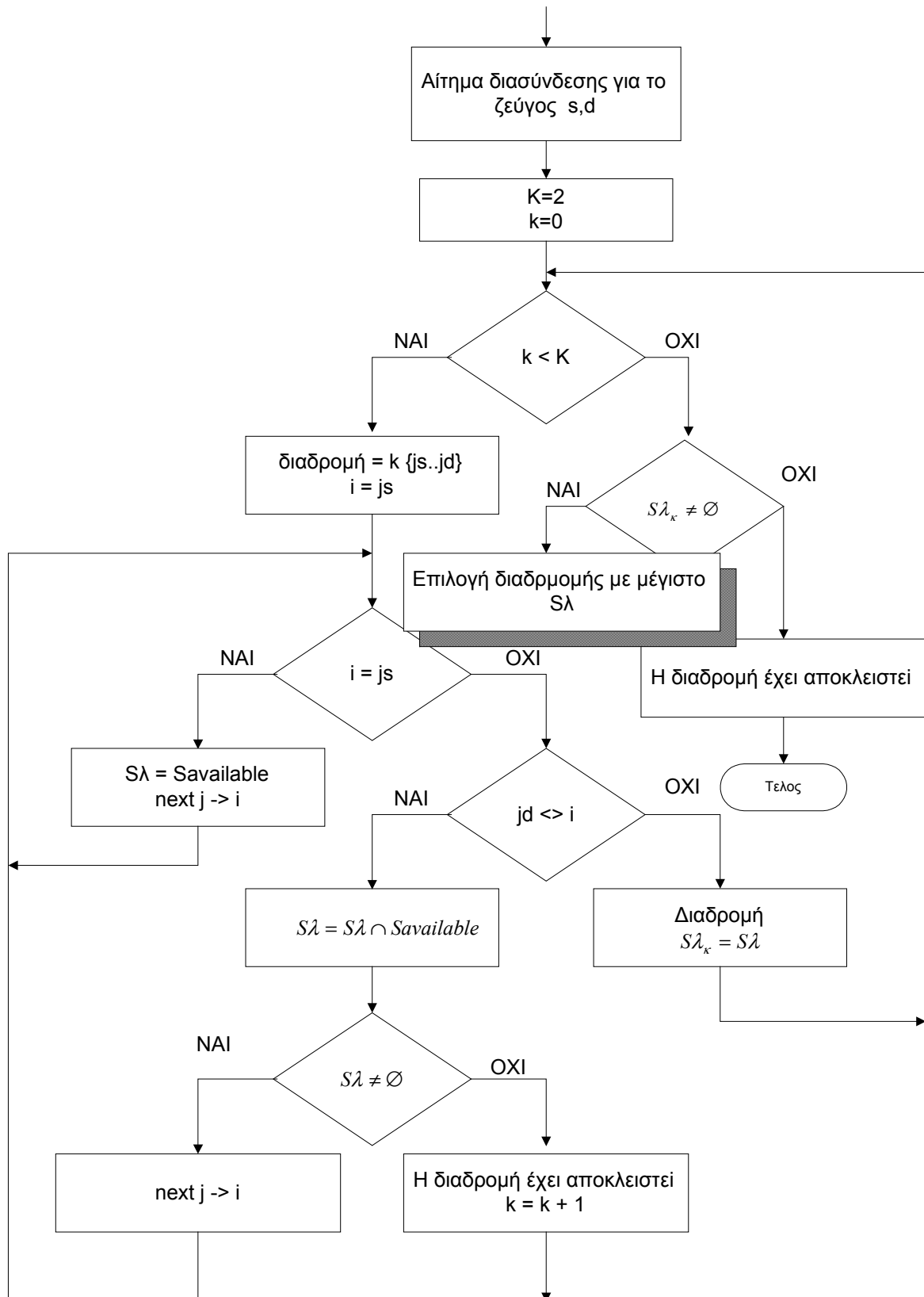
Πριν την εφαρμογή των αλγορίθμων στην εκάστοτε τοπολογία (TEN-155) στατικά υπολογίζονται διαδρομές για κάθε ζεύγος αφετηρίας – προορισμού και που αποτελούν πληροφορίες του κάθε κόμβου. Δεδομένου ότι οι πόροι ενός οπτικού δικτύου (WRSs, OCXs κλπ) είναι περιορισμένοι, οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται για την παρούσα προσομοίωση είναι δύο έτσι ώστε να μην υπάρχουν πολλές μεγάλες διαδρομές. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η βελτίωση της απόδοσης δεν είναι σημαντική [12][16]. Στον καθορισμό των διαδρομών έγινε προσπάθεια ώστε να μην υπάρχουν κοινοί ενδιάμεσοι κόμβοι (*edge disjoint*) ώστε να μπορεί να γίνει αποκατάσταση της διαδρομής μέσω άλλων κόμβων [4]. Στο δίκτυο TEN-155 οι μοναδικότητα των διαδρομών δεν ήταν πάντα εφικτή για το λόγο ότι το δίκτυο δεν είναι πλήρως διασυνδεδεμένο. Η διαδρομή π.χ. από Αθήνα (ATH) προς Άμστερνταμ (AMS) και αντίστροφα είναι μοναδική (ATH-AMS ή AMS-ATH), επίσης, οι διαδρομές που έχουν ως προορισμό ή αφετηρία τις πόλεις Βαρσοβία (WAR), Πράγα (PRA) και Βιέννη (VIE) υποχρεωτικά διέρχονται από τη Φρανκφούρτη (FRA) (Παράρτημα Β).

## 4.1 Αλγόριθμος της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (LLR)

Ο αλγόριθμος της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής [16][25][34][35] υλοποιείται παρακάτω :

Σε ένα δίκτυο με  $N$  κόμβους υπάρχουν δύο διαδρομές ( $k=2$ ) μεταξύ όλων των ζευγών κόμβων. Όταν σε κάποιο κόμβο  $i$  φτάσει μία αίτηση διασύνδεσης για τον κόμβο  $d$ , κόμβος  $i$  εκτελεί τα ακόλουθα βήματα:

1. Εάν ο κόμβος  $i$  είναι αφετηρία, ερευνώνται τα διαθέσιμα μήκη κύματος στις διαθέσιμες διαδρομές προσπαθώντας να τις διανύσουν αιτώντας τη δημιουργία μονοπατιού προς τον επόμενο κόμβο της διαδρομής. Οι αθροιστές από τα διαθέσιμα μήκη κύματος του εξερχόμενου συνδέσμου,  $S_\lambda$ , αυξάνονται κατά ένα και οι σχετικές πληροφορίες συμπεριλαμβάνονται αποθηκεύονται.
2. Εάν ο  $i$  είναι ενδιάμεσος κόμβος, υπολόγισε  $S_\lambda = S_\lambda \cap S_{available}$  (τα διαθέσιμα μήκη κύματος είναι μόνο τα κοινά λόγω του περιορισμού της συνέχειας μήκους κύματος). Εάν υπάρχουν κοινά διαθέσιμα μήκη κύματος ( $S_\lambda \neq \emptyset$ ) αυξάνονται οι αθροιστές τους. Εάν δεν υπάρχουν κοινά διαθέσιμα μήκη κύματος ( $S_\lambda = \emptyset$ ) το αίτημα διασύνδεσης αποκλείεται.
3. Εάν ο κόμβος  $i$  είναι ο προορισμός ( $i=d$ ), η αίτηση διασύνδεσης έχει βρει διαδρομή προς τον προορισμό και αναμένεται η διερεύνηση των άλλων διαδρομών. Κατόπιν, επιλέγεται η διαδρομή που έχει τα περισσότερα διαθέσιμα μήκη κύματος και ένα μήκος κύματος από τα διαθέσιμα της διαδρομής σύμφωνα με την μέθοδο κατανομής μήκους κύματος που έχει επιλεγεί. Στην περίπτωση που δύο ή περισσότερες διαδρομές έχουν τα ίδια ελεύθερα μήκη κύματος, η πρώτη διαδρομή επιλέγεται και το μήκος κύματος που έχει επιλεγεί δεσμεύεται. Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο μήκος κύματος σε καμία από τις δύο διαδρομές, η αίτηση διασύνδεσης αποκλείεται.



Σχ. 4.1 Διάγραμμα του αλγόριθμου Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (LLR)

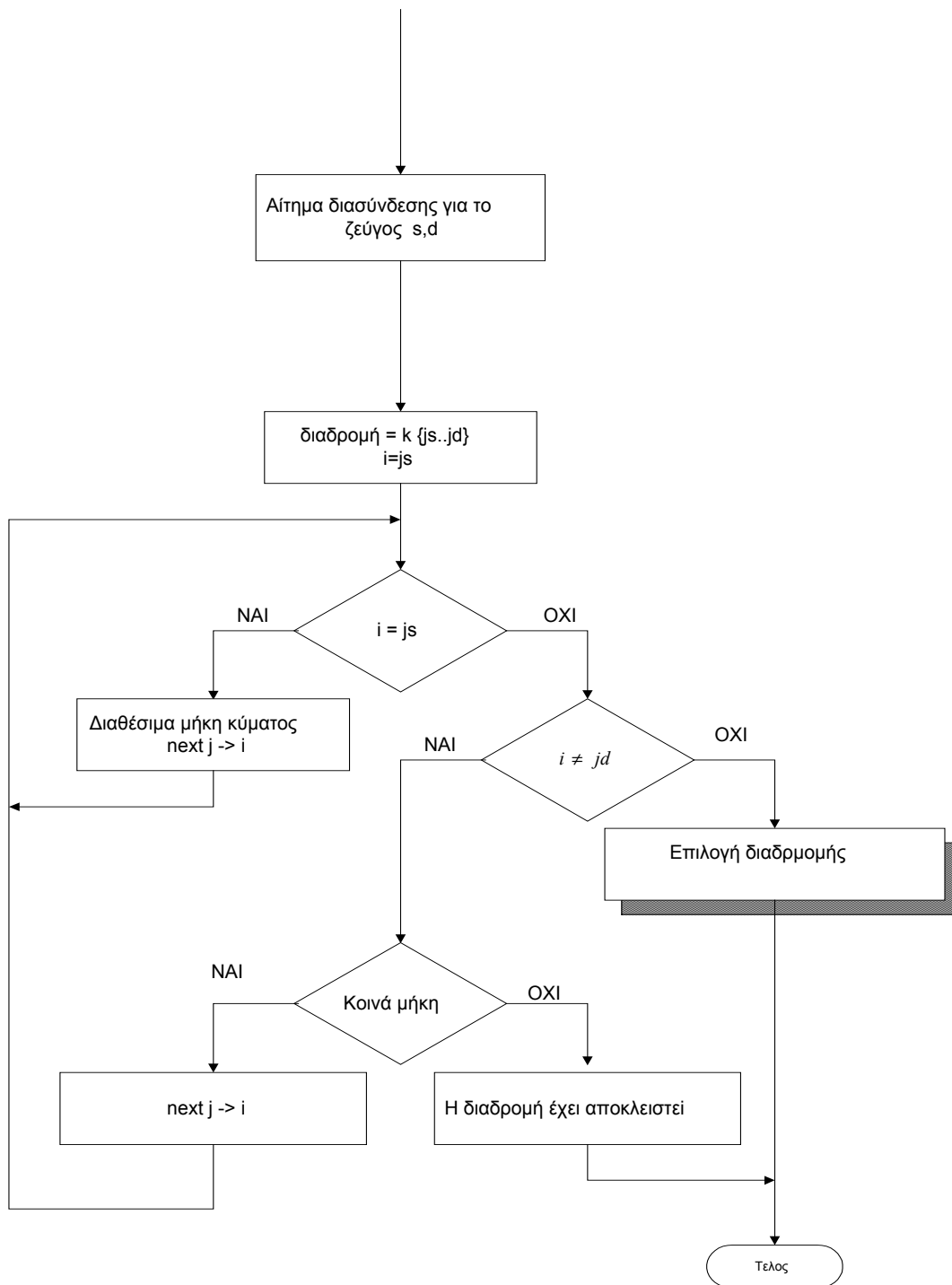
## 4.2 Αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής και της Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής

Οι αλγόριθμοι της συντομότερης (SP) και της εναλλακτικής συντομότερης διαδρομής (ASP) που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία είναι, ουσιαστικά, μέθοδοι εύρεσης της διαδρομής, από την αφετηρία στον προορισμό, μέσω προϋπολογισμένων συντομότερων διαδρομών. Οι συντομότερες διαδρομές για το δίκτυο TEN-155 έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με συγκεκριμένη βαρύτητα που έχει δοθεί στους συνδέσμους μεταξύ των κόμβων (Παράρτημα Γ). Η μέθοδος της εναλλακτικής συντομότερης διαδρομής διαφέρει από την πρώτη μόνο στην ύπαρξη δεύτερης διαδρομής ( $k$ -th SP) η οποία ερευνάται στην περίπτωση που η πρώτη δεν παρέχει την αιτούμενη διασύνδεση [16][25][34][35]. Η μέθοδος περιγράφεται παρακάτω :

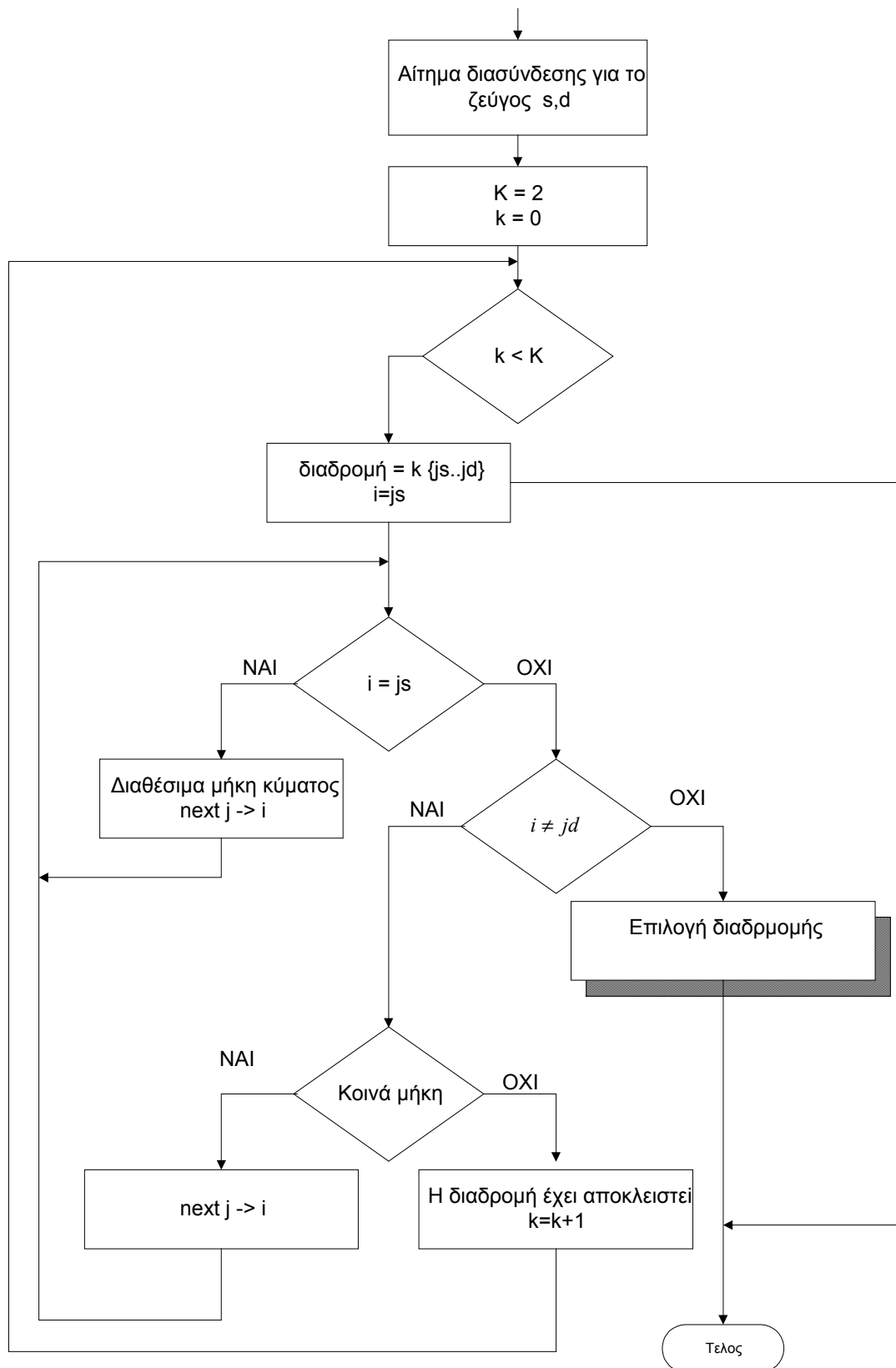
Όταν σε κάποιο κόμβο  $i$  φτάσει μία αίτηση διασύνδεσης για τον κόμβο  $d$ , κόμβος  $i$  εκτελεί τα ακόλουθα βήματα:

1. Εάν ο κόμβος  $i$  είναι αφετηρία, ερευνώνται τα διαθέσιμα μήκη κύματος ερευνάται η προϋπολογισμένη συντομότερη διαδρομή προσπαθώντας τη δημιουργία μονοπατιού προς τον επόμενο κόμβο της διαδρομής. Οι αθροιστές από τα διαθέσιμα μήκη κύματος του εξερχόμενου συνδέσμου,  $S_\lambda$ , αυξάνονται κατά ένα και οι σχετικές πληροφορίες συμπεριλαμβάνονται αποθηκεύονται.
2. Εάν ο  $i$  είναι ενδιάμεσος κόμβος, υπολόγισε αν υπάρχουν κοινά μήκη κύματος (τα διαθέσιμα μήκη είναι μόνο τα κοινά λόγω του περιορισμού της συνέχειας μήκους κύματος). Εάν υπάρχουν κοινά διαθέσιμα μήκη κύματος αυξάνονται οι αθροιστές τους. Εάν δεν υπάρχουν κοινά διαθέσιμα μήκη κύματος το αίτημα διασύνδεσης αποκλείεται. Στην περίπτωση της εναλλακτικής συντομότερης διαδρομής, όταν το αίτημα αποκλείεται, επιλέγεται η δεύτερη διαδρομή και η μέθοδος συνεχίζει με το βήμα 1.
3. Εάν ο κόμβος  $i$  είναι ο προορισμός ( $i=d$ ), η αίτηση διασύνδεσης έχει βρει διαδρομή προς τον προορισμό. Κατόπιν, επιλέγεται ένα μήκος κύματος από τα διαθέσιμα της διαδρομής σύμφωνα με την μέθοδο κατανομής

μήκους κύματος που έχει επιλεγεί και το οποίο δεσμεύεται σε όλους τους συνδέσμους της διαδρομής.



Σχ. 4.2 Διάγραμμα της Συντομότερης Διαδρομής

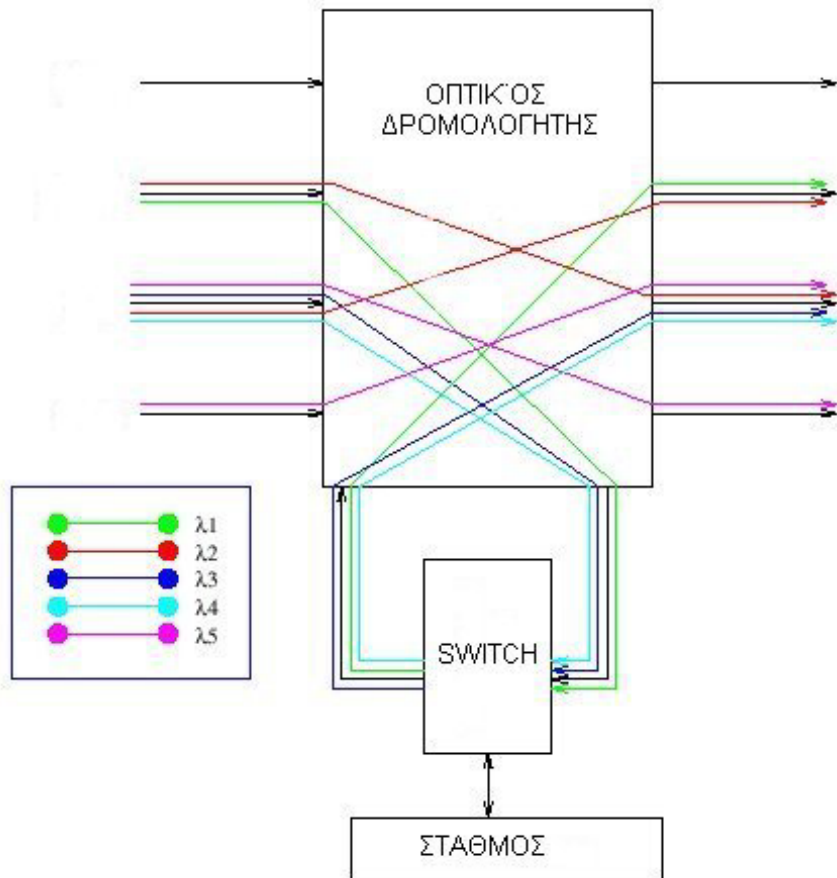


Σχ. 4.3 Διάγραμμα της Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής

### 4.3 Αρχιτεκτονική των Δικτύων

Οι αρχιτεκτονικές των δικτύων που εξετάζονται βασίζονται 1) στη χρήση πολυπλεξίας διαιρούμενου οπτικού μήκους κύματος 2) στη χρήση δρομολογούμενου οπτικού μήκους κύματος 3) στη χρήση μεταγωγής, πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας. Οι παραπάνω αρχές επιτρέπουν τη σχεδίαση οπτικών δικτύων με απεριόριστο, θεωρητικά, αριθμό κόμβων. Τα δίκτυα αποτελούνται από ένα εσωτερικό αμιγώς οπτικό μέρος και από ένα εξωτερικό τμήμα που περιέχει σταθμούς «προσαρτημένους» στο οπτικό τμήμα μέσω κάποιου ηλεκτρονικού μεταγωγέα (Switch). Το αμιγώς οπτικό μέρος περιέχει τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης, δρομολόγησης και μεταγωγής του οπτικού μήκους κύματος. Οι προσαρτημένοι σταθμοί είναι αυτοί που «αιτούνται» τις διασυνδέσεις και που αποτελούν τα άκρα των διαδρομών. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες των οπτικών συνδέσεων (OCX), που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων μπορούν να μεταβάλλονται δυναμικά ώστε να κατανέμονται τα μήκη κύματος για την εξυπηρέτηση των αιτημάτων.

Αν και η φυσική τοπολογία των δικτύων που ορίζεται από τους διασυνδεμένους με οπτική ίνα κόμβους, είναι προκαθορισμένη, για τις ανάγκες της προσομοίωσης ο αριθμός των οπτικών ινών μεταβάλλεται. Η τοπολογία, σε οπτικό επίπεδο, μεταξύ των σταθμών (π.χ. ένας οπτικός δίαυλος που έχει αφητηρία ένα σταθμό  $i$ , δρομολογείται διαμέσου μιας σειράς κόμβων και τερματίζει σε σταθμό  $j$ ) είναι επαναπροσδιορίσιμη μεταβάλλοντας την κατάσταση των κόμβων. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός κόμβου.

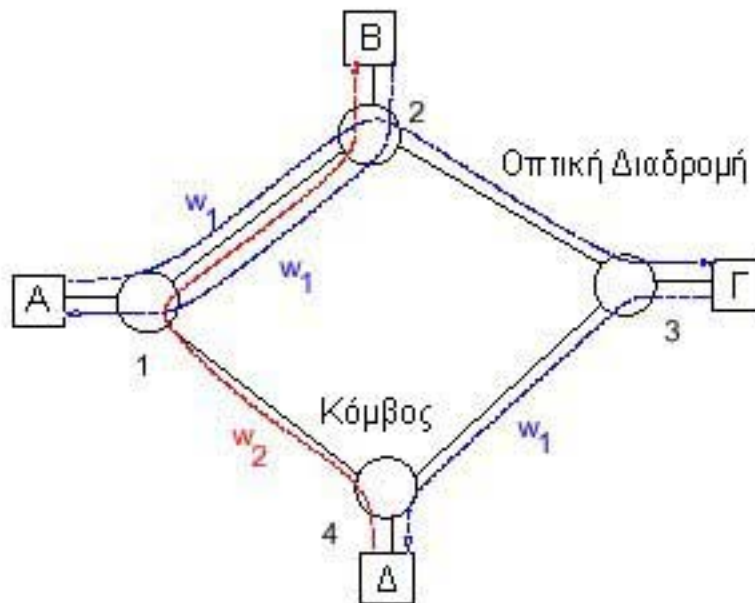


Σχ. 4.4 Λεπτομερής αρχιτεκτονική ενός κόμβου

Επειδή στα δίκτυα που εξετάζονται ο αριθμός των εκπομπών και δεκτών είναι περιορισμένος, οι κόμβοι δεν είναι πλήρως διασυνδεμένοι μεταξύ τους και οι περισσότερες διασυνδέσεις απαιτούν τη δημιουργία διαδρομής πολλών βημάτων μέσω οπτικών διαδρομών ή μονοπατιών (*lightpaths*) σχήμα 4.5. Οι διασυνδέσεις αυτές είναι, ουσιαστικά, ιδεατές (*virtual*) όπως και στα δίκτυα ATM (VP).

Σημειώνεται ότι όταν δύο διαδρομές διέρχονται από τον ίδιο σύνδεσμο, είναι απαραίτητο, να χρησιμοποιούν διαφορετικό μήκος κύματος.

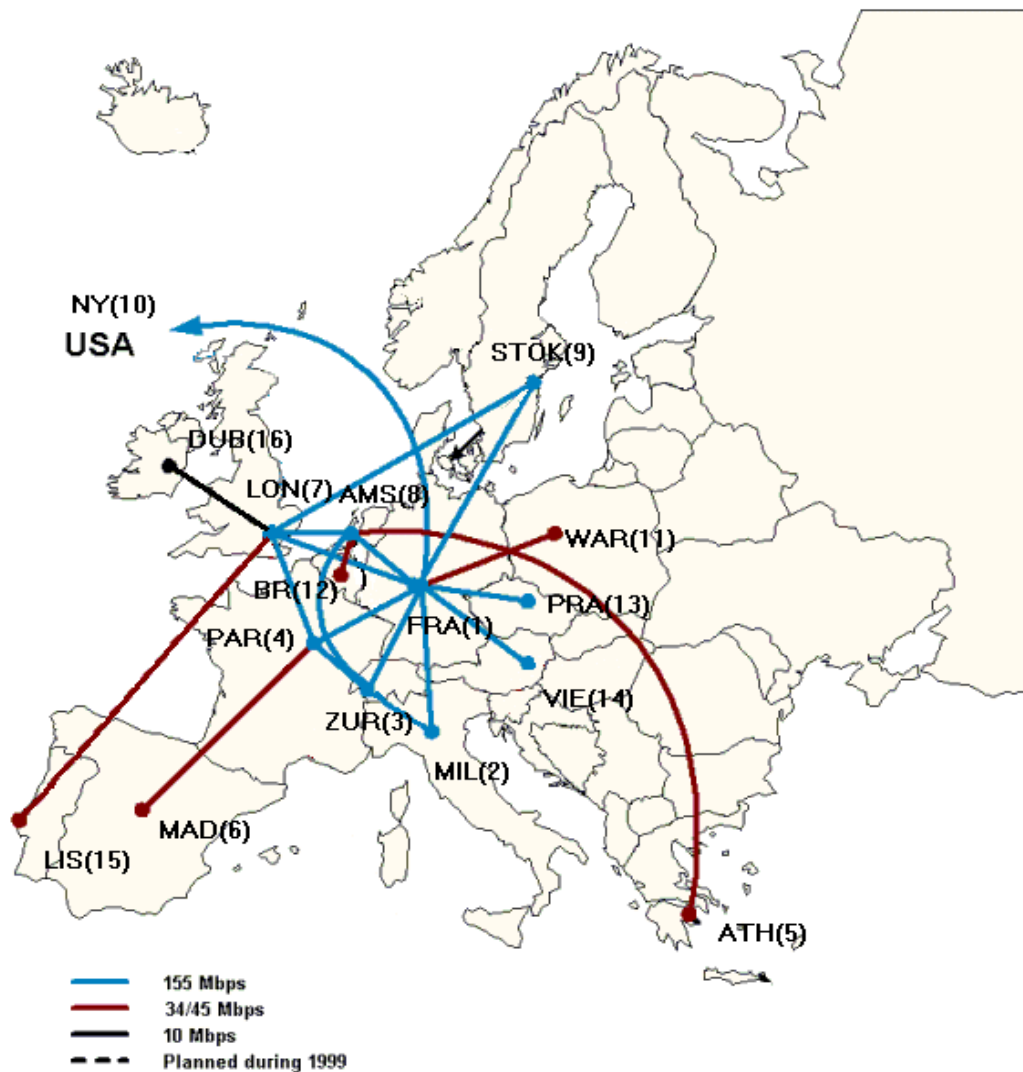




Σχήμα 4.5 Οπτικές διαδρομές (*lightpaths*)

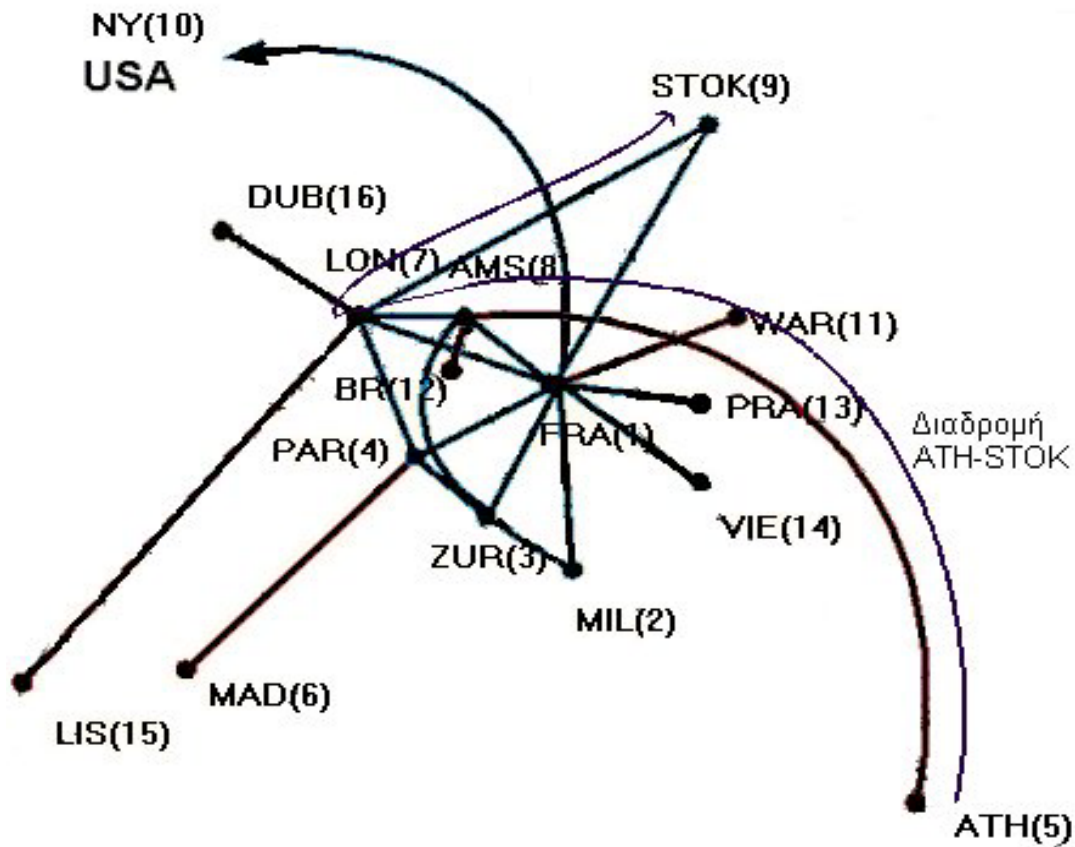
### 4.3.1 Το Ευρωπαϊκό Δίκτυο TEN-155

Το δίκτυο TEN-155, που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση, είναι, ίσως, το σημαντικότερο δίκτυο ευρείας περιοχής στην Ευρώπη. Το TEN-155 (1999) διασυνδέει τις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τις ΗΠΑ και τρίτες χώρες όπως η Πολωνία. (εικόνα 4.6)[37]. Οι περισσότερες διασυνδέσεις του TEN-155 είναι κυκλώματα SDH χωρητικότητας 155 Mb/s στα οποία εφαρμόζονται υπηρεσίες και διαχείριση ATM. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται είναι το *Open Shortest Path First (OSPF)* με τις αξίες (*costs*), των ATM PVCs, τέτοιες που αντικατοπτρίζουν την φυσική τοπολογία του δικτύου.



Εικόνα 4.6. Το δίκτυο TEN-155 (Ιανουάριος 1999)

Στην παρούσα εργασία, η φυσική τοπολογία του δικτύου TEN-155 χρησιμοποιείται ως βάση για να αναπτυχθούν ιδεατές τοπολογίες (διαδρομές) (*lightpaths*) από όλους τους κόμβους προς όλους τους αντίστοιχους. Στο δίκτυο, που έχει αριθμό κόμβων  $N=16$ , υπάρχουν  $N(N-1) = 240$  πιθανά ζεύγη κόμβων. (Παράρτημα Γ). Στο σχήμα 4.7 φαίνεται η διαδρομή από τον κόμβο ATH προς τον κόμβο STOK και η οποία περιλαμβάνει τους κόμβους ATH->AMS->LON->STOK.

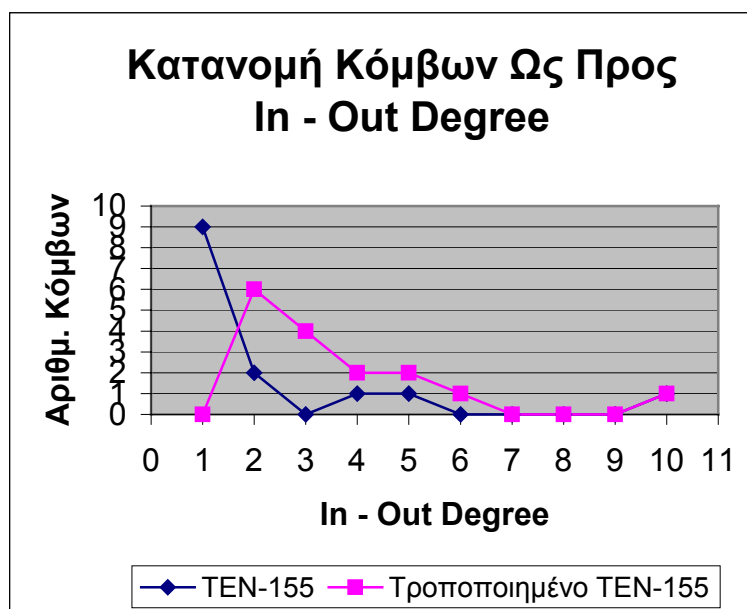


Σχήμα 4.7 Οπτική διαδρομή (*lightpath*) ATH-STOK

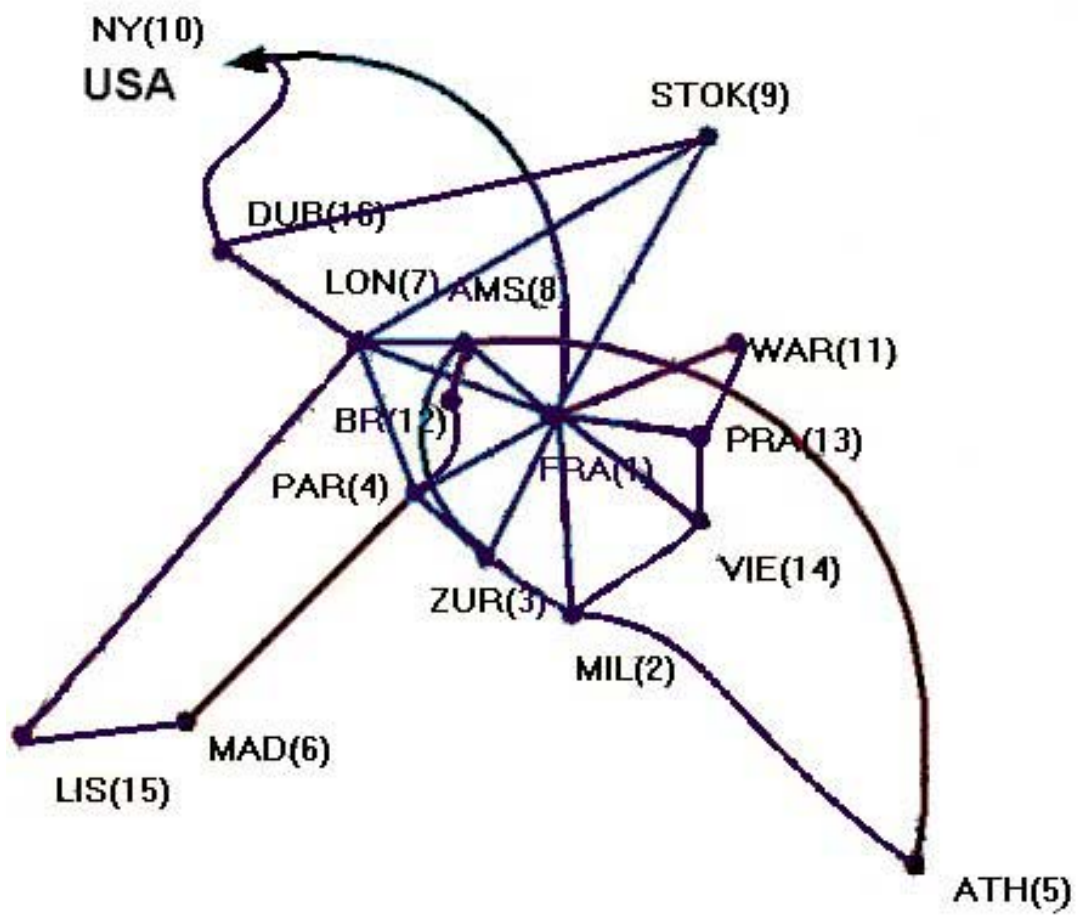
Η μεγαλύτερη διαδρομή, στο δίκτυο που εξετάζεται, έχει μήκος 5 βήματα (*hops*) και κατά συνέπεια ο βαθμός κόμβων  $\bar{h}$  (*nodal degree*) είναι 5. Όλοι οι σύνδεσμοι, στο δίκτυο, είναι διπλής κατεύθυνσης (ο αριθμός εισόδων και εξόδων είναι ίδιος (*in-degree = out-degree*)). Οι βαθμός εισόδου - εξόδου για τους κόμβους ATH, LIS, MAD, VIE, DUB, NY, PRA, WAR και BR είναι 1, για τους κόμβους STOK και MIL είναι 2, για τους κόμβους ZUR και PAR είναι 4, για τον κόμβο AMS 5, για τον LON είναι 6 και για τον κόμβο της Φραγκφούρτης (FRA) 10. Οι σύνδεσμοι (*links*) που υπάρχουν μεταξύ των κόμβων είναι συνολικά 20 (η φυσική τοπολογία του δικτύου περιγράφεται στο Παράρτημα Β). Όλοι οι σύνδεσμοι έχουν τον ίδιο αριθμό οπτικών ινών καθώς και η κάθε οπτική ίνα έχει τα ίδια μήκη κύματος που διέρχονται από αυτή. Τα μήκη κύματος και ο αριθμός των οπτικών ινών, που αποτελούν και παραμέτρους της προσομοίωσης, μεταβάλλονται ανάλογα με το κάθε πείραμα που διεξάγεται.

### 4.3.2 Η Δεύτερη Εκδοχή του Δικτύου TEN-155

Στη δεύτερη εκδοχή του δικτύου TEN-155 σχήμα 4.8, προστίθενται υποθετικοί σύνδεσμοι μεταξύ κόμβων έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι να είναι διασυνδεδεμένοι με τουλάχιστον δύο άλλους κόμβους. Ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων από 20 έγινε 28 (Παράρτημα Β). Συγκεκριμένα προστέθηκαν σύνδεσμοι μεταξύ των ATH-MIL (5-2), MAD-LIS (6-15), STOK - DUB (9-16), WAR - PRA (11-13), PRA - VIE (13-14), NY- DUB (10-16), PAR - BR (4-12) και ZUR - VIE (3-14). Έτσι, όλοι οι κόμβοι έχουν βαθμό εισόδου - εξόδου μεγαλύτερο από 1 (*In - out degree* > 1). Η εξάλειψη των κόμβων με βαθμό εισόδου - εξόδου ίσο με ένα έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρξει η δυνατότητα ορισμού περισσότερων εναλλακτικών διαδρομών για τους κόμβους που αποτελούσαν άκρα καθώς και για τους ενδιάμεσους κόμβους (Παράρτημα Γ). Ο βαθμός κόμβου (*nodal degree*) στο τροποποιημένο TEN-155 από 5 έγινε 9. Κατ' αυτό τον τρόπο, πιστεύεται, ότι θα αυξηθεί η απόδοση του δικτύου μειώνοντας τον κορεσμό που επέρχεται σε κεντρικούς κόμβους και προσδίδοντας στο δίκτυο κάποια μορφή *fault tolerance* για αποκατάσταση διαδρομής. Στην προσομοίωση υπολογίζεται η απόδοση του υποθετικού TEN-155 και συγκρίνεται με το πρώτο. Στο γράφημα 1 φαίνεται η κατανομή του βαθμού εισόδου - εξόδου στο αρχικό TEN-155 και στο τροποποιημένο.



Γράφημα 1. Κατανομή των κόμβων ως προς In - Out Degree στο δίκτυο TEN-155 και στο τροποποιημένο TEN-155



Σχήμα 4.8. Το τροποποιημένο δίκτυο TEN-155

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Μοντέλο Προσομοίωσης

Διαφορετικές μέθοδοι δρομολόγησης και κατανομής οπτικού μήκους κύματος παράγουν διαφορετικό φόρτο σε ένα δίκτυο. Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, εξετάζεται η απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης Συντομότερης Διαδρομής (*SPR*), Συντομότερης Εναλλακτικής Διαδρομής (*SAPR*) και Λιγότερου Κορεσμένης Διαδρομής (*LLR*) και των μεθόδων Τυχαίας (*Random*) και Πρώτου Διαθέσιμου (*FF*) κατανομής μήκους κύματος όταν εφαρμόζονται σε δύο δίκτυα, καθώς και την απόδοση των δικτύων αφεαυτών. Τα ερωτήματα που η προσομοίωση προσπαθεί να απαντήσει ως προς την απόδοση των δικτύων μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

1. Ποιος αλγόριθμος δρομολόγησης και ποιος κατανομής έχει την καλύτερη απόδοση;
2. Πόσες οπτικές ίνες και πόσα μήκη κύματος απαιτούνται για να καλυφθούν οι ανάγκες σε εύρος ζώνης;
3. Πώς επηρεάζετε η απόδοση ενός δικτύου με την προσθήκη επιπλέον συνδέσμων και αλλαγή παραμέτρων όπως ο βαθμός κόμβου (*nodal degree*) ;

Στο παρών κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο της προσομοίωσης των δικτύων που η παρούσα εργασία εξετάζει.

#### 5.1 Μεγέθη της Προσομοίωσης

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, σε ένα οπτικό δίκτυο, οι πόροι, δεν μπορεί να είναι απεριόριστοι αλλά, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των οπτικών στοιχείων, ιδιαίτερα περιορισμένοι. Σε ένα, λοιπόν, δίκτυο σαν το TEN-155, με 16 κόμβους και περιορισμένο αριθμό συνδέσμων (20), είναι προφανές ότι όλες οι πιθανές διασυνδέσεις (240) μεταξύ των κόμβων δεν είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν δυναμικά και το δίκτυο αναγκάζεται να αποκλείσει αιτήσεις διασύνδεσης που εμφανίζονται στο δίκτυο. Ο αριθμός των διασυνδέσεων που μπορούν να

εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα είναι άμεσα εξαρτημένος από τις οπτικές ίνες και τα μήκη κύματος (*wavelengths*) που υποστηρίζονται από κάθε σύνδεσμο. Σημαντικά μεγέθη, επίσης, είναι ο βαθμός των κόμβων (*nodal degree*) και ο βαθμός εισόδου – εξόδου των κόμβων (*In-out-degree*) καθώς συμμετέχουν στην κατανομή του φόρτου στους κόμβους. Το μέγεθος, όμως, που είναι ο δείκτης της απόδοσης ενός δικτύου, και το οποίο υπολογίζεται από τον προσομοιωτή στην παρούσα εργασία, είναι η πιθανότητα αποκλεισμού (*blocking probability*).

Με την άφιξη ενός αιτήματος διασύνδεσης, ο προσομοιωτής ψάχνει για ελεύθερο μήκος κύματος σύμφωνα με την μέθοδο κατανομής στην διαθέσιμη διαδρομή. Η διαδρομή επιλέγεται σύμφωνα με την καθορισμένη μέθοδο δρομολόγησης π.χ. συντομότερης διαδρομής, λιγότερο κορεσμένης διαδρομής κλπ. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμη διαδρομή από την αφετηρία προς τον προορισμό ή διαθέσιμο μήκος κύματος στη διαδρομή, τότε το αίτημα αποκλείεται. Η πιθανότητα αποκλεισμού  $P$  ορίζεται ως το πηλίκο των αιτημάτων που αποκλείστηκαν προς τα αιτήματα που παρήχθησαν :

$$P = \frac{\text{Αποκλεισθέντα\_Αιτήματα}}{\text{Παραχθέντα\_Αιτήματα}}$$

## 5.2 Υποθέσεις και Περιορισμοί που Ισχύουν

Πριν την προσομοίωση των αλγορίθμων αναγκαίο κρίθηκε να γίνουν κάποιες υποθέσεις και περιορισμοί καθώς και να οριστούν παράμετροι που αφορούν το πείραμα ώστε να γίνει πιο κατανοητό και εύκολο στη διαχείριση.

- Ο χρόνος που παράγονται οι κλήσεις, με τη μορφή διαδικασιών Poisson, είναι τυχαίος και οι κλήσεις παράγονται για όλους τους κόμβους σύμφωνα με κανονική στατιστική κατανομή.
- Ο χρόνος διάρκειας μιας κλήσης είναι ανεξάρτητος για κάθε κλήση και με σύμφωνος με εκθετική κατανομή αριθμητικού μέσου ίσου με  $1/\mu$ .
- Ο χρόνος μεταξύ αφίξεων των αιτημάτων είναι τυχαίος, με αριθμητικό μέσο :

$$\text{ΑριθμΜέσοςΜεταξύΑφ.} = \frac{1}{(N * \Phi\text{ορτοςΚόμβων})}$$

όπου N ο αριθμός των κόμβων του δικτύου (16 για το TEN-155).

- Οι αιτήσεις διασύνδεσης προέρχονται από τυχαίους κόμβους σύμφωνα με κανονική στατιστική κατανομή όπως τυχαίοι και κανονικά κατανεμημένοι είναι και οι κόμβοι προορισμού.
- Οι αποκλεισμένες διασυνδέσεις εξαλείφονται χωρίς να εισέρχονται σε ουρά ή να επιστρέφουν.
- Δεν υπάρχει αποκλεισμός από τους κόμβους.
- Οι κόμβοι υποστηρίζουν πλήρως διαφανή (*transparent*) διασυνδεσιμότητα προς όλους τους υπόλοιπους.
- Οι διασυνδέσεις είναι από κόμβο σε κόμβο (*point-to-point*) αποκλείοντας τις διασυνδέσεις *multicast* και *broadcast*.
- Η διασύνδεση μεταξύ δύο κόμβων μπορεί να επιτευχθεί απευθείας από τον ένα στον άλλο ή μέσω διαδρομής πολλών βημάτων.
- Η τοπολογία του δικτύου είναι δεδομένη και δεν υφίσταται αλλαγές κατά την προσομοίωση.
- Ο αριθμός των κλήσεων που παράγονται και υπολογίζονται σε κάθε σετ παραμέτρων έχει ορισθεί σε  $10^6$  ώστε να εξασφαλιστεί ότι το δίκτυο θα φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας (*steady state*). Πριν την καταμέτρηση των γεγονότων που αποκλείστηκαν, παράγονται και επεξεργάζονται 10000 επιπλέον κλήσεις.

### 5.3 Προετοιμασία της Προσομοίωσης και Παράμετροι

Μετά την επιλογή των δικτύων που θα προσομοιώνονταν και πριν την έναρξη των πειραμάτων έγινε αποτύπωση των τοπολογιών όπου καταγράφηκαν οι σύνδεσμοι της φυσικής τοπολογίας των δικτύων. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν, στατικά, οι συντομότερες διαδρομές για κάθε ζεύγος αφετηρία-προορισμός. Οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση είναι δύο για κάθε ζεύγος. – ο αριθμός των διαδρομών μπορεί εύκολα να μεταβληθεί.

Οι παράμετροι που εισάγονται πριν την έναρξη κάθε πειράματος, είναι

- A) Ο αριθμός των οπτικών ινών



- B) Τα μήκη κύματος ανά οπτική ίνα
- Γ) Ο φόρτος των κόμβων σε Erlangs (ποσοστό χρόνου που οι σύνδεσμοι είναι κατειλημμένοι)
- Δ) Ο αλγόριθμος δρομολόγησης
- Ε) Ο αλγόριθμος κατανομής οπτικού μήκους κύματος
- ΣΤ) Ο αριθμός των συντομότερων διαδρομών για τον LLR και
- Z) Ο αριθμός των συντομότερων διαδρομών για τη δρομολόγηση SP και ASP (1 για SP και 2 για ASP)

Συνολικά έγιναν 218 πειράματα (Παράρτημα Β) με τις παρακάτω τιμές :

- Αριθμός οπτικών ινών 1 για 2, 4, 8 και 16 μήκη κύματος
- Αριθμός οπτικών ινών 2, 4, 8 για 8 μήκη κύματος ανά ίνα
- Φόρτος δικτύου 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 Erlangs
- Όλοι οι συνδυασμοί των αλγορίθμων δρομολόγησης και κατανομής

## 5.4 Ο Προσομοιωτής

Το πρόγραμμα προσομοίωσης σχεδιάστηκε για να αξιολογεί αλγόριθμους δρομολόγησης και κατανομής οπτικού μήκους κύματος λαμβάνοντας υπόψη σχεδόν όλες τις πτυχές ενός δικτύου δρομολόγησης οπτικού μήκους κύματος. Ο προσομοιωτής είναι γραμμένος σε Visual C++ και είναι σχεδιασμένος ώστε να μεταβάλλεται εύκολα ως προς τους ερευνούμενους αλγόριθμους και ως προς τις παραμέτρους του δικτύου στο οποίο αυτοί εφαρμόζονται.

### 5.4.1 Σχεδίαση του Προσομοιωτή

Τα βασικά χαρακτηριστικά του προσομοιωτή και της λειτουργίας του είναι τα ακόλουθα :

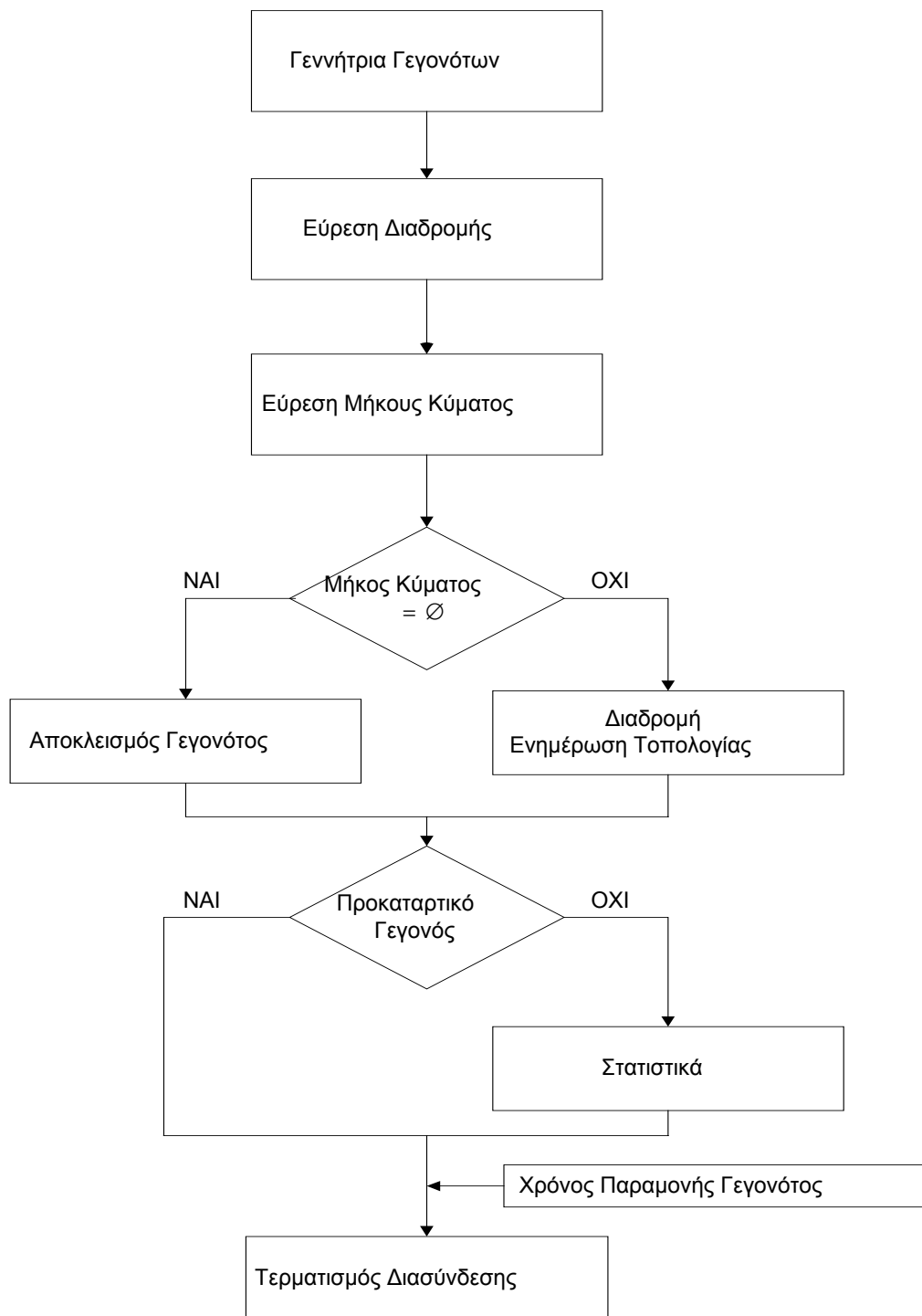
- Με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο αιτημάτων διασύνδεσης τα παραγόμενα γεγονότα μπορεί να έχουν σαν αφετηρία οποιοδήποτε κόμβο του δικτύου και να δρομολογούνται προς οποιοδήποτε άλλο κόμβο (προορισμό). Αν και η άφιξη των γεγονότων, στην παρούσα έκδοση του προγράμματος, γίνεται σύμφωνα με κανονική στατιστική κατανομή, το μοντέλο αιτημάτων μπορεί να αλλάξει εύκολα και τα γεγονότα να παράγονται σύμφωνα με οποιαδήποτε

άλλη κατανομή. Παρέχεται επίσης, δυνατότητα αλλαγής του χρόνου διάρκειας μίας κλήσης καθώς και στην κατανομή των αιτημάτων στους κόμβους. Για την παραγωγή των παραπάνω γεγονότων και κατανομών χρησιμοποιήθηκαν «έτοιμες» συναρτήσεις από την βιβλιοθήκη GNU C++ του οργανισμού Open Software Foundation.

- Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα αλλαγής των αλγορίθμων εύρεσης της διαδρομής και δρομολόγησης / κατανομής μήκους κύματος ώστε να επιτευχθούν οι διασυνδέσεις.
- Παρέχεται δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων της προσομοίωσης όπως αριθμός γεγονότων, αριθμός οπτικών ινών, καναλιών κλπ,
- Δυνατότητα αλλαγής τοπολογίας του δικτύου (τυχαία ή κανονική ) ώστε και άλλα δίκτυα να μπορούν να ερευνηθούν.

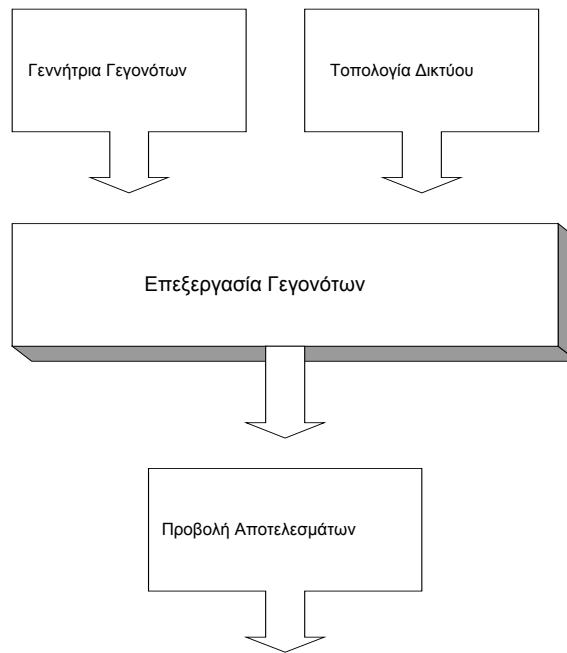
#### **5.4.2 Η Διαδικασία της Προσομοίωσης**

Η διαδικασία των πειραμάτων αφορά στην προσομοίωση διακριτών γεγονότων (αιτημάτων διασύνδεσης) (*discrete events*) που παράγονται, σύμφωνα με κάποια στατιστική κατανομή, και κατευθύνονται στους κόμβους των δικτύων που προσομοιώνονται. Ο χρόνος που παραμένουν οι διασυνδέσεις ενεργές (*holding time*), υπολογίζεται, επίσης, με κάποια στατιστική κατανομή. Για κάθε αίτημα, το αντίστοιχο τμήμα του προσομοιωτή, υπολογίζει τη διαδρομή ανάλογα με τη μέθοδο δρομολόγησης (SP, ASP, LLR) και, σύμφωνα με τη μέθοδο κατανομής (Random, First-Fit), αναθέτει οπτικό μήκος κύματος, εφόσον υπάρχει. Εάν δεν υπάρχει οπτικό μήκος κύματος, η αίτηση αποκλείεται και αναμένεται το επόμενο γεγονός .



Σχ. 5.1 Διάγραμμα προσομοίωσης

Ο προσομοιωτής αποτελείται από τέσσερα κύρια στοιχεία α) την γεννήτρια γεγονότων β) το στοιχείο τοπολογίας του δικτύου γ) το στοιχείο επεξεργασίας των γεγονότων και δ) το στοιχείο προβολής των αποτελεσμάτων σχήμα 5.2.



Σχ. 5.2 Δομή του προσομοιωτή

Η γεννήτρια γεγονότων παράγει δύο τύπων Poisson γεγονότα (διαδικασίες) α) γεγονότα άφιξης και β) αναχώρησης. Τα γεγονότα άφιξης είναι, ουσιαστικά, αιτήσεις διασύνδεσης που φτάνουν σε κάποιο κόμβο και τα αναχώρησης αιτήματα τερματισμού ενεργών διασυνδέσεων που υπάρχουν στο δίκτυο. Οι παράμετροι των αιτημάτων διασύνδεσης, αριθμός κόμβου αφετηρίας και κόμβου προορισμού, αποθηκεύονται, σύμφωνα με το χρόνο άφιξης τους, σε ένα «σωρό» (*heap*) για να προωθηθούν στη συνέχεια για επεξεργασία.

Το στοιχείο τοπολογίας δημιουργεί μια βάση δεδομένων με την περιγραφή του δικτύου ώστε να χρησιμοποιηθεί από τους αλγόριθμους ως «χάρτης» για τον καθορισμό και την επιλογή των διαδρομών με την άφιξη των αιτημάτων. Η βάση δεδομένων αποτελείται από :

- Γράφημα, υλοποιούμενο από συνδεδεμένες λίστες (*linked lists*), αποτελούμενο από κόμβους και συνδέσμους αντικατοπτρίζοντας την τοπολογία του δικτύου.
- Πίνακα που περιέχει τα χαρακτηριστικά των συνδέσμων (συνολικά, δεσμευμένα, ελεύθερα μήκη κύματος, αριθμός οπτικών ινών, κόμβοι που συνδέονται στα άκρα, απλά ή αμφίδρομα).
- Πίνακα που περιέχει τις συντομότερες διαδρομές καθώς και τις ενεργές με το μήκος κύματος που καταλαμβάνουν.

Το στοιχείο της τοπολογίας είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία της βάσης επεξεργαζόμενο το αρχείο τοπολογίας και το αρχείο των συντομότερων διαδρομών (Παράρτημα Γ). Υπεύθυνο για την συντήρηση της βάσης κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι το στοιχείο της επεξεργασίας των γεγονότων.

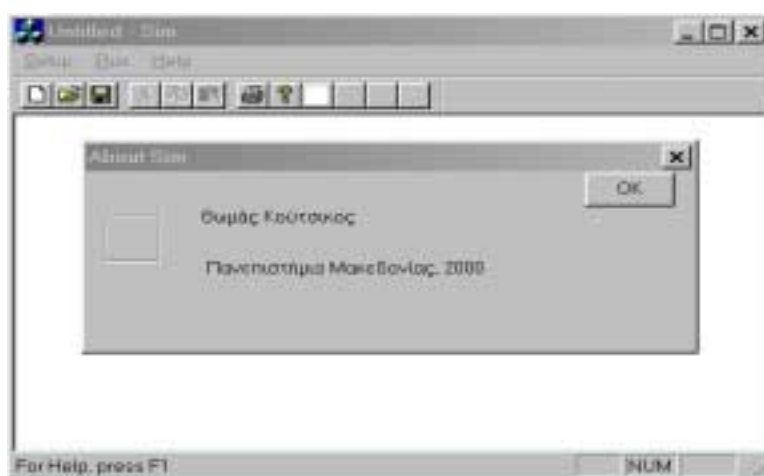
Το στοιχείο της επεξεργασίας είναι, ίσως, το σημαντικότερο στοιχείο του προσομοιωτή. Το στοιχείο της επεξεργασίας είναι αυτό που με την άφιξη ενός γεγονότος αναλαμβάνει να προσδιορίσει - δημιουργήσει ή να τερματίσει μία διαδρομή καθώς και να συλλέξει τα στατιστικά δεδομένα. Μετά την επεξεργασία ενός γεγονότος, το στοιχείο επεξεργασίας ενημερώνει τη βάση με τα νέα στοιχεία τυχών προκύψουν.

Για την ικανοποίηση ενός αιτήματος διασύνδεσης, το παραπάνω στοιχείο αναλαμβάνει να προσδιορίσει την διαδρομή και το μήκος κύματος που θα χρησιμοποιηθεί. Έτσι, ανάλογα με τον αλγόριθμο δρομολόγησης και τον αλγόριθμο κατανομής μήκους κύματος που εφαρμόζεται, ερευνάται η βάση της τοπολογίας ώστε να προσδιορισθεί και να δεσμευτεί η διαδρομή και το μήκος κύματος. Όταν, τέλος, φτάσει ένα γεγονός αναχώρησης, η δεσμευμένη διαδρομή και το μήκος κύματος αποδεσμεύονται και ενημερώνεται η βάση της τοπολογίας.

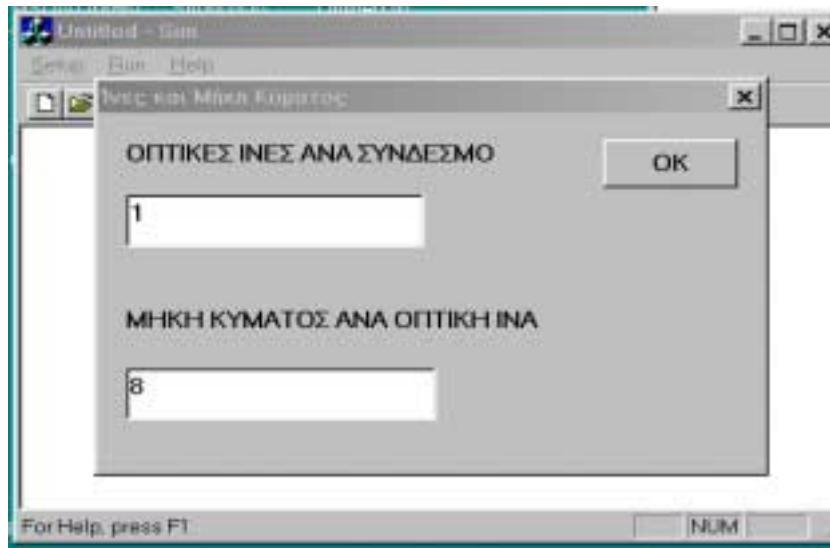
Το στοιχείο της προβολής των αποτελεσμάτων δέχεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και τις παραμέτρους του πειράματος και τα προβάλλει.

### 5.4.3 Λειτουργία του Προσομοιωτή

Ο προσομοιωτής εικόνα 5.3 ξεκινά με τα μήκη κύματος και την εισαγωγή του αριθμού οπτικών ινών εικόνα 5.4.

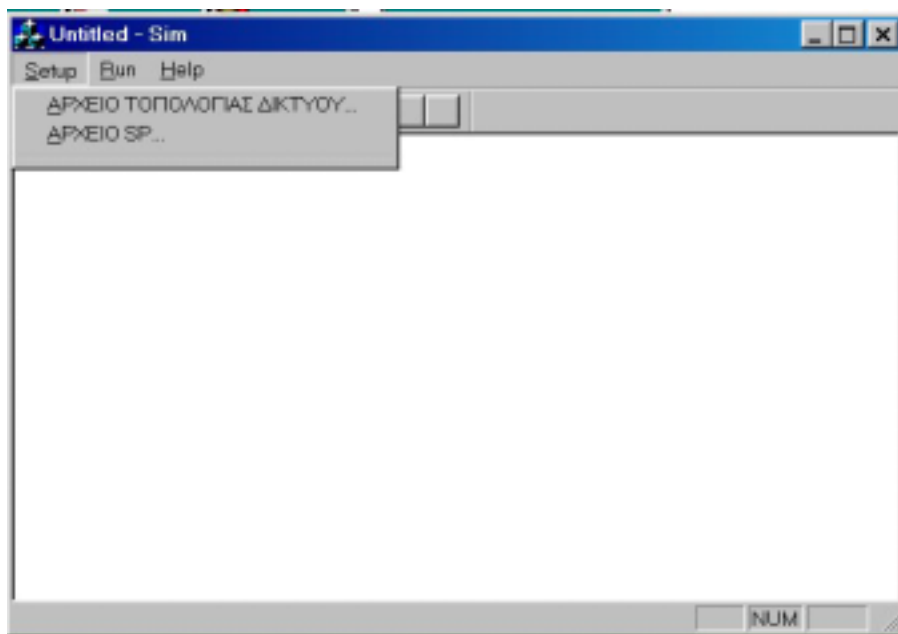


Εικόνα 5.3 About



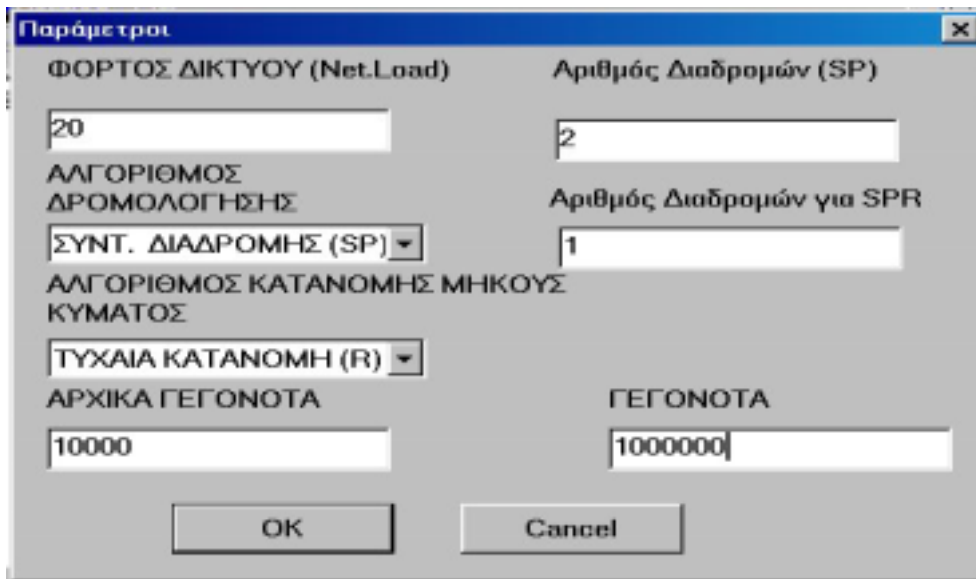
Εικόνα 5.4 Μήκη κύματος και οπτικές ίνες

Στη συνέχεια ο χρήστης πρέπει να εισάγει το αρχείο τοπολογίας και συντομότερων διαδρομών εικόνα 5.5.



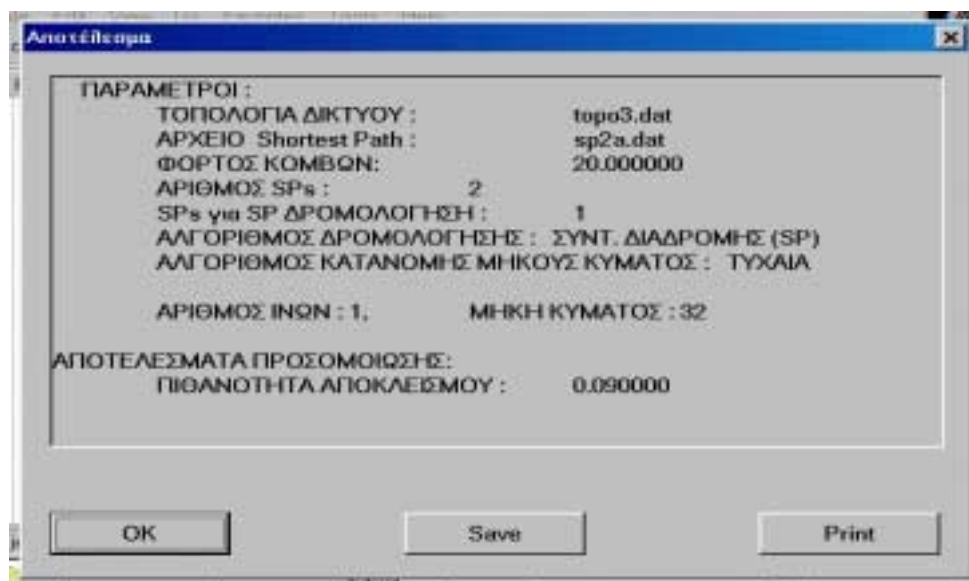
Εικόνα 5.5. Αρχείο τοπολογίας και συντομότερων διαδρομών

Πριν την έναρξη της παραγωγής γεγονότων και υπολογισμού της πιθανότητας αποκλεισμού, πρέπει να εισαχθούν: ο φόρτος του δικτύου, ο αλγόριθμος δρομολόγησης, ο αλγόριθμος κατανομής, ο αριθμός των συντομότερων διαδρομών, ο αριθμός των προκαταρκτικών γεγονότων και των γεγονότων που προσμετρώνται εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6 Εισαγωγή παραμέτρων πειράματος

Μετά την εκτέλεση του πειράματος, οι παράμετροι και το αποτέλεσμα εμφανίζονται στην οθόνη (εικόνα 5.7) και γράφονται σε αρχείο.



Εικόνα 5.7. Αποτέλεσμα πειράματος

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα και Συζήτηση

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων δρομολόγησης Συντομότερης Διαδρομής (SP), Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής (ASP), του αλγορίθμου Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (LLR) καθώς των μεθόδων Τυχαίας (Random) και Πρώτου Διαθέσιμου (First-Fit) κατανομής οπτικού μήκους κύματος έγιναν συνολικά 218 πειράματα προσομοίωσης με διαφορετικές παραμέτρους (παράρτημα Α). Οι παράμετροι αφορούν στον αλγόριθμο δρομολόγησης, τον αλγόριθμο κατανομής οπτικού μήκους κύματος, τον αριθμό οπτικών ινών που υπάρχουν σε κάθε κόμβο, τα μήκη κύματος ανά οπτική ίνα, τον φόρτο των κόμβων και τον αριθμό των διαδρομών που χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση. Έτσι, για την σύγκριση των αλγορίθμων και των δύο δικτύων (TEN-155 και τροποποιημένου TEN-155) τα πειράματα έγιναν με μία οπτική ίνα και 8 μήκη κύματος για φόρτους 25, 30, 35, 40, 45 και 50 Erlangs, τα δε γεγονότα – αιτήματα διασύνδεσης που παράχθηκαν είναι 10000 προκαταρκτικά και 1000000 κανονικά.

Πειράματα έγιναν επίσης, στην τοπολογία του δικτύου TEN-155 με περισσότερες από μία ίνες (1, 2, 4, 8) για να εκτιμηθεί η επίδοση του δικτύου με πολλαπλές οπτικές ίνες.

Όλες οι προσομοιώσεις των αλγορίθμων δρομολόγησης έγιναν με την ταυτόχρονη επιλογή και ενός αλγορίθμου κατανομής οπτικού μήκους κύματος. Οι μέθοδοι που συμμετείχαν και αξιολογούνται είναι α) Τυχαίας Κατανομής (*Random*) και β) Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*). Στα γραφήματα 2 και 3 φαίνεται ότι η απόδοση των δύο μεθόδων κατανομής, στο δίκτυο TEN-155 και τροποποιημένο TEN-155, όταν ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος Συντομότερης Διαδρομής (SP), είναι παρόμοια. Πιθανή εξήγηση για την παραπάνω συμπεριφορά είναι η ύπαρξη μίας και μόνο συντομότερης διαδρομής. Όταν ο αλγόριθμος δρομολόγησης γίνεται ο Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής (ASP), είναι εμφανές (γραφήματα 4 και 5) ότι η μέθοδος Τυχαίας κατανομής (*Random*) αποδίδει καλύτερα. Όταν, όμως, ο φόρτος των κόμβων γίνεται μεγαλύτερος των 40 Erlang η απόδοση των μεθόδων συγκλίνει με τον αλγόριθμο Τυχαίας κατανομής να τείνει να παρουσιάσει μεγαλύτερη πιθανότητα αποκλεισμού. Η τεκμηρίωση τέτοιας τάσης, βέβαια, απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση και πειραματισμό. Παρόμοια τάση



παρουσιάζουν οι δύο μέθοδοι όταν αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (*LLR*). Στην περίπτωση όμως αυτή, η μέθοδος με την οποία παρουσιάζεται χαμηλότερη πιθανότητα αποκλεισμού για τα δύο δίκτυα είναι η μέθοδος του Πρώτου Διαθέσιμου (γραφήματα 6 και 7).

Σε ότι αφορά στην απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης, ο αλγόριθμος της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (*LLR*) εμφανίζει τη μικρότερη πιθανότητα αποκλεισμού όταν η μέθοδος κατανομής οπτικού μήκους κύματος είναι η «Πρώτου Διαθέσιμου» με δεύτερο τον αλγόριθμο Εναλλακτικής Διαδρομής (πίνακας 2), Όταν η κατανομή γίνεται τυχαία, ο αλγόριθμος Εναλλακτικής Διαδρομής αποδίδει καλύτερα με δεύτερο τον αλγόριθμο της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής.

	Τυχαία Κατανομή	Κατανομή Πρώτου Διαθέσιμου
1)	Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής ( <i>ASP</i> )	Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής ( <i>LLR</i> )
2)	Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής ( <i>LLR</i> )	Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής ( <i>ASP</i> )
3)	Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> )	Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> )

Πίνακας 2. Σειρά κατάταξης των αλγορίθμων σύμφωνα με την μικρότερη πιθανότητα αποκλεισμού για τα δύο δίκτυα (TEN-155, τροποποιημένο TEN-155).

Η σειρά κατάταξης των αλγορίθμων ισχύει για τα δύο δίκτυα που εξετάζονται. Η καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου δρομολόγησης της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής, όταν μέθοδος κατανομής είναι η μέθοδος του Πρώτου Διαθέσιμου, οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος υπολογίζει τη διαδρομή που έχει περισσότερα ελεύθερα μήκη κύματος διαθέσιμα πριν επιχειρήσει ανάθεση. Κατά συνέπεια, η μέθοδος του Πρώτου Διαθέσιμου έχει μια ακριβή εικόνα της κατάστασης της διαδρομής πριν επιλέξει το πρώτο από τη σειρά των είδη προεπιλεγμένων. Ο

αλγόριθμος της Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής αποδίδει καλύτερα όταν ισχύει η μέθοδος της Τυχαίας κατανομής γιατί η εναλλακτική διαδρομή εξυπηρετεί τις υπερχειλίσεις (αστοχίες) ανάθεσης μήκους κύματος της πρώτης συντομότερης διαδρομής κάνοντας έτσι μια δεύτερη (ή k-th) τυχαία προσπάθεια. Ο αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής παρουσιάζει την μεγαλύτερη πιθανότητα αποκλεισμού από τις άλλες δύο μεθόδους για το λόγο ότι η συντομότερη διαδρομή έχει μεν μικρότερο βάρος ως προς το μήκος της διαδρομής, αλλά σε περίπτωση κορεσμού των συνδέσμων δεν δίνεται εναλλακτική διέξοδος. Στο δίκτυο TEN-155, πολλές διαδρομές αναγκάζονται να διέρχονται από τα ίδια σημεία πχ κόμβος 1 (FRA).

Ένα από τα ερωτήματα που απασχολούν τους ερευνητές [7] είναι και η σχεδίαση δικτύων που δεν παρουσιάζουν φαινόμενα αποκλεισμού (Non Blocking Networks) όπως παρουσιάζει το δίκτυο TEN-155. Στα αμιγώς οπτικά δίκτυα, υπό έρευνα, είναι η και χρήση πολλαπλών οπτικών ινών για τη σχεδίαση NBNs. Στην παρούσα εργασία έγιναν πειράματα προσομοίωσης δικτύων με πολλαπλές ίνες και όπως φαίνεται στα γραφήματα 12 – 15 έχει αυξηθεί η απόδοση των αλγορίθμων κατά 25% περίπου για κάθε δύο ίνες. Όμως, όπως φαίνεται από τα γραφήματα 12 και 13, η πιθανότητα αποκλεισμού για 8 και 4 ίνες και για φόρτο κόμβων 20 Erlangs, είναι περίπου ταυτόσημη. Όμως, στην περίπτωση των 4 ινών αυξάνει ανάλογα με το φόρτο ενώ για 8 ίνες παραμένει σχεδόν αμετάβλητη υποδηλώνοντας, ίσως, ότι από τις 8 και πάνω (ίσως από τις 6 ή 7 – μένει να διερευνηθεί μελλοντικά) η πιθανότητα αποκλεισμού, για το συγκεκριμένο δίκτυο, δεν μεταβάλλεται.

Ένας από τους σκοπούς της προσομοίωσης δύο παραλλαγών του δικτύου TEN-155 ήταν και η διερεύνηση της επίδρασης στην απόδοση που θα είχε η προσθήκη στο αρχικό δίκτυο σχήμα 4.7 επιπλέον κόμβων ώστε οι δύο εναλλακτικές διαδρομές που θα προκύψουν να μην έχουν κοινούς συνδέσμους (*edge disjoint*) και να παρέχεται δυνατότητα αποκατάστασης διαδρομής σε περίπτωση αστοχίας κάποιου κόμβου. Για το σκοπό αυτό προστέθηκαν 8 επιπλέον σύνδεσμοι ώστε να δημιουργηθεί το δίκτυο του σχήματος 4.8. Συνέπεια, βέβαια, των παραπάνω ήταν να αυξηθεί ο βαθμός κόμβων (*nodal degree*) από 5 σε 9 και να εξαλειφθούν οι κόμβου με βαθμό εισόδων εξόδων (*In-out degree*) ίσο με 2. Στα αποτελέσματα (γραφήματα 16 και 17) που προέκυψαν, αποδεικνύεται ότι η αύξηση της απόδοσης του δικτύου είναι για όλες τις μεθόδους δρομολόγησης και κατανομής οπτικού μήκους κύματος της τάξεως του 40%.

Τέλος, το θέμα της δρομολόγησης και της κατανομής οπτικού μήκους κύματος (WR – WA) σε αμιγώς οπτικά δίκτυα Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Οπτικού Μήκους Κύματος (WDM), που φαίνονται ως μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες στον τομέα των δικτύων, μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω με την σχεδίαση και εφαρμογή νέων μεθόδων δρομολόγησης και κατανομής καθώς και σε θέματα που δεν εξετάστηκαν από την παρούσα εργασία όπως η εφαρμογή εναλλακτών μήκους κύματος, τα πρωτόκολλα ελέγχου, IP/WDM και άλλα.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα και Συζήτηση

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων δρομολόγησης Συντομότερης Διαδρομής (SP), Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής (ASP), του αλγορίθμου Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (LLR) καθώς των μεθόδων Τυχαίας (Random) και Πρώτου Διαθέσιμου (First-Fit) κατανομής οπτικού μήκους κύματος έγιναν συνολικά 218 πειράματα προσομοίωσης με διαφορετικές παραμέτρους (παράρτημα Α). Οι παράμετροι αφορούν στον αλγόριθμο δρομολόγησης, τον αλγόριθμο κατανομής οπτικού μήκους κύματος, τον αριθμό οπτικών ινών που υπάρχουν σε κάθε κόμβο, τα μήκη κύματος ανά οπτική ίνα, τον φόρτο των κόμβων και τον αριθμό των διαδρομών που χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση. Έτσι, για την σύγκριση των αλγορίθμων και των δύο δικτύων (TEN-155 και τροποποιημένου TEN-155) τα πειράματα έγιναν με μία οπτική ίνα και 8 μήκη κύματος για φόρτους 25, 30, 35, 40, 45 και 50 Erlangs, τα δε γεγονότα – αιτήματα διασύνδεσης που παράχθηκαν είναι 10000 προκαταρκτικά και 1000000 κανονικά.

Πειράματα έγιναν επίσης, στην τοπολογία του δικτύου TEN-155 με περισσότερες από μία ίνες (1, 2, 4, 8) για να εκτιμηθεί η επίδοση του δικτύου με πολλαπλές οπτικές ίνες.

Όλες οι προσομοιώσεις των αλγορίθμων δρομολόγησης έγιναν με την ταυτόχρονη επιλογή και ενός αλγορίθμου κατανομής οπτικού μήκους κύματος. Οι μέθοδοι που συμμετείχαν και αξιολογούνται είναι α) Τυχαίας Κατανομής (*Random*) και β) Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*). Στα γραφήματα 2 και 3 φαίνεται ότι η απόδοση των δύο μεθόδων κατανομής, στο δίκτυο TEN-155 και τροποποιημένο TEN-155, όταν ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος Συντομότερης Διαδρομής (SP), είναι παρόμοια. Πιθανή εξήγηση για την παραπάνω συμπεριφορά είναι η ύπαρξη μίας και μόνο συντομότερης διαδρομής. Όταν ο αλγόριθμος δρομολόγησης γίνεται ο Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής (ASP), είναι εμφανές (γραφήματα 4 και 5) ότι η μέθοδος Τυχαίας κατανομής (*Random*) αποδίδει καλύτερα. Όταν, όμως, ο φόρτος των κόμβων γίνεται μεγαλύτερος των 40 Erlang η απόδοση των μεθόδων συγκλίνει με τον αλγόριθμο Τυχαίας κατανομής να τείνει να παρουσιάσει μεγαλύτερη πιθανότητα αποκλεισμού. Η τεκμηρίωση τέτοιας τάσης, βέβαια, απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση και πειραματισμό. Παρόμοια τάση

παρουσιάζουν οι δύο μέθοδοι όταν αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (*LLR*). Στην περίπτωση όμως αυτή, η μέθοδος με την οποία παρουσιάζεται χαμηλότερη πιθανότητα αποκλεισμού για τα δύο δίκτυα είναι η μέθοδος του Πρώτου Διαθέσιμου (γραφήματα 6 και 7).

Σε ότι αφορά στην απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης, ο αλγόριθμος της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (*LLR*) εμφανίζει τη μικρότερη πιθανότητα αποκλεισμού όταν η μέθοδος κατανομής οπτικού μήκους κύματος είναι η «Πρώτου Διαθέσιμου» με δεύτερο τον αλγόριθμο Εναλλακτικής Διαδρομής (πίνακας 2), Όταν η κατανομή γίνεται τυχαία, ο αλγόριθμος Εναλλακτικής Διαδρομής αποδίδει καλύτερα με δεύτερο τον αλγόριθμο της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής.

	Τυχαία Κατανομή	Κατανομή Πρώτου Διαθέσιμου
1)	Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής ( <i>ASP</i> )	Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής ( <i>LLR</i> )
2)	Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής ( <i>LLR</i> )	Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής ( <i>ASP</i> )
3)	Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> )	Συντομότερης Διαδρομής ( <i>SP</i> )

Πίνακας 2. Σειρά κατάταξης των αλγορίθμων σύμφωνα με την μικρότερη πιθανότητα αποκλεισμού για τα δύο δίκτυα (TEN-155, τροποποιημένο TEN-155).

Η σειρά κατάταξης των αλγορίθμων ισχύει για τα δύο δίκτυα που εξετάζονται. Η καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου δρομολόγησης της Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής, όταν μέθοδος κατανομής είναι η μέθοδος του Πρώτου Διαθέσιμου, οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος υπολογίζει τη διαδρομή που έχει περισσότερα ελεύθερα μήκη κύματος διαθέσιμα πριν επιχειρήσει ανάθεση. Κατά συνέπεια, η μέθοδος του Πρώτου Διαθέσιμου έχει μια ακριβή εικόνα της κατάστασης της διαδρομής πριν επιλέξει το πρώτο από τη σειρά των είδη προεπιλεγμένων. Ο

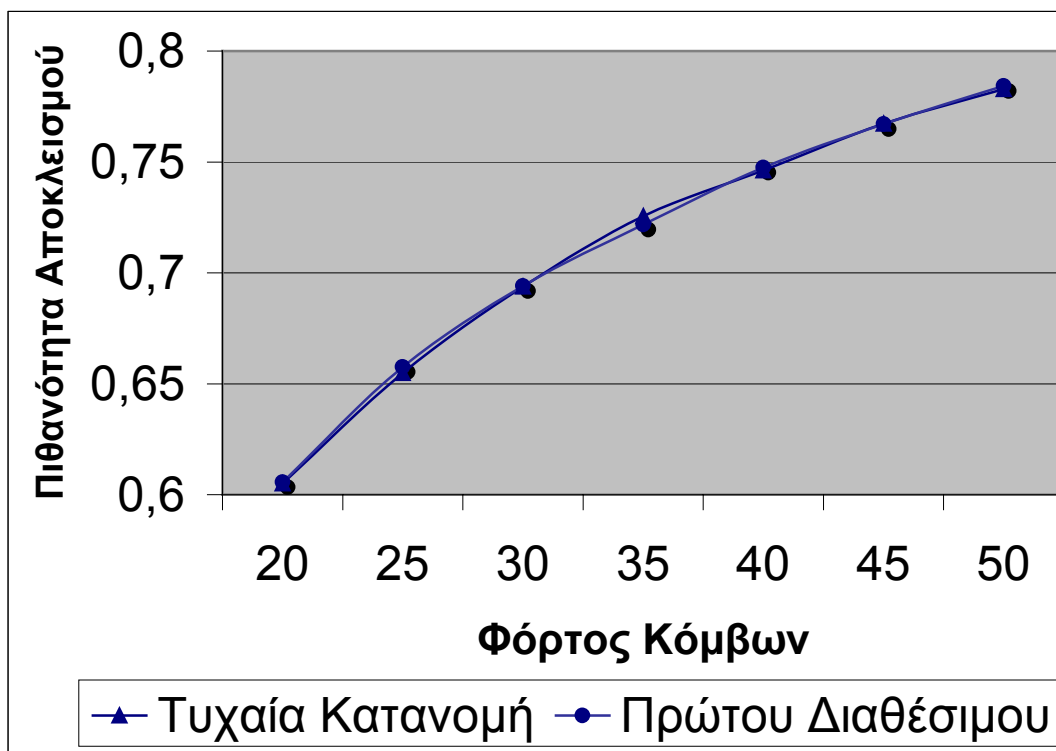
αλγόριθμος της Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής αποδίδει καλύτερα όταν ισχύει η μέθοδος της Τυχαίας κατανομής γιατί η εναλλακτική διαδρομή εξυπηρετεί τις υπερχειλίσεις (αστοχίες) ανάθεσης μήκους κύματος της πρώτης συντομότερης διαδρομής κάνοντας έτσι μια δεύτερη (ή k-th) τυχαία προσπάθεια. Ο αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής παρουσιάζει την μεγαλύτερη πιθανότητα αποκλεισμού από τις άλλες δύο μεθόδους για το λόγο ότι η συντομότερη διαδρομή έχει μεν μικρότερο βάρος ως προς το μήκος της διαδρομής, αλλά σε περίπτωση κορεσμού των συνδέσμων δεν δίνεται εναλλακτική διέξοδος. Στο δίκτυο TEN-155, πολλές διαδρομές αναγκάζονται να διέρχονται από τα ίδια σημεία πχ κόμβος 1 (FRA).

Ένα από τα ερωτήματα που απασχολούν τους ερευνητές [7] είναι και η σχεδίαση δικτύων που δεν παρουσιάζουν φαινόμενα αποκλεισμού (Non Blocking Networks) όπως παρουσιάζει το δίκτυο TEN-155. Στα αμιγώς οπτικά δίκτυα, υπό έρευνα, είναι η και χρήση πολλαπλών οπτικών ινών για τη σχεδίαση NBNs. Στην παρούσα εργασία έγιναν πειράματα προσομοίωσης δικτύων με πολλαπλές ίνες και όπως φαίνεται στα γραφήματα 12 – 15 έχει αυξηθεί η απόδοση των αλγορίθμων κατά 25% περίπου για κάθε δύο ίνες. Όμως, όπως φαίνεται από τα γραφήματα 12 και 13, η πιθανότητα αποκλεισμού για 8 και 4 ίνες και για φόρτο κόμβων 20 Erlangs, είναι περίπου ταυτόσημη. Όμως, στην περίπτωση των 4 ινών αυξάνει ανάλογα με το φόρτο ενώ για 8 ίνες παραμένει σχεδόν αμετάβλητη υποδηλώνοντας, ίσως, ότι από τις 8 και πάνω (ίσως από τις 6 ή 7 – μένει να διερευνηθεί μελλοντικά) η πιθανότητα αποκλεισμού, για το συγκεκριμένο δίκτυο, δεν μεταβάλλεται.

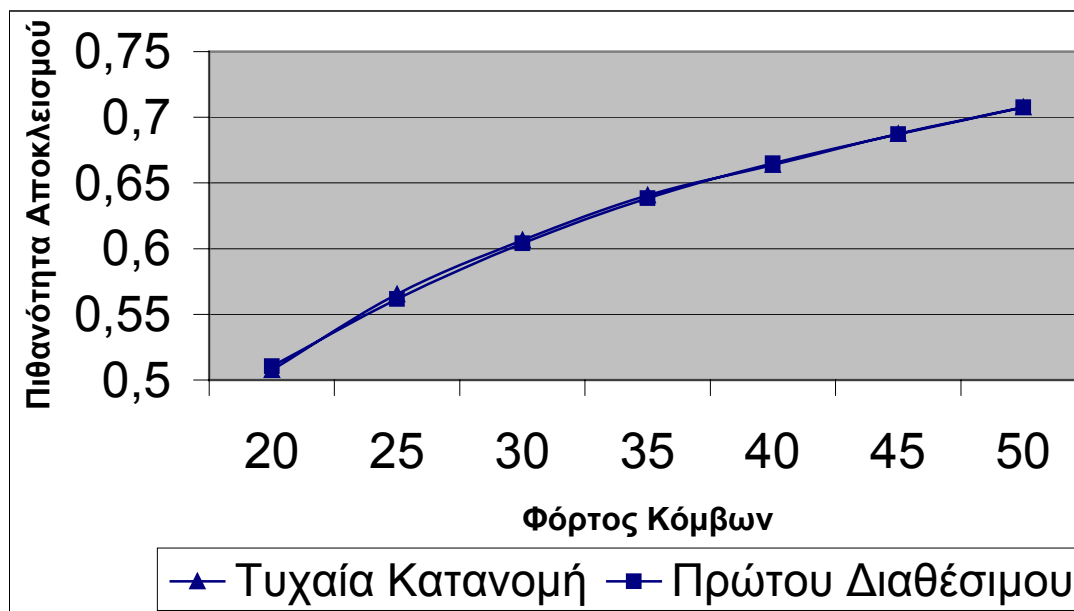
Ένας από τους σκοπούς της προσομοίωσης δύο παραλλαγών του δικτύου TEN-155 ήταν και η διερεύνηση της επίδρασης στην απόδοση που θα είχε η προσθήκη στο αρχικό δίκτυο σχήμα 4.7 επιπλέον κόμβων ώστε οι δύο εναλλακτικές διαδρομές που θα προκύψουν να μην έχουν κοινούς συνδέσμους (*edge disjoint*) και να παρέχεται δυνατότητα αποκατάστασης διαδρομής σε περίπτωση αστοχίας κάποιου κόμβου. Για το σκοπό αυτό προστέθηκαν 8 επιπλέον σύνδεσμοι ώστε να δημιουργηθεί το δίκτυο του σχήματος 4.8. Συνέπεια, βέβαια, των παραπάνω ήταν να αυξηθεί ο βαθμός κόμβων (*nodal degree*) από 5 σε 9 και να εξαλειφθούν οι κόμβοι με βαθμό εισόδων εξόδων (*In-out degree*) ίσο με 2. Στα αποτελέσματα (γραφήματα 16 και 17) που προέκυψαν, αποδεικνύεται ότι η αύξηση της απόδοσης του δικτύου είναι για όλες τις μεθόδους δρομολόγησης και κατανομής οπτικού μήκους κύματος της τάξεως του 40%.

Τέλος, το θέμα της δρομολόγησης και της κατανομής οπτικού μήκους κύματος (WR – WA) σε αμιγώς οπτικά δίκτυα Πολυπλεξίας Διαιρούμενου Οπτικού Μήκους Κύματος (WDM), που φαίνονται ως μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες στον τομέα των δικτύων, μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω με την σχεδίαση και εφαρμογή νέων μεθόδων δρομολόγησης και κατανομής καθώς και σε θέματα που δεν εξετάστηκαν από την παρούσα εργασία όπως η εφαρμογή εναλλακτών μήκους κύματος, τα πρωτόκολλα ελέγχου, IP/WDM και άλλα.

## 6.1 Γραφήματα Αποτελεσμάτων

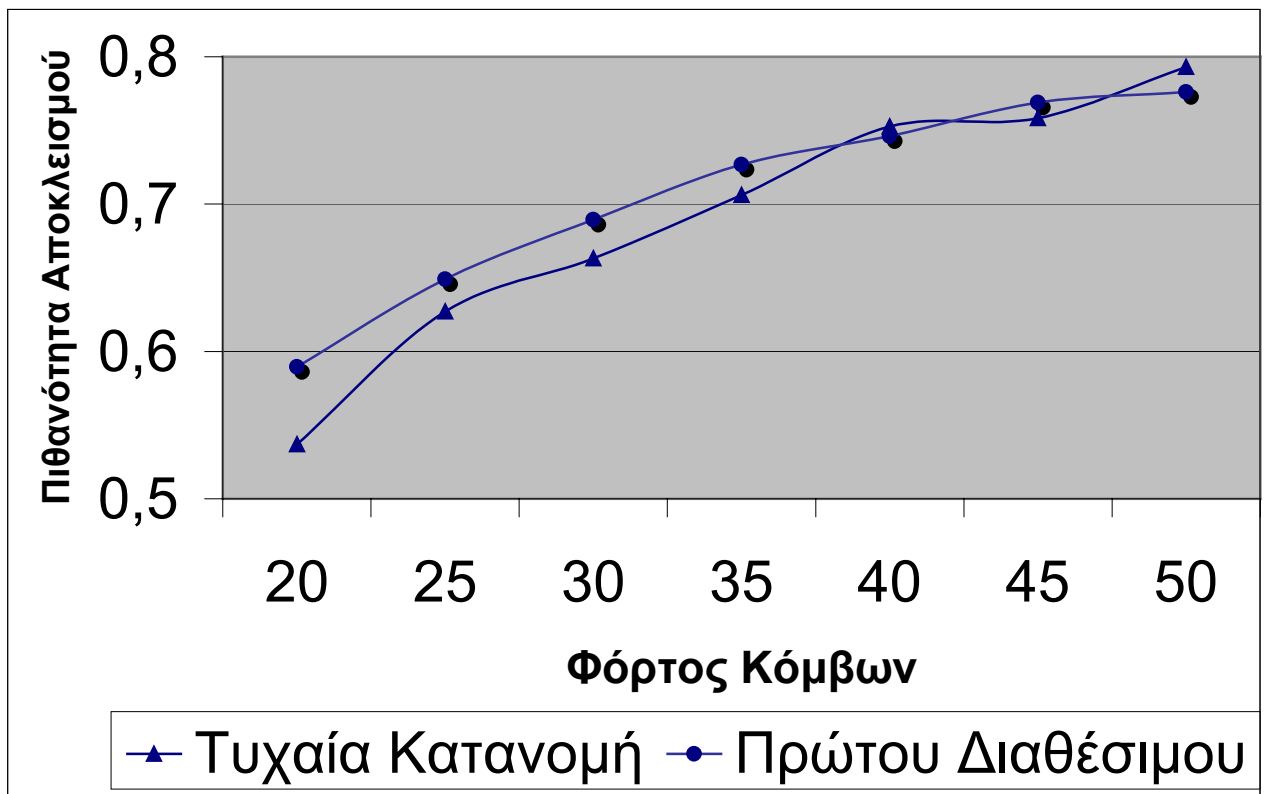


Γράφημα 2. Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Συντομότερης Διαδρομής (SP) για το δίκτυο TEN-155.

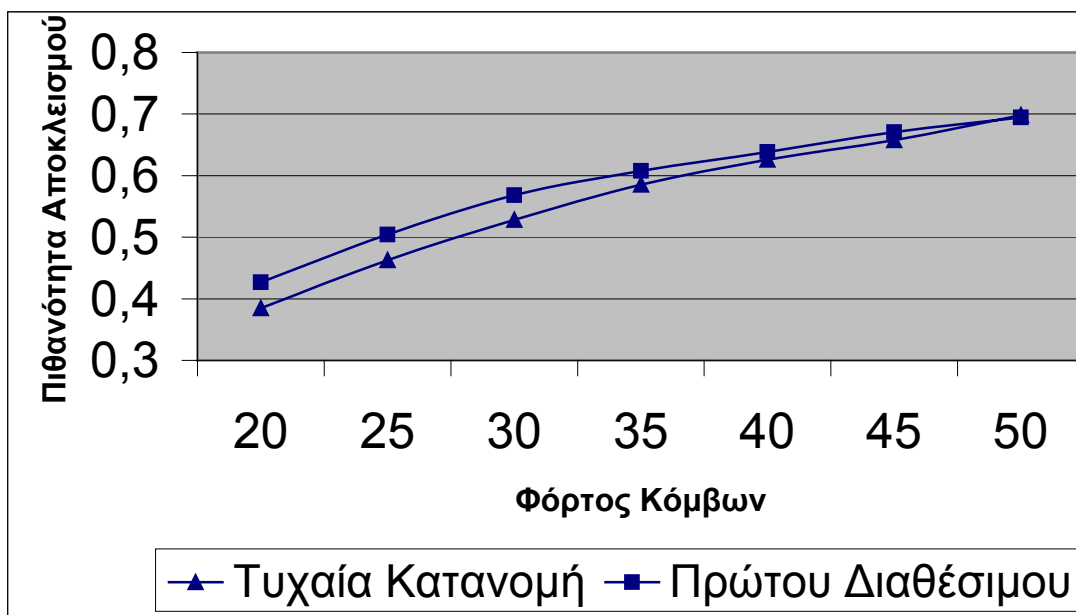


Γράφημα 3. Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Συντομότερης Διαδρομής (SP) για το τροποποιημένο TEN-155

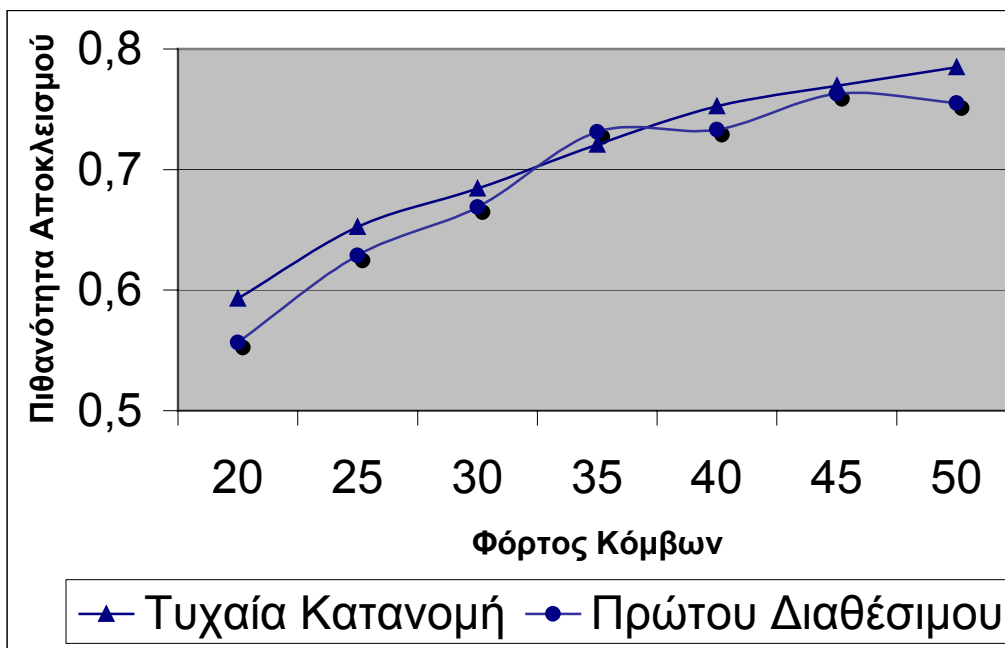




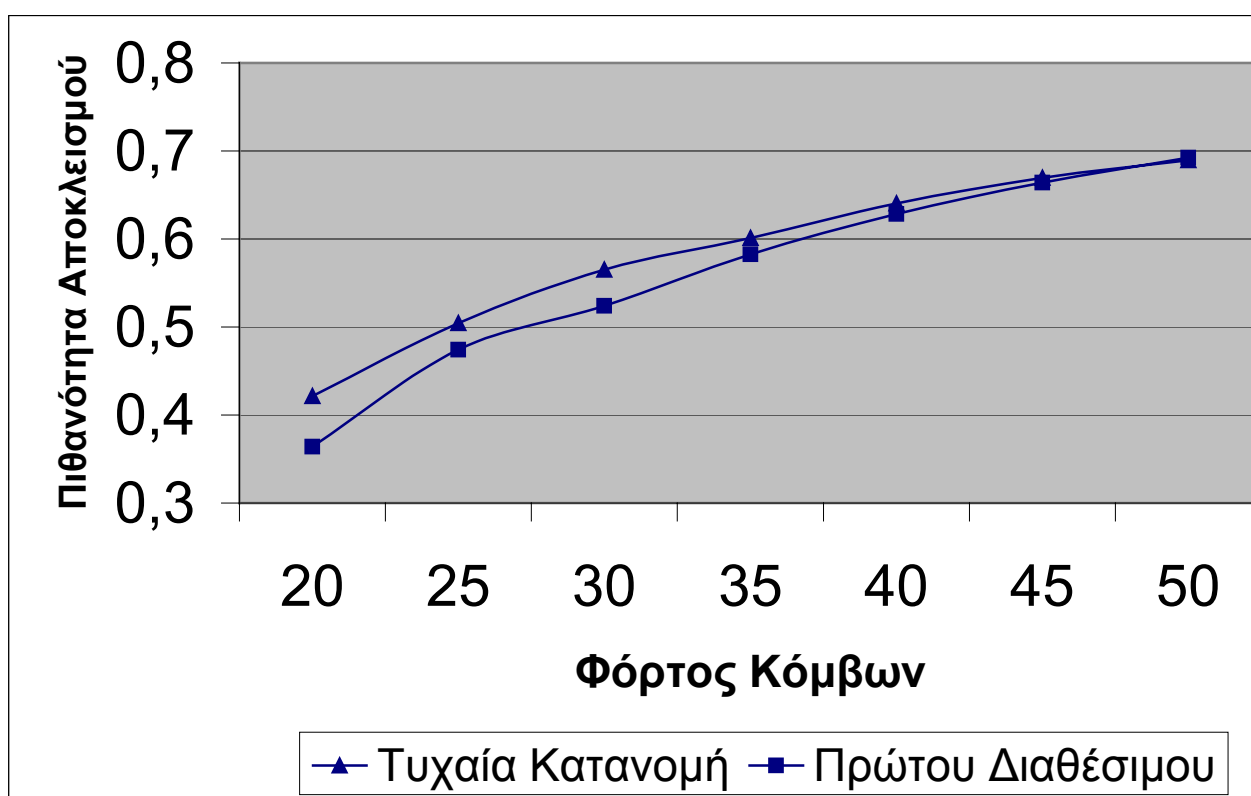
Γράφημα 4. Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής (ASP) για το δίκτυο TEN-155.



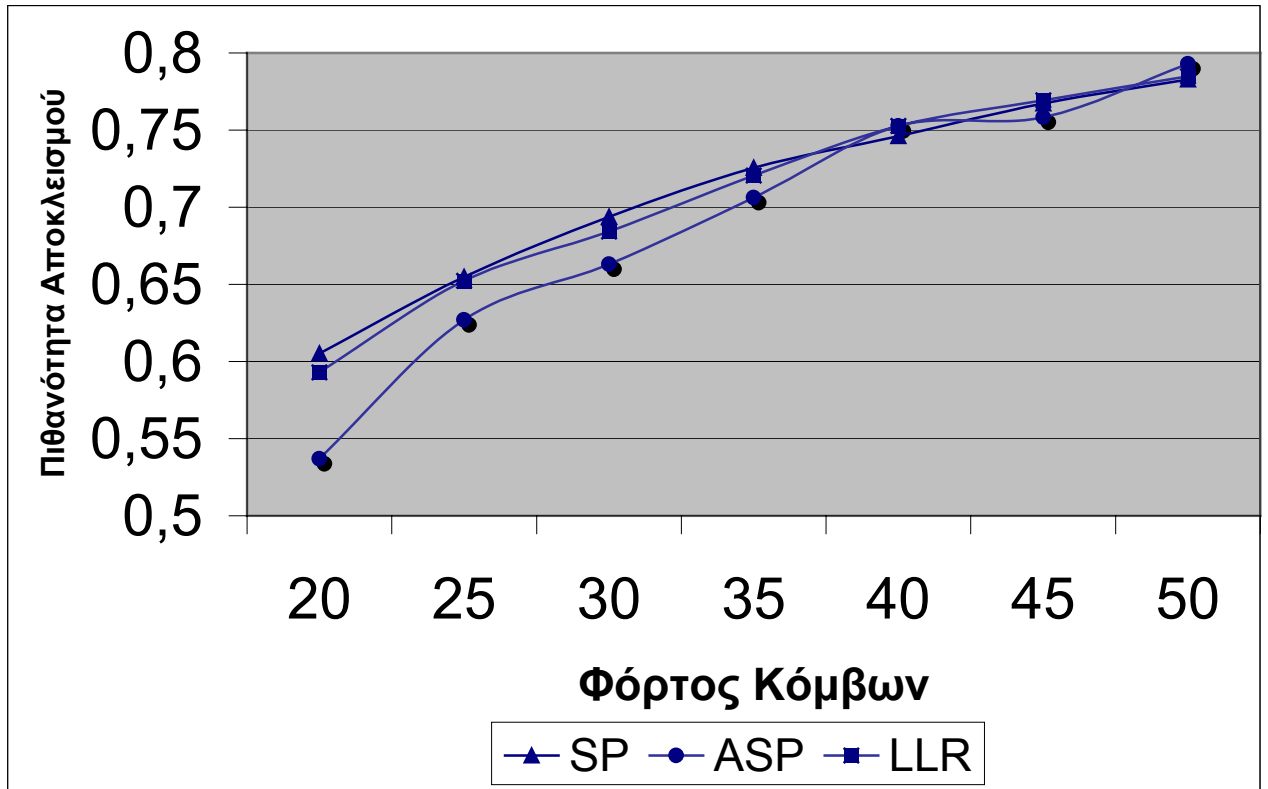
Γράφημα 5. Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Εναλλακτικής Συντομότερης Διαδρομής (ASP) για το τροποποιημένο TEN-155.



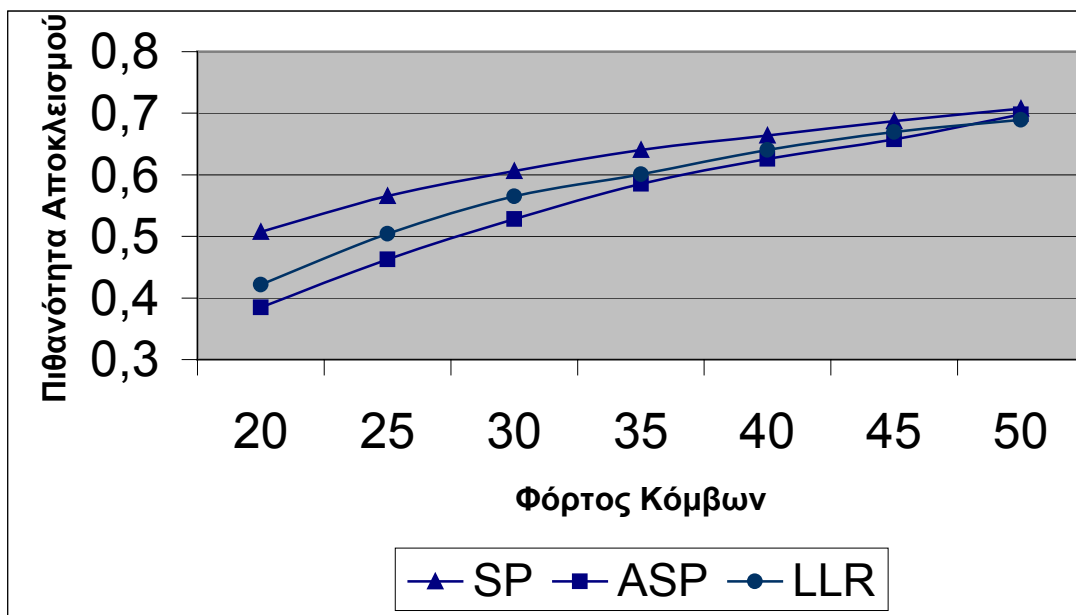
Γράφημα 6. Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (LLR) για το δίκτυο TEN-155.



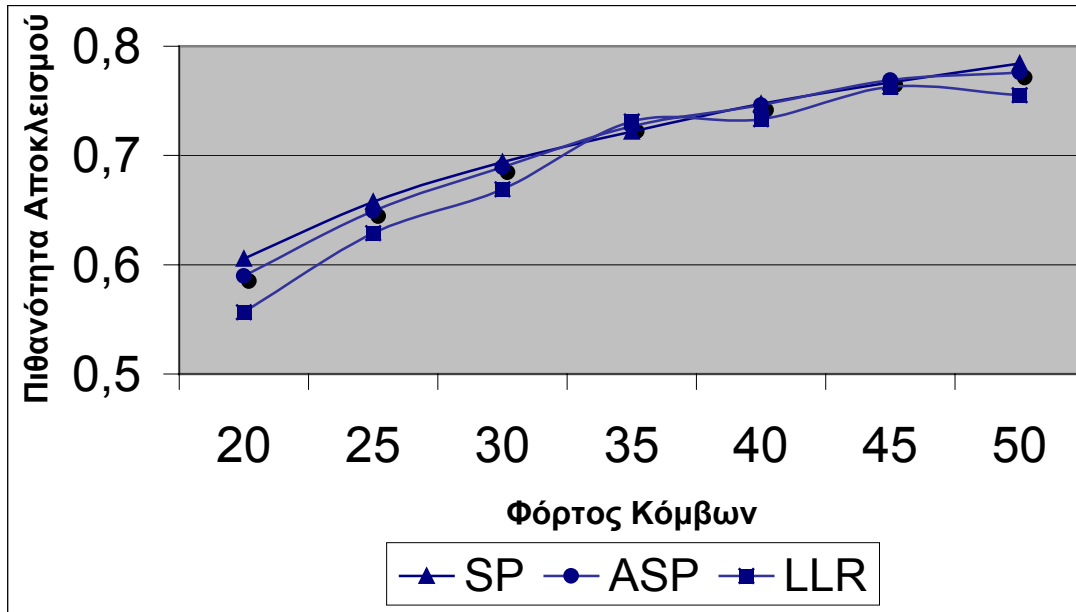
Γράφημα 7. Κατανομή μήκους κύματος και δρομολόγηση Λιγότερο Κορεσμένης Διαδρομής (LLR) για το τροποποιημένο TEN-155.



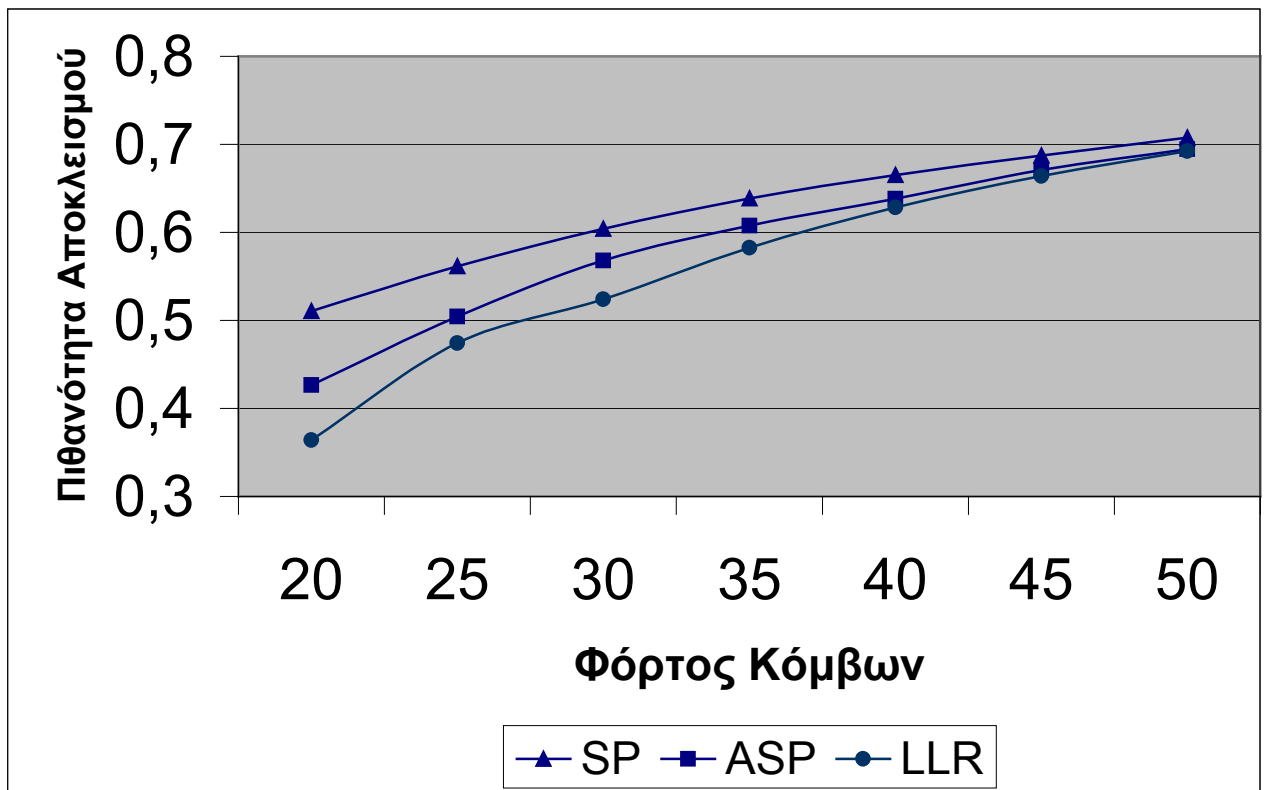
Γράφημα 8. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης με Τυχαία Κατανομή (Random) μήκους κύματος για το δίκτυο TEN-155.



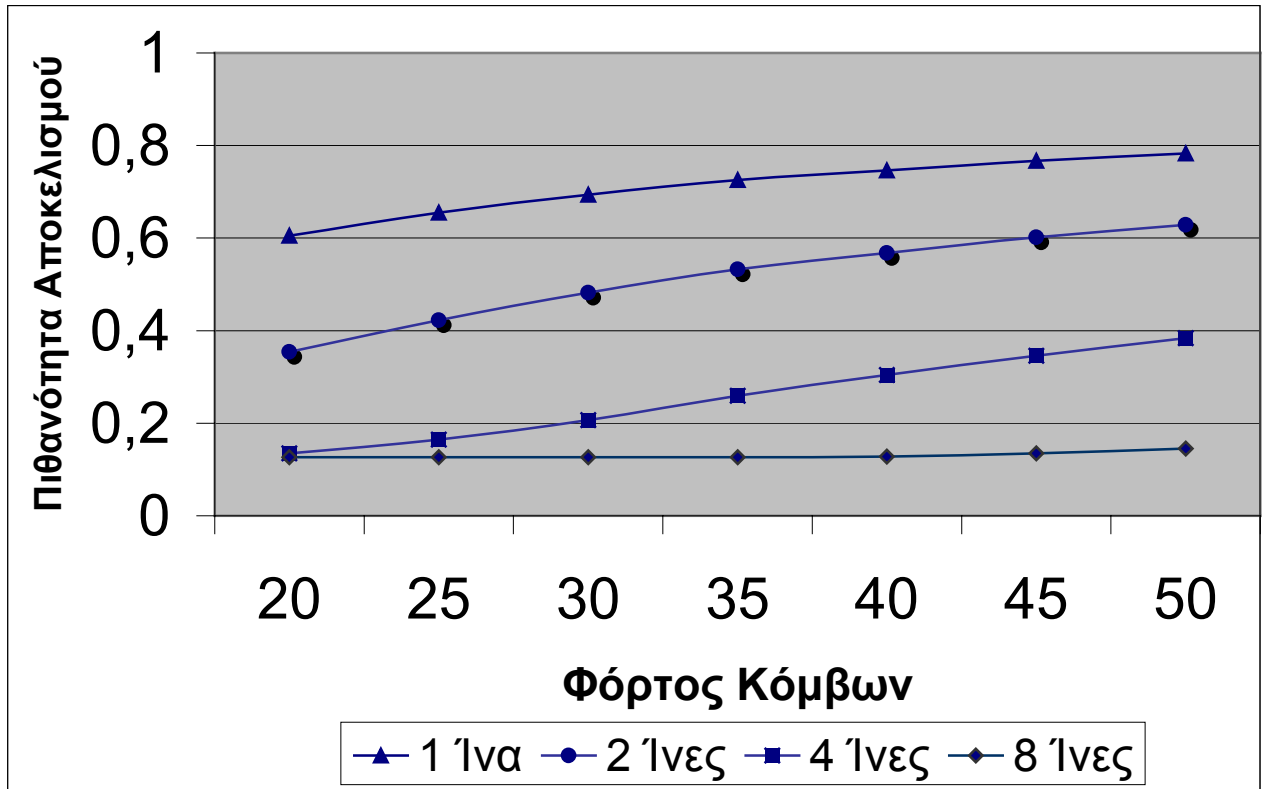
Γράφημα 9. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης με Τυχαία Κατανομή (Random) μήκους κύματος για το τροποποιημένο TEN-155.



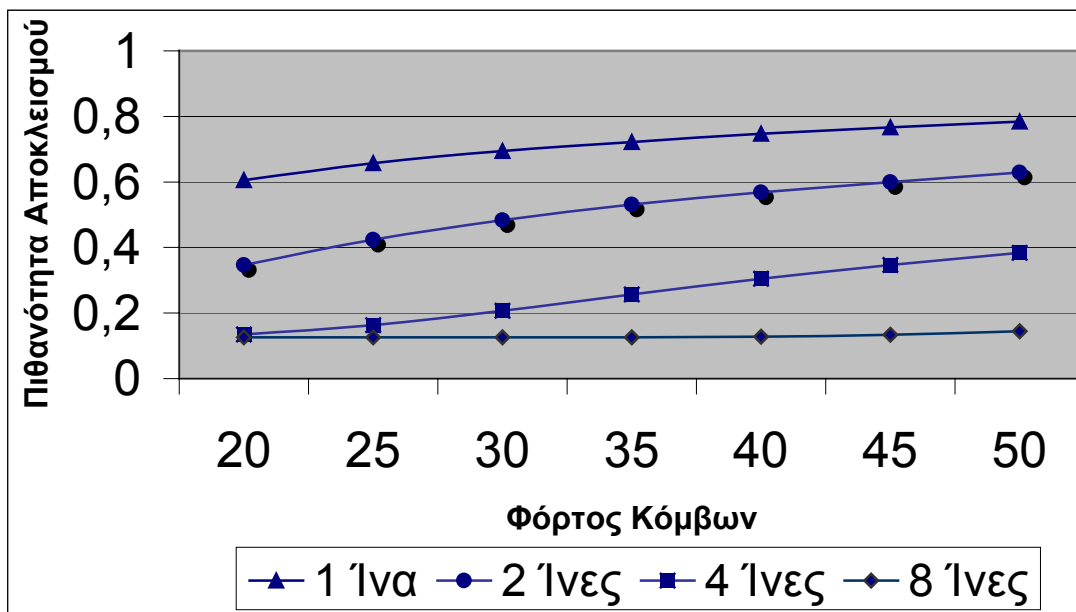
Γράφημα 10. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης και κατανομή μήκους κύματος Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*) για το δίκτυο TEN-155.



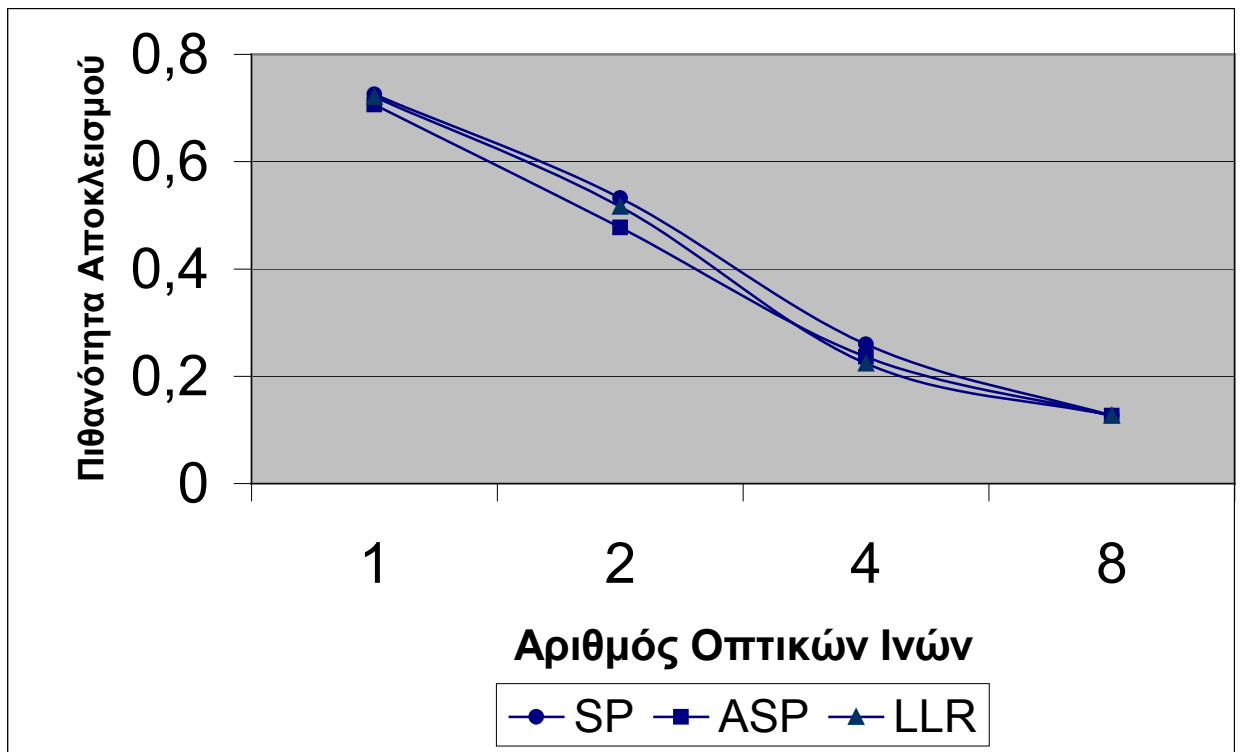
Γράφημα 11. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης και κατανομή μήκους κύματος Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*) για το τροποποιημένο TEN-155.



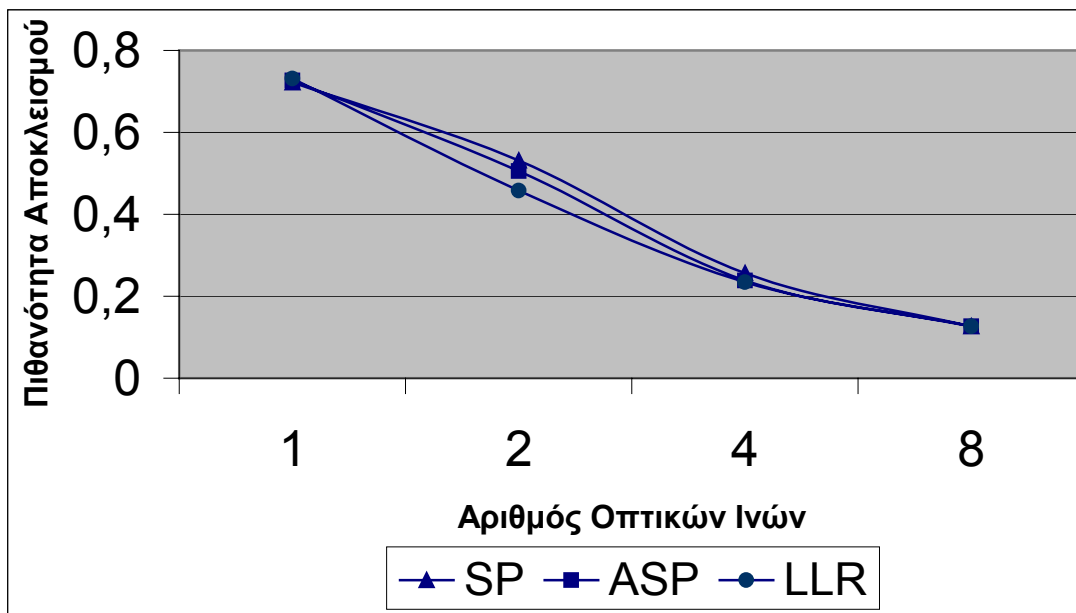
Γράφημα 12. Πιθανότητα Αποκλεισμού σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής (SP) με Τυχαία (*Random*) κατανομή μήκους κύματος για το δίκτυο TEN-155.



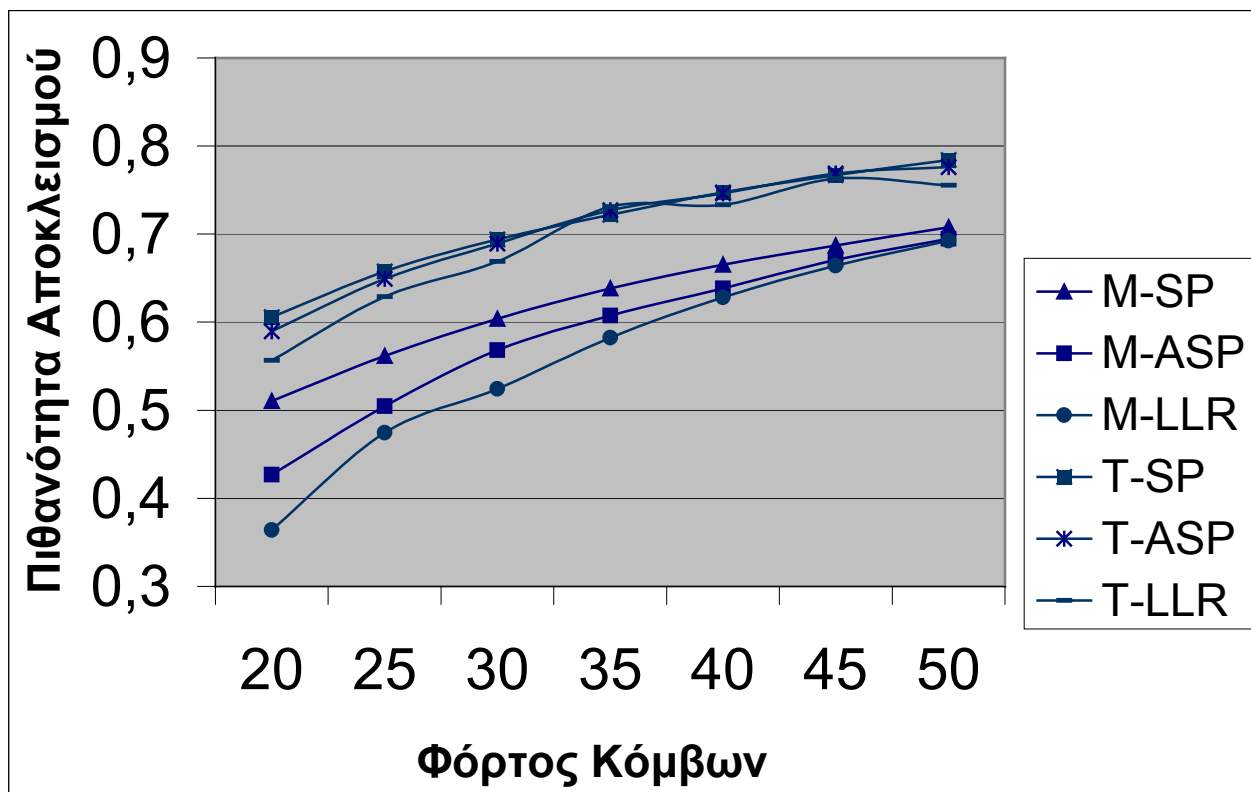
Γράφημα 13. Πιθανότητα Αποκλεισμού σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο αλγόριθμος της Συντομότερης Διαδρομής (SP) με κατανομή Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*) για το δίκτυο TEN-155.



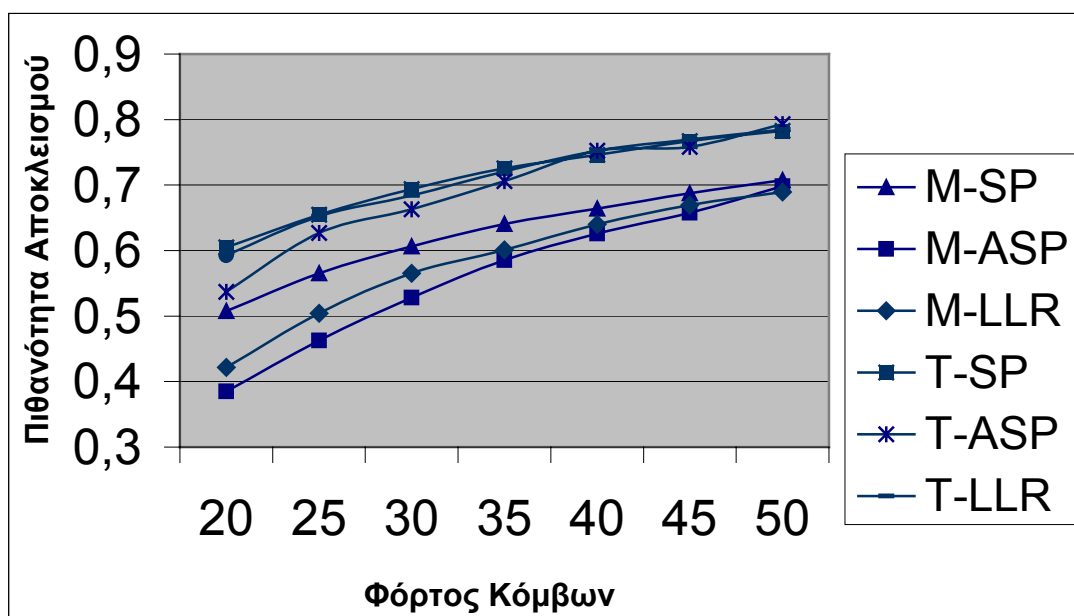
Γράφημα 14. Πιθανότητα Αποκλεισμού για τις μεθόδους δρομολόγησης σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών ανά σύνδεσμο. Μέθοδος κατανομής μήκους κύματος είναι Τυχαία (*Random*) και φόρτος κόμβων 35 Erlangs για το δίκτυο TEN-155.



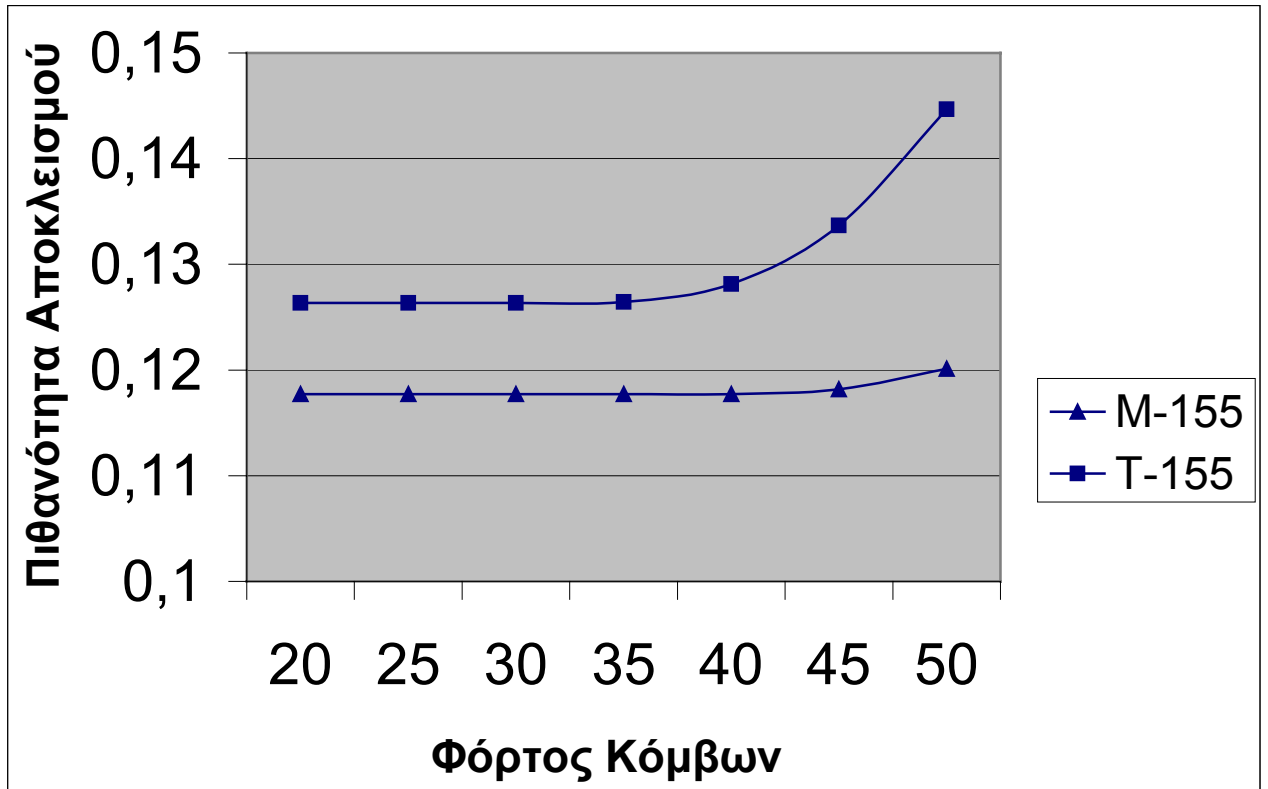
Γράφημα 15. Πιθανότητα Αποκλεισμού για τις μεθόδους δρομολόγησης σε σχέση με τον αριθμό οπτικών ινών ανά σύνδεσμο. Μέθοδος κατανομής μήκους κύματος είναι η Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*) και φόρτος κόμβων 35 Erlangs για το δίκτυο TEN-155



Γράφημα 16. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης στο δίκτυο TEN-155 (T-SP, T-ASP, T-LLR) και στο τροποποιημένο TEN-155 (M-SP, M-ASP, M-LLR) σε σχέση με κατανομή μήκους κύματος Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*).



Γράφημα 17. Απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης στο δίκτυο TEN-155 (T-SP, T-ASP, T-LLR) και στο τροποποιημένο TEN-155 (M-SP, M-ASP, M-LLR) σε σχέση με Τυχαία (Random) κατανομή μήκους κύματος.



Γράφημα 18. Πιθανότητα Αποκλεισμού του τροποποιημένου δικτύου TEN-155 (M-155) και του αρχικού (T-155) όταν ο αριθμός ιών είναι 8, δρομολόγηση Συντομότερης Διαδρομής και κατανομή Πρώτου Διαθέσιμου (*First-Fit*).



## Βιβλιογραφία

- [1] P. E. Green, Jr., *Fiber Optic Networks*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- [2] J. Walrand and P. Varaiya, *High-Performance Communication Networks*, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1996.
- [3] B. Mukherjee *Optical Communication Networks*, New York, NY: McGraw Hill, 1997.
- [4] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy and A. Mukherjee, "Some Principles for Designing a Wide-Area WDM Optical Network", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4. no. 5. Pp.684 - 96
- [5] B. Mukherjee et al. "Optical Components for WDM Lightwave Networks"
- [6] Yair Bartal and Stefano Leonardi. "On-line routing in all-optical networks" In *ICALP: Annual International Colloquium on Automata, Languages and Programming, 1997*.
- [7] Birman and A. Kershenbaum. "Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking". In *Proceedings of the 14th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'95)*
- [8] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, "Purely Optical Networks for Terabit Communication", *Proc. IEEE INFOCOM'89*, pp.887-896.
- [9] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol.3, no.5, Oct. 1995, pp.489-500.
- [10] D. Banerjee, B. Mukherjee, "A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks", *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, vol.14, no.5, June 1996, pp.903-908.
- [11] N. Wauters, P. Demeester, "Design of the Optical Path Layer in Multiwavelength Cross-Connected Networks", *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, vol.14, no.5, June 1996, pp.881-892.
- [12] G. Jeong, E. Ayanoglu, "Comparison of Wavelength-Interchanging and Wavelength-Selective Cross-Connects in Multiwavelength All-Optical network-s", *Proc. IEEE INFOCOM'96*, pp.156-163.

- [13] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol.3, no.5, Oct. 1995, pp.489-500.
- [14] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 840-851, June 1996.
- [15] Hiroaki Harai, Masayuki Murata, and Hideo Miyahara, "Performance of alternate routing methods in all-optical switching networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '97*, April 1997, vol. 2, pp. 517-525.
- [16] A. Birman, "Computing Approximate Blocking Probabilities for a Class of All-Optical Networks", *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, vol 13, pp.852-857, June, 1996.
- [17] R. Ramaswami and A. Segall, "Distributed Network Control for Wavelength Routed Optical Networks," *IEEE INFOCOM'96*, Vol. 1, pp. 138-147, 1996.
- [18] J. A. Bannister, L. Fratta, and M. Gerla. "Topological Design of the Wavelength-Division Optical Network." In *Proceedings of IEEE INFOCOM '90*, volume 3, pp. 1005-1013, San Francisco, California, June 1990.
- [19] M. Kovacevic and A. S. Acampora, "Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 868-880, June 1996
- [20] R. Ramaswami and K.N. Sivarajan, *Optical networks: a practical perspective*, Morgan-Kaufman, San Francisco, CA, 1998.
- [21] Ling Li and Arun K. Somani, "Fiber Requirement in Multifiber WDM Networks with Alternate-Path Routing", *Proc. ICCCN '99*, Boston, MA, 1999.
- [22] Ling Li and Arun K. Somani, "A New Analytical Model for Multifiber WDM Networks", *Proc. Globecom '99*, pp. 1007 - 1011, Rio de Janeiro, Brazil, December 1999.
- [23] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp. 197-206, Vol. 6, No. 2, April 1998.
- [24] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Fixed-Alternate Routing and Wavelength Conversion in Wavelength-Routed Optical Networks," *Proc. IEEE Globecom '98*, Vol. 4, pp. 2295-2303, Sydney, Australia, Nov. 1998.

- [25] E. Karasan and E. Ayanoglu, "Effects of Wavelength Routing and Selection Algorithms on Wavelength Conversion Gain in WDM Optical Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp. 186-196, Vol. 6, No 2, April 1998.
- [26] S. Subramaniam and R. Barry, "Dynamic Wavelength Assignment in Fixed Routing WDM Networks", *Proc. IEEE ICC '97*, pp. 406-410, Montreal, Canada, Nov. 1997.
- [27] X. Zhang and C. Qiao, "Wavelength Assignment for Dynamic Traffic in Multifiber WDM Networks", *Proc. ICCCN '98*, pp. 479-485, 1998.
- [28] S. Banerjee, V. Jain, S. Shah, "Regular Multihop Logical Topologies for Lightwave Networks" *IEEE Communications Surveys*, First Quarter 1999, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>
- [29] K. Sivarajan and R. Ramaswami, "Multihop Lightwave networks based on de Bruijn graphs," *IEEE INFOCOM '91*, Bal Harbor, FL, pp. 1001–1011, April 1991.
- [30] S. Banerjee, J. Iness, and B. Mukherjee, "New Modular Architectures for Regular Multihop Lightwave Networks," *Proc., Conf. on Optical Fiber Communications/IOOC*, '93, San Jose, CA, pp. 147–148, Feb. 1993.
- [31] J. Iness, S. Banerjee, and B. Mukherjee, "GEMNet: A Generalized, Shuffle-Exchange-Based, Regular, Scalable, Modular, Multihop, WDM Light-wave Network," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 3, no. 4, pp.470–476, Aug. 1995.
- [32] K. Sivarajan and R. Ramaswami, "Multihop Lightwave Network Based on de Bruin Graph," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 2, no. 1, Feb. 1994.
- [33] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength routed optical networks", *Proc. Infocom'95, IEEE JSAC/JLT*, 1996.
- [34] K. Bala, T.E. Stern, and K. Bala, "Algorithms for routing in a linear lightwave network". *Proc. INFOCOM'91*, pages 1 - 9, 1991.
- [35] S.-P. Chung, A. Kashper, and K.W. Ross, "Computing Approximate Blocking Probabilities for Large Loss Networks with State-Dependent Routing", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 1, pp.105-115, February, 1993
- [36] Z. Zhang and A. S. Acampora, "A heuristic wavelength assignment algorithm for multihop WDM networks with wavelength routing and wavelength re-use," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 3, no. 5, pp. 281-288, June 1995.
- [37] <http://www.dante.net/pubs/dip>
- [38] <http://www.research.ibm.com/wdm/>