



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση Ζεύξεων Πολύτροπων Ινών για Εφαρμογές
σε Κέντρα Δεδομένων**

**Νικόλαος Γ. Βαρυθυμιάδης
Δημήτριος Ι. Κάσσο**

**Επιβλέποντες: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής
Χρήστος Τσεκρέκος, Επιστημονικός Συνεργάτης**

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μοντελοποίηση Ζεύξεων Πολύτροπων Ινών για Εφαρμογές σε Κέντρα Δεδομένων

Νικόλαος Γ. Βαρυθυμιάδης

A.M.: 1115200800197

Δημήτριος Ι. Κάσσο

A.M.: 1115200900219

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής
Χρήστος Τσεκρέκος, Επιστημονικός Συνεργάτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση για τη δημιουργία ενός μοντέλου που περιγράφει τη συνάρτηση μεταφοράς μίας πολύτροπης οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται για μετάδοση με Διαμόρφωση Έντασης και Άμεση Φώραση (Intensity Modulation Direct Detection). Συγκεκριμένα το ενδιαφέρον εστιάζεται σε πολύτροπες ίνες OM4 που έχουν μεγάλο 3dB Bandwidth στα 850nm. Αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε κέντρα δεδομένων, στα οποία εστιάζουμε κυρίως τη προσοχή μας, στο γενικότερο πλαίσιο της συνεχούς αυξανόμενης ανάγκης για πιο γρήγορη μεταφορά δεδομένων που αυτά έχουν. Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Comsol και Matlab. Το μοντέλο βασίστηκε σε προηγούμενο που είχε στόχο τη μελέτη του Κοντινού Πεδίου (Near Field Pattern) στην έξοδο της πολύτροπης ίνας.

Αρχικά γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στα κέντρα δεδομένων και στις οπτικές ίνες με γνώμονα να προβληθεί η αναγκαιότητα για συνδέσεις μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Ακόμη το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο παρουσιάζεται για τον αναγνώστη που δεν γνωρίζει ακριβώς το αντικείμενο της εργασίας. Αναλύεται η μοντελοποίηση της οπτικής ίνας, όλες οι μαθηματικές σχέσεις και δίνονται αναλυτικά σχήματα που προκύπτουν ή περιγράφουν τη κάθε μία που χρησιμοποιήθηκε. Αξιοποιείται επίσης υλικό της βιβλιογραφίας για τον έλεγχο της ορθότητας των υπολογισμών. Ενδελεχώς αναφέρονται στοιχεία από άλλες διερευνήσεις που βοηθούν στον έλεγχο και τη διόρθωση του μοντέλου. Σκοπός είναι να επικυρωθούν τα αποτελέσματα της εργασίας. Αφού η αξιολόγηση ολοκληρωθεί λαμβάνει χώρα η μοντελοποίηση του καναλιού μετάδοσης, δηλαδή η συνάρτηση μεταφοράς της ίνας.

Τέλος, μελετάται η συνάρτηση μεταφοράς για διαφορετικές συνθήκες διέγερσης της ίνας όπως αυτές προκύπτουν από ένα σύστημα που χρησιμοποιεί Πολυπλεξία Ομάδων Τρόπων (Mode Group Diversity Multiplexing), μία μέθοδος που χρησιμοποιεί διαφορετικά χωρικά κανάλια μέσα στην ίνα για τη μεταφορά περισσότερης πληροφορίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτό να υλοποιηθεί ένα σύστημα με 3dB Bandwidth 4x25GHz. Το σύστημα αυτό θα μπορούσε να μεταφέρει 4x25Gbit/s με διαμόρφωση On-Off-Keying και 4x100Gbit/s με διαμόρφωση Nyquist-PAM4.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Κανάλια οπτικών ινών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Πολυπλεξία Ομάδων Τρόπων, πολύτροπες ίνες, OM4, κέντρα δεδομένων, βελτιστοποίηση

ABSTRACT

The thesis is occupied with the development of a model to describe the transfer function of a certain multimode fiber that it is used for transmission with Intensity Modulation Direct Detection. Specifically the interest is focused on multimode fibers OM4, which have large 3dB Bandwidth at 850nm. These are widely used in datacenters, an area where we focus mainly our attention, in the broader context of the continuously increasing need for higher bandwidth that they have. In order to develop the model the software Comsol and Matlab were used. The model was based on a previous one, which was aiming to study the Near Field Pattern, at the exit of the multimode fiber.

Initially there is cited a short introduction related to the datacenters and the fibers, concerning the need to project the necessity for connection of higher bandwidth. Moreover, in that part, it is provided the prerequisite knowledge, for the reader who is not familiar with the subject of the thesis. The model of the fiber and all the mathematical relations are analyzed and detailed figures are provided, deriving or describing each one that has been used. The bibliography is also utilized in order to reassure the correctness of calculations. Elements from other researches are mentioned here in details in order to help either control or correct the model. The purpose is to validate the results of the thesis. When the evaluation is completed the modelling of the transmission channel, which is the transfer function of the fiber, is occurred.

Finally, it is studied the transfer function, in different excitation conditions of the fiber, as they are deriving from a system that uses Mode Group Diversity Multiplexing. This method which uses different spatially channels within the fiber leading to more information to be transferred. The results are proving that is able to create a system with 3dB Bandwidth 4x25GHz. This system could transfer 4x25Gbit/s with On-Off-Keying modulation and 4x100Gbit/s with Nyquist-PAM4 modulation.

SUBJECT AREA: Optical fiber channels

KEYWORDS: Mode Group Diversity Multiplexing, multimode fibers, OM4, datacenters, optimization

ΣΤΙΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΕΣ ΜΑΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Κέντρα Δεδομένων	13
1.2 Οπτική Ίνα	14
1.3 Δομή Εργασίας.....	16
2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ	17
2.1 Δείκτης Διάθλασης	17
2.2 Τύπος Sellmeier	19
2.3 Χρωματική διασπορά	20
2.4 Υπολογισμός Αριθμού Τρόπων.....	21
2.5 Ομάδες Τρόπων	22
2.6 Καθυστέρηση Διάδοσης Τρόπου	22
2.7 Διαφορική Εξασθένιση Ομάδας Τρόπων	24
3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ	25
3.1 Αριθμός Ομάδων Τρόπων.....	25
3.2 Διαφορική Εξασθένιση Ομάδας Τρόπων	26
3.3 Σταθερά Διάδοσης.....	27
3.4 Ακρίβεια των Υπολογισμών	28
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	30
4.1 Συντελεστής Διέγερσης Τρόπου	30
4.2 Κρουστική απόκρουση	32
4.3 Συνάρτηση Μεταφοράς.....	33
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	36
5.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων.....	36
5.2 Τελικά Αποτελέσματα.....	38
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	42

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	43
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ - ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	44
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	45

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Αύξηση της παγκόσμιας IP κίνησης σε Datacenter [1].	13
Σχήμα 2. Παγκόσμια κίνηση δεδομένων των Datacenter ανα προορισμό [1].	14
Σχήμα 3. Πραγματικό (n) και φανταστικό (k) μέρος του σύνθετου δείκτη διάθλασης του γυαλιού silica όπως καταγράφεται στη βιβλιογραφία. Κάθε διαφορετικό σύμβολο αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική έρευνα, τα στοιχεία των οποίων μπορούν να βρεθούν στη δημοσίευση [2].	18
Σχήμα 4. Με μπλε χρώμα η γραφική παράσταση με τις σταθερές της Corning και με κόκκινο με τις εναλλακτικές.	20
Σχήμα 5. Χρονική διεύρυνση μεταδιδόμενου παλμου.	20
Σχήμα 6. Με μπλε η χρωματική διασπορά $D0$ και με κόκκινο ο δείκτης ομάδας ng για τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος.	21
Σχήμα 7. Καθυστέρηση διάδοσης ανα τρόπο για $g = 2$ και $\lambda = 850nm$.	23
Σχήμα 8. Καθυστέρηση διάδοσης ανα Mode Group για $g = 2$ και $\lambda = 850nm$.	23
Σχήμα 9. Εξασθένιση ανα Mode Group σύμφωνα με τη σχέση (11), για $\gamma_0 = 2.35 dB/km$ και $M = 18$ στα $850nm$ μήκους κύματος.	24
Σχήμα 10. Παρατηρούμε τη μεταβολή του αριθμού των Mode Groups για ένα εύρος μηκών κύματος, από 0.6 μέχρι $1.8\mu m$, στα οποία γίνεται συνήθως η μεταφορά δεδομένων σε μια ίνα.	26
Σχήμα 11. Σύγκριση Σχετικής Καθυστέρησης. Αριστερά το σχήμα της αναφοράς [6] και δεξιά το σχήμα που παράχθηκε από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το Comsol, με δεδομένα εισόδου αυτά του Κεφαλαίου 3.1.	26
Σχήμα 12. Σταθερά διάδοσης β_n για την OM4 με $g = 2$ και $\lambda = 850nm$.	27
Σχήμα 13. Σύγκριση Σταθεράς Διάδοσης. Αριστερά το σχήμα από την αναλυτική σχέση της αναφοράς [7] και δεξιά αυτό των αποτελεσμάτων του μοντέλου για OM4, $g = 2$ και $\lambda = 850nm$.	28
Σχήμα 14. Ο συντελεστής διέγερσης ρ_n .	31
Σχήμα 15. Κρουστική απόκρουση συστήματος μετά από διάδοση 100 μέτρων.	32
Σχήμα 16. Κρουστική απόκρουση, μεγέθυνση από το Σχήμα 15.	32
Σχήμα 17. Η συνάρτηση μεταφοράς λόγω χρωματικής διασποράς μετά από μετάδοση σε ίνα $100m$ για $\sigma\lambda = 0.4nm$, $S0 = 0.105$, $\lambda_0 = 1310nm$ και $\lambda = 850nm$.	34
Σχήμα 18. Απόκριση συχνότητας της ίνας για μετάδοση $100m$ και $\gamma_0 = 2.35 dB/km$. Με μπλε ο υπολογισμός με χρωματική διασπορά και με κόκκινο χωρίς για radial offset $10\mu m$.	35
Σχήμα 19. Excitation spectrum με το πεδίο του fundamental mode της GI-MMF και radial offsets που αναγράφονται στο σχήμα.	37
Σχήμα 20. Excitation spectrum με το πεδίο της SI-SMF και radial offsets που αναγράφονται στο σχήμα.	37
Σχήμα 21. Σύγκριση των σχετικών καθυστερήσεων των mode groups ως προς το πρώτο, που παράγονται για τους εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.	38

Σχήμα 22. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset μm και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.....	39
Σχήμα 23. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset $7\mu\text{m}$ και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.	39
Σχήμα 24. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset $14\mu\text{m}$ και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.	40
Σχήμα 25. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset $19\mu\text{m}$ και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.	40
Σχήμα 26. Αποκρίσεις συχνότητας για $g = 1.96$ και για τα radial offsets που αναγράφονται στο σχήμα.	41

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Μονότροπη και πολύτροπη μετάδοση φωτός.....	15
Εικόνα 2. Προφίλ του δείκτη διάθλασης.....	15
Εικόνα 3. Γωνία υποδοχής οπτικής ίνας.....	19
Εικόνα 4. Στοιχεία για τον υπολογισμό του Comsol. Κάτω δεξιά φαίνεται σε μεγέθυνση ένα κομμάτι στο όριο πυρήνα-cladding.....	29
Εικόνα 5. Στοιχεία για τον υπολογισμό του Comsol, με μεγάλη ακρίβεια. Κάτω δεξιά φαίνεται σε μεγέθυνση ένα κομμάτι στο όριο πυρήνα-cladding.	29
Εικόνα 6. Το προφίλ του πεδίου διέγερσης E_n για το fundamental mode με radial offset 10 μ m.	31
Εικόνα 7. Αριστερά το πεδίο διέγερσης E_n και δεξιά η ισχύς του πεδίου E_n^2 με radial offset 10 μ m.....	31
Εικόνα 8. Γκαουσιανές καμπάνες από το fundamental mode για την GI-MMF αριστερά και για την SI-SMF δεξιά.....	36
Εικόνα 9. Γκαουσιανές καμπάνες από το fundamental mode για την GI-MMF αριστερά και για την SI-SMF δεξιά.....	36

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Οι σταθερές της Corning ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα της εταιρείας [5] και αντίστοιχα τα υπόλοιπα αποτελέσματα από τις αναφορές RP-Photonics [3] και Wikipedia [4]. Τα δεδομένα της στήλης 1 αναφέρονται σε μετρήσεις με το υλικό να βρίσκεται σε θερμοκρασία 22°C και της στήλης 2 σε 20°C. 19

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή αυτή εργασία σηματοδοτεί την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μας στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Αποτέλεσε τη πιο όμορφη περίοδο καθώς, αφενός είχαν ολοκληρωθεί οι υποχρεώσεις μας απέναντι στα προπτυχιακά μαθήματα και αφετέρου η εμπειρία και η γνώση από τα χρόνια των σπουδών ενσωματώθηκαν σε κάτι απτό, στη διερεύνησή μας για τη παρούσα εργασία. Η ενασχόλησή μας με το αντικείμενο των οπτικών επικοινωνιών ξεκίνησε κατά τη παρακολούθηση του μαθήματος «Οπτικές Επικοινωνίες και Οπτικά Δίκτυα». Μας κέντρισε το ενδιαφέρον τόσο ως επιστημονικό πεδίο όσο και ως κλάδος ο οποίος φαίνεται να έχει ραγδαία εξέλιξη. Στόχος μας κυρίως ήταν να γνωρίσουμε και να κατανοήσουμε βαθύτερα το φυσικό επίπεδο του δικτύου που μέχρι στιγμής δεν μας είχε δοθεί η δυνατότητα.

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Χρήστο Τσεκρέκο, για την άψογη συνεργασία του και την αδιάλειπτη μέριμνά του κατά την εξέλιξή της. Η βοήθεια του ήταν καθοριστικός παράγοντας στην ολοκλήρωση της εργασίας και η αστείρευτη γνώση που μας παρείχε αποτελεί για μας παρακαταθήκη στη συνέχεια των σπουδών μας. Ακόμη θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Καθ. Δημήτρη Συβρίδη που, από το δικό του ζήλο για την επιστήμη, μας ενέπνευσε να ασχοληθούμε με το τομέα των οπτικών επικοινωνιών και μας καθοδήγησε στη πορεία εύρεσης θεματολογίας για τη πτυχιακή εργασία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κέντρα Δεδομένων

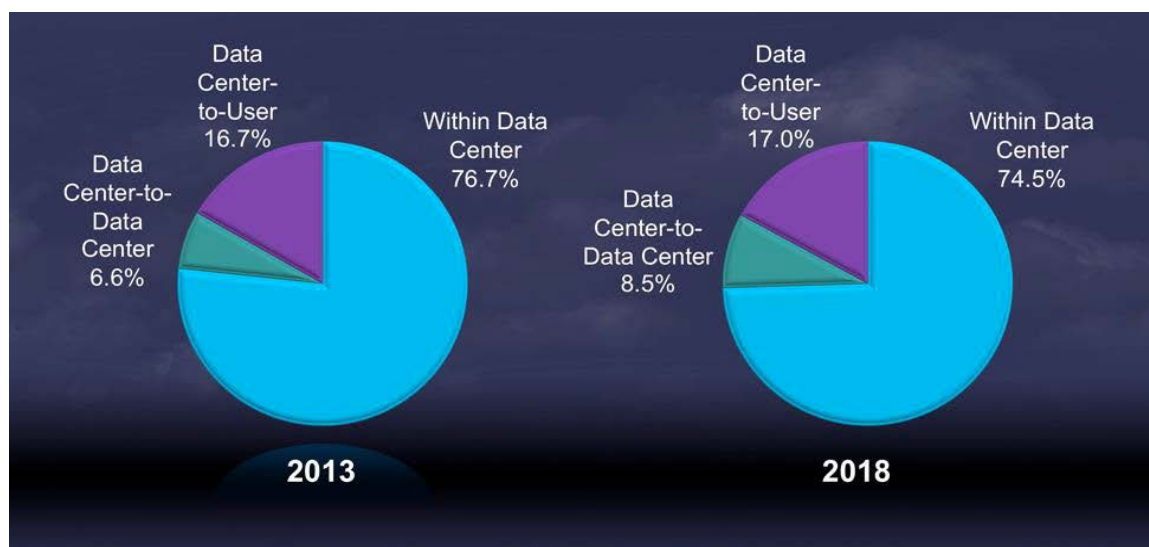
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα των Κέντρων Δεδομένων (Datacenters). Η τάση του Cloud Computing, του Streaming, της αύξησης των δεδομένων και της διασύνδεσης των πάντων, είναι που καθορίζουν τις εξελίξεις. Πιο συγκεκριμένα, ο τεράστιος αυτός όγκος δεδομένων που καθημερινά διακινείται και αποθηκεύεται έχει δημιουργήσει την ανάγκη λειτουργίας μεγάλων Datacenters με πολύ υψηλές προδιαγραφές τόσο στον όγκο όσο και στη ταχύτητα διάθεσης των δεδομένων. Σε πολλές περιπτώσεις οι εταιρίες Online υπηρεσιών, και όχι μόνο, εγκαθιστούν Datacenters διάσπαρτα σε όλη τη Γη που αλληλοσυνδέονται με απώτερο σκοπό την ακόμα πιο γρήγορη διάθεση δεδομένων και υπηρεσιών στον χρήστη.

Οι προβλέψεις δεν δείχνουν να υπάρχει επιβράδυνση τα επόμενα χρόνια στον τομέα των Datacenters, που πλέον η αξία του ανέρχεται στη τάξη των δεκάδων δισεκατομμυρίων. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την αναφορά [1] προβλέπεται πολύ μεγάλη αύξηση της κίνησης δεδομένων, της τάξης των 23% το χρόνο, μέχρι το 2018.



Σχήμα 1. Αύξηση της παγκόσμιας IP κίνησης σε Datacenter [1].

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι συνδέσεις στα κέντρα δεδομένων. Ο ρόλος τους είναι κύρια να μεταφέρουν δεδομένα μεταξύ των υπολογιστικών μονάδων αλλά και στον έξω κόσμο. Πράγμα που παρατηρείται και από την αναφορά [1], στο Σχήμα 2, ότι η παγκόσμια κίνηση δεδομένων σε μεγάλο ποσοστό πραγματοποιείται εντός των Datacenters για τις ανάγκες που έχουν τα ίδια. Προκύπτει έτσι η ανάγκη για βελτίωση του τρόπου σύνδεσης των επιμέρους μηχανημάτων εσωτερικά των Datacenters. Αυτός είναι και ο λόγος που τα τελευταία χρόνια μεγάλο κομμάτι της έρευνας έχει αφιερωθεί στον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων για τέτοιες χρήσεις. Σκοπός είναι πιο αξιόπιστα, με μεγαλύτερη ταχύτητα αλλά και πιο οικονομικά να πραγματοποιείται η δικτύωση των Datacenters. Η ενασχόληση των ερευνητών υπόκειται τόσο στη κατασκευή ποιοτικότερου υλικού όσο και στη μελέτη της διαμόρφωσης του σήματος που θα το διατρέχει. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει αλματώδης βελτίωση η οποία έχει σπάσει τους φραγμούς στην αποθήκευση και μετάδοση των δεδομένων παγκοσμίως.



Σχήμα 2. Παγκόσμια κίνηση δεδομένων των Datacenter ανα προορισμό [1].

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται είναι είτε από χαλκό, είτε οπτικές ίνες. Ο χαλκός είναι το παλιό πρότυπο και χρησιμοποιείται ακόμα, σε κάποιες περιπτώσεις, για αποστάσεις ως 100 μέτρα. Από την άλλη οι οπτικές ίνες έχουν διαδοθεί τελευταία χάρις στις σημαντικές ιδιότητες τους και καταλαμβάνουν σημαντικό μερίδιο, ιδιαίτερα στα νεόδμητα Datacenter. Καταναλώνουν λιγότερο ρεύμα λόγω της μικρής τάσης που χρειάζονται για να λειτουργήσουν και κυρίως έχουν πολύ λιγότερες απώλειες αφού δεν επηρεάζονται από τις παρεμβολές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων όπου με τα αντίστοιχα καλώδια του χαλκού θα ήταν αναγκαίοι αρκετοί αναμεταδότες και κατά συνέπεια μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και συντήρησης. Επιπρόσθετα οι οπτικές ίνες μεταφέρουν περισσότερη ποσότητα πληροφορίας από ότι το κοινό χάλκινο καλώδιο και σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος και βάρος τους μπορούν να μειώσουν πολύ τον όγκο της καλωδίωσης.

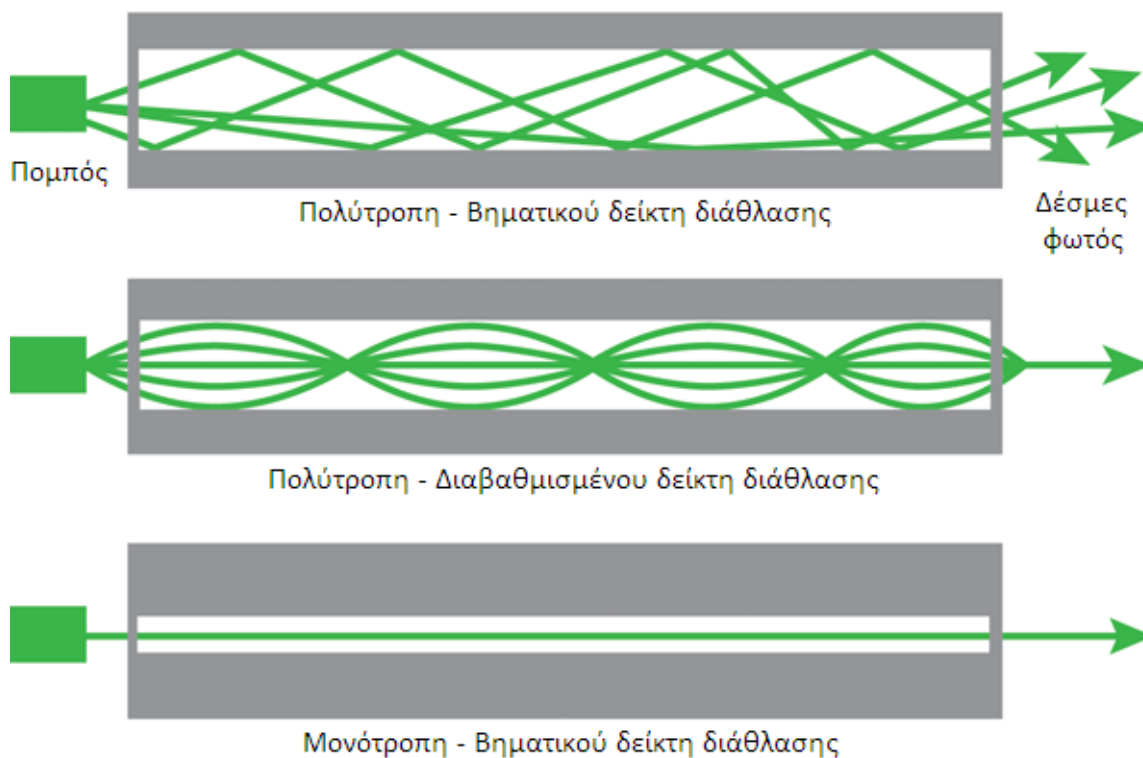
Εν κατακλείδι η δικτύωση οπτικών ινών είναι ένας ευρέως εξελισσόμενος τομέας έρευνας που έχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, και τα στοιχεία δείχνουν ότι ίσως σύντομα να μονοπωλήσει την αγορά των καλωδίων δικτύωσης ειδικά για εφαρμογές σε Datacenter.

1.2 Οπτική Ίνα

Με τη πάροδο των ετών έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι οπτικών ινών που ο κάθε ένας υποστηρίζει τις ιδιαίτερες απαιτήσεις διάφορων τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών. Για όλους τους τύπους των οπτικών ινών υπάρχουν διεθνή πρότυπα στα οποία προδιαγράφονται τα χαρακτηριστικά μετάδοσης καθώς και τα γεωμετρικά, μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά αυτών.

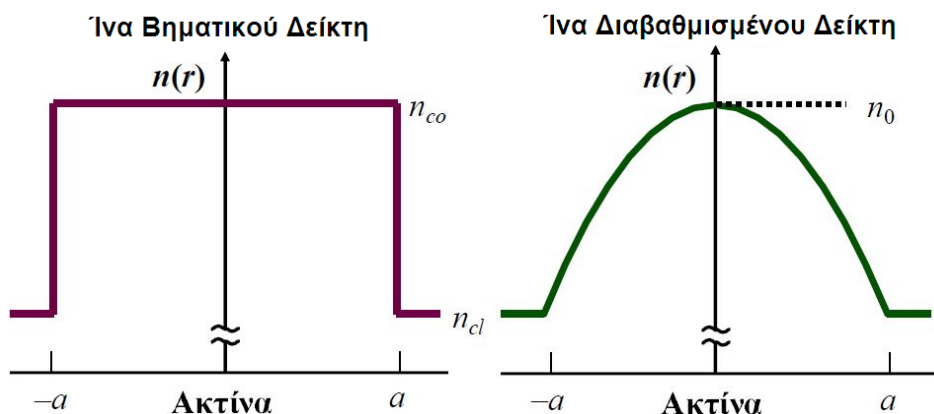
Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε μονότροπες (SMF) και πολύτροπες (MMF) ανάλογα με τη δυνατότητά τους να μεταφέρουν πληροφορία σε ένα ή περισσότερα οπτικά μονοπάτια μέσα σε αυτές. Όσον αφορά τις SMF χρησιμοποιούνται κυρίως για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων εξαιτίας των χαμηλών απωλειών που εμφανίζουν. Λόγω της πολύ μικρής διαμέτρου του πυρήνα τους (~10μm) και κατ' επέκταση της υψηλής ακρίβειας που απαιτείται από τον υπόλοιπο εξοπλισμό, κυρίως για τους πομποδέκτες, εμφανίζεται ένα υψηλό κόστος εγκατάστασης. Σε αντίθεση, οι MMF μπορεί να μην εμφανίζουν τόσο μεγάλη εμβέλεια, αλλά ο εξοπλισμός τους είναι σημαντικά φθηνότερος και πλέον

μπορούν να μεταφέρουν μεγαλύτερο όγκο δεδομένων συγκριτικά με τις SMF. Αυτοί είναι και οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα Datacenters.



Εικόνα 1. Μονότροπη και πολύτροπη μετάδοση φωτός.

Οι MMF με τη σειρά τους κατηγοριοποιούνται με βάση τη μορφή του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα τους. Οι ίνες με βηματικό(SI) και με διαβαθμισμένο(GI) δείκτη διάθλασης. Η δεύτερη κατηγορία εμφανίζει πολύ λιγότερη διασπορά έναντι της πρώτης και για αυτό είναι πιο διαδεδομένη.



Εικόνα 2. Προφίλ του δείκτη διάθλασης.

Το 2009 για τις GI-MMF η TIA/EIA εξέδωσε το πρότυπο TIA-492AAAD, το οποίο καθορίζει τις επιδόσεις της οπτικής ίνας γνωστής ως OM4. Η OM4 υιοθετείται πλέον στις περισσότερες εγκαταστάσεις οπτικών ινών λόγω του υψηλού εύρους ζώνης (bandwidth) το οποίο υποστηρίζει 4700MHz·km στα 850nm μήκους κύματος του φωτός που το διατρέχει. Ο πυρήνας της OM4 έχει διάμετρο 50μm και ο μανδύας 125μm. Όσον αφορά το πομπό που τροφοδοτεί την ίνα, η OM4 είναι ένα πλήρως συμβατή με VCSEL, γεγονός που προδίδει υψηλό ρυθμό μετάδοσης και σχετικά μικρό κόστος.

1.3 Δομή Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της οπτικής ίνας. Όλοι οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιήθηκαν και συντελούν το μοντέλο αυτό αναλύονται και περιγράφονται οι λεπτομέρειες σχετικά με το που χρησιμοποιούνται, με ποιόν τρόπο και με ποιες παραμέτρους. Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού λοιπόν αναφέρονται οι έννοιες του δείκτη διάθλασης και του υπολογισμού του και βασικές έννοιες για τη διασπορά. Αναφέρονται επιπλέον οι Τρόποι-Ομάδες Τρόπων και οι σχέσεις που χαρακτηρίζουν τις καθυστερήσεις και την εξασθένηση που αυτές παρουσιάζουν.

Αμέσως μετά ακολουθεί μία συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν με το μοντέλο που περιγράφεται στο παραπάνω κεφαλαίο, με βάση ήδη δημοσιευμένα αποτελέσματα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Ο έλεγχος αφορά κυρίως τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από το παραπάνω μοντέλο με αντίστοιχα από θεωρητικές και αναλυτικές σχέσεις. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 3 εξετάζεται η ορθότητα του αριθμού των Mode Groups, η εξασθένηση που κάθε ένα από αυτά παρουσιάζει, η σταθερά διάδοσης που παράγεται για κάθε τρόπο και γίνεται και μία συνολικότερη καταγραφή της ακρίβειας των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν και γιατί σε κάθε περίπτωση καταλήξαμε στην εκάστοτε επιλογή.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση της μοντελοποίησης του καναλιού, δηλαδή του υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς της οπτικής ίνας. Αρχικά ασχολούμαστε με το συντελεστή διέγερσης τρόπου, με το ταίριασμα των τρόπων και τελικά με το ποσοστό κυματοδήγησης του αρχικού σήματος μέσα στην ίνα. Έπειτα αναφέρουμε τη κρουστική απόκρουση του συστήματος. Τέλος η συνάρτηση μεταφοράς παρουσιάζεται και επίσης η συνολική ισχύς που ταξιδεύει στο κανάλι, που είναι το ζητούμενο του κεφαλαίου αυτού.

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται τα αποτελέσματα που παράγει η συγκεκριμένη εργασία. Πρώτα από όλα δικαιολογούνται μια σειρά από επιλογές που έγιναν για τα δεδομένα εισόδου. Συγκεκριμένα η επιλογή του πομπού, δηλαδή η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εισόδου, και το προφίλ του δείκτη διάθλασης της ίνας. Έπειτα παρατίθενται τα αποτελέσματα που υποστηρίζουν τη δυνατότητα ενός συστήματος 4x25GHz.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, ακολουθούν τα συμπεράσματα μας από την εκπόνηση της πτυχιακής και συνολικά από την ενασχόληση με το αντικείμενο. Επίσης, προτείνονται ερευνητικά θέματα για μελλοντική διερεύνηση στα πλαίσια της συνέχισης της συγκεκριμένης εργασίας.

2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

Αρχικά το πρόβλημα ορίστηκε ως τη μαθηματική μοντελοποίηση της οπτικής ίνας. Στο Comsol υλοποιήσαμε το αρχικό μοντέλο για την οπτική ίνα GI-MMF με βάση τη προδιαγραφή OM4 που παρουσιάστηκε παραπάνω.

2.1 Δείκτης Διάθλασης

Μελετήσαμε αρχικά το μοντέλο του σύνθετου δείκτη διάθλασης (complex refractive index) ο οποίος είναι της μορφής:

$$n^* = n + jk \quad (1)$$

στο πραγματικό μέρος του οποίου (n) έχουμε το δείκτη διάθλασης και στο φανταστικό μέρος (k) έχουμε το συντελεστή απορρόφησης του υλικού για συγκεκριμένο μήκος κύματος φωτός. Δεν καταφέραμε να βρούμε όμως κάποιον μαθηματικό τύπο, έστω και κάποιον εμπειρικό που να μας δίνει κάποιο προσεγγιστικό αποτέλεσμα για τις απώλειες του υλικού, και ειδικά για ίνα GI. Από την αναφορά [2] σε μία εργαστηριακή έρευνα για τις απώλειες της ίνας Silica βλέπουμε σημαντικές απώλειες απορρόφησης του υλικού εμφανίζονται κυρίως για τα παρακάτω μήκη κύματος:

- i. Κάτω από 160nm, λόγω αλληλεπίδρασης με ηλεκτρόνια, παρουσία δεσμών υδροξυλίου (OH) και αστοχία υλικού.
- ii. Στα μήκη κύματος 2.73-2.85, 3.5 και 4.3μm επίσης λόγω παρουσίας ενώσεων υδροξυλίου.
- iii. Και στα μήκη κύματος 9-9.5, 12.5 και 21-23μm εξαιτίας δεσμών Si—O—Si.

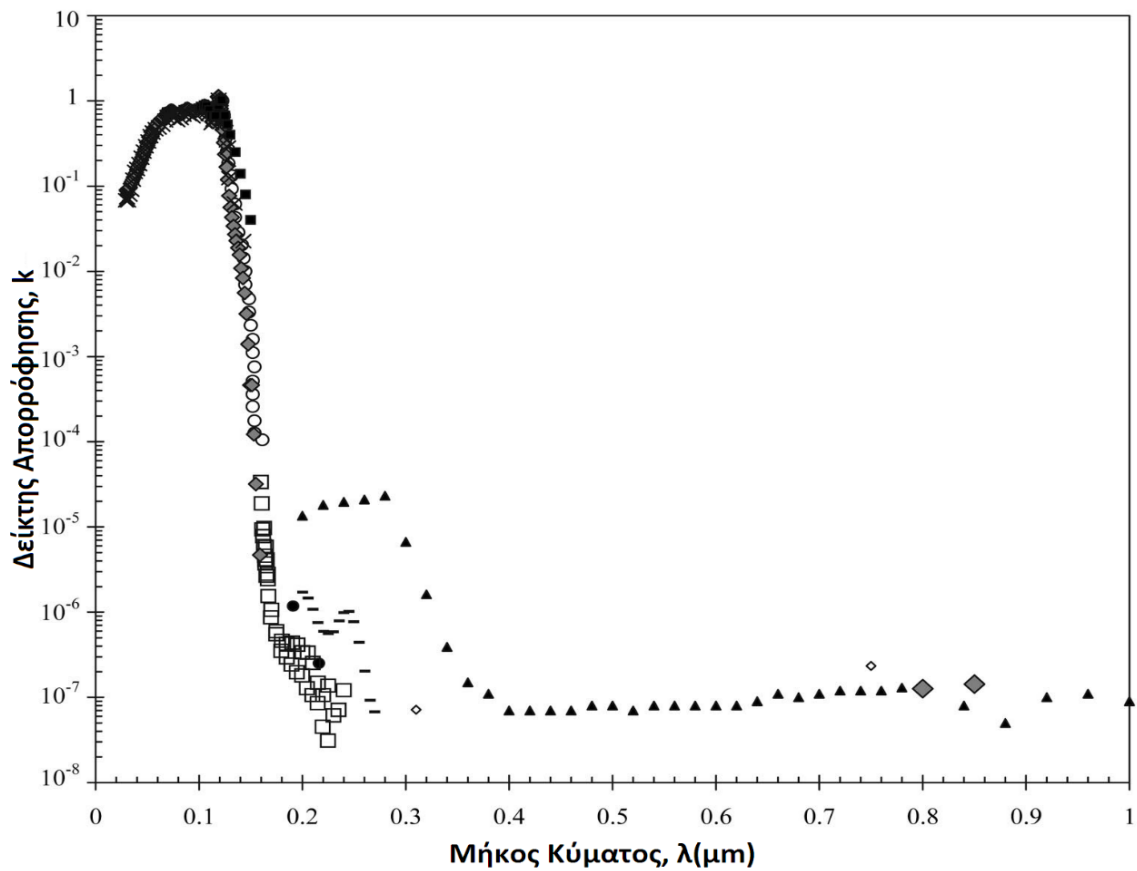
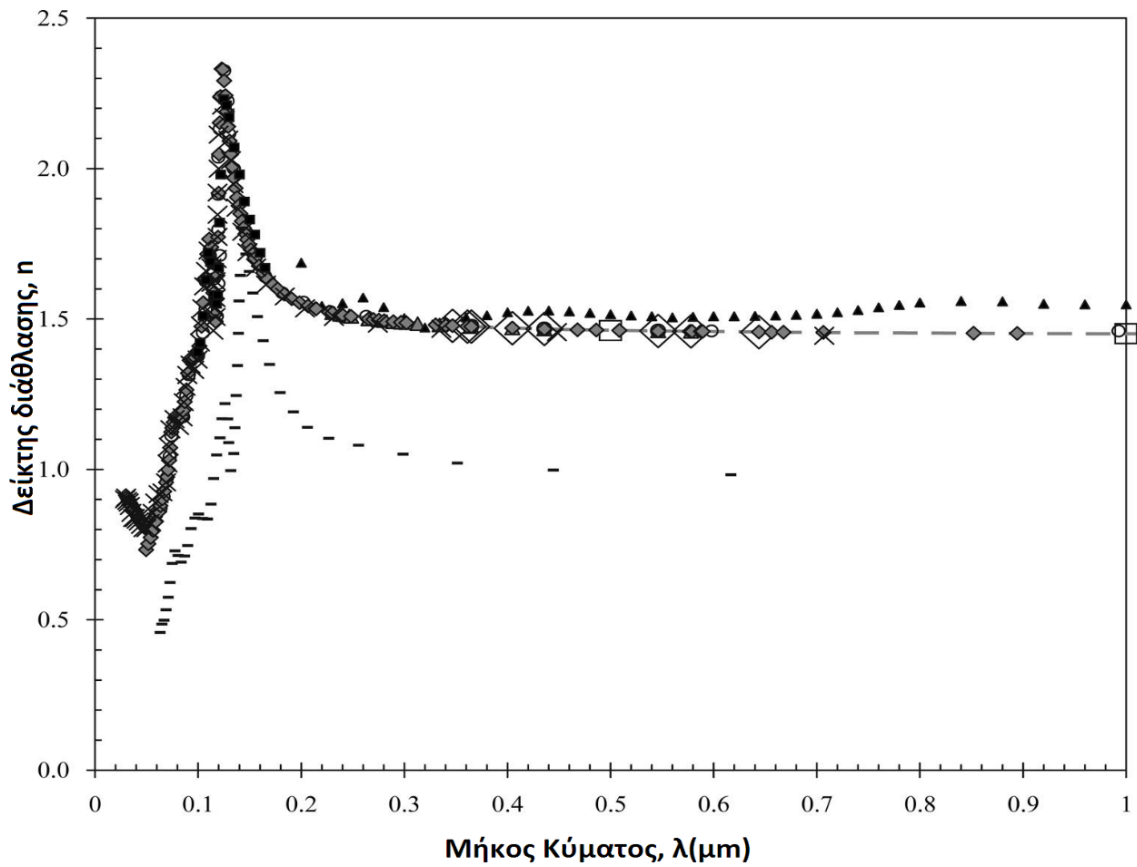
Προκύπτει λοιπόν ότι για τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται ευρέως στις οπτικές επικοινωνίες και που μελετά η συγκεκριμένη εργασία, δηλαδή 850, 1310 και 1550nm δεν έχουμε σημαντικές απώλειες που σχετίζονται άμεσα με το υλικό. Σύμφωνα με την αναφορά [2] που είναι μια σύνοψη αντίστοιχων ερευνών οι απώλειες στο σημείο που μας ενδιαφέρει είναι της τάξης 10^{-7} . Με βάση και αυτό, το μοντέλο μας λαμβάνει σαν δεδομένο μόνο το πραγματικό μέρος του σύνθετου δείκτη διάθλασης το οποίο και στο εξής θα αποκαλούμε δείκτη διάθλασης.

Ο δείκτης διάθλασης υπολογίζεται διαφορετικά για το πυρήνα και για το μανδύα (cladding) της ίνας. Ο τύπος που τον υπολογίζει με δεδομένο ένα συγκεκριμένο εκθέτη g για το προφίλ του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της ίνας είναι:

$$n(r) = \begin{cases} n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} & , r < a \\ n_{cl} & , r \geq a \end{cases} \quad (2)$$

όπου το r είναι η απόσταση από το κέντρο του πυρήνα, n_0 ο δείκτης διάθλασης στο κέντρο, το a είναι η ακτίνα του πυρήνα, n_{cl} ο δείκτης διάθλασης του cladding και για Δ ισχύει η σχέση:

$$\Delta = \frac{n_0^2 - n_{cl}^2}{2n_0^2} \quad (3)$$



Σχήμα 3. Πραγματικό (n) και φανταστικό (k) μέρος του σύνθετου δείκτη διάθλασης του γυαλιού silica όπως καταγράφεται στη βιβλιογραφία. Κάθε διαφορετικό σύμβολο αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική έρευνα, τα στοιχεία των οποίων μπορούν να βρεθούν στη δημοσίευση [2].

2.2 Τύπος Sellmeier

Όσον αφορά το δείκτη διάθλασης στο μανδύα (n_{cl}) χρησιμοποιούμε το τύπο Sellmeier, ο οποίος συσχετίζει το δείκτη διάθλασης για ένα υλικό με το μήκος κύματος (λ) του φωτός που ταξιδεύει μέσα σε αυτό. Η συνάρτηση είναι η παρακάτω:

$$n_{cl}(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}} \quad (4)$$

και τα $B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$, είναι σταθερές που χαρακτηρίζουν το υλικό και συνήθως δίνονται από την εταιρεία κατασκευής της ίνας. Για τη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε σταθερές από τα υλικά της Corning 7940-7980 καθώς επίσης για λόγους πλουραλισμού και δοκιμών στο μοντέλο του Comsol υπάρχουν και σταθερές που βρήκαμε από τις πηγές [3], [4] για το υλικό silica glass και φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα.

Πίνακας 1. Οι σταθερές της Corning ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα της εταιρείας [5] και αντίστοιχα τα υπόλοιπα αποτελέσματα από τις αναφορές RP-Photonics [3] και Wikipedia [4]. Τα δεδομένα της στήλης 1 αναφέρονται σε μετρήσεις με το υλικό να βρίσκεται σε θερμοκρασία 22°C και της στήλης 2 σε 20°C.

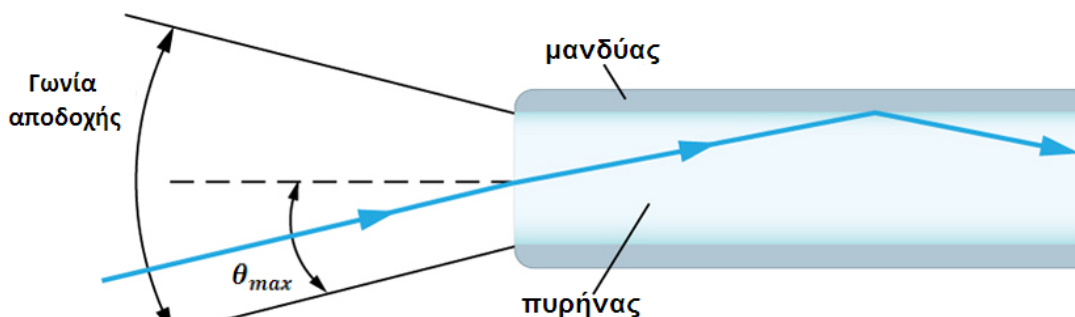
	1. Corning 7940-7980	2. RP-Photonics, Wikipedia
B_1	0.683740494	0.6961663
B_2	0.420323613	0.4079426
B_3	0.585027480	0.8974794
C_1	0.00460352869	0.00467914825849
C_2	0.01339688560	0.01351206307396
C_3	64.49327320000	97.93400253792100

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η γραφική παράσταση του τύπου Sellmeier όπως αυτή παράχθηκε από το Comsol.

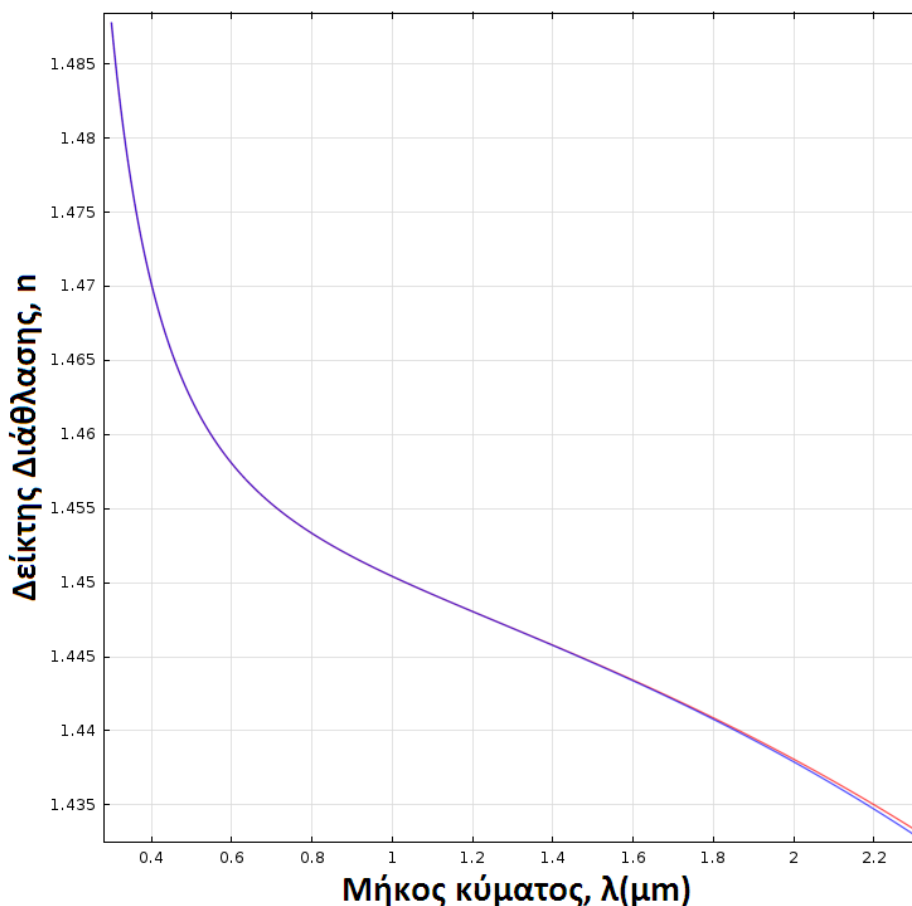
Για το δείκτη διάθλασης στο κέντρο του πυρήνα της ίνας έχουμε:

$$n_0 = \sqrt{NA^2 + n_{cl}^2} \quad (5)$$

όπου το $NA = \sin\theta_{max}$ είναι το αριθμητικό παράθυρο (Numerical Aperture) της ίνας. Το NA υπολογίζεται ως 0.200 ± 0.015 για την GI-MMF με 50μm πυρήνα που μελετάμε. Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται η γωνία θ_{max} από την οποία υπολογίζεται το NA .



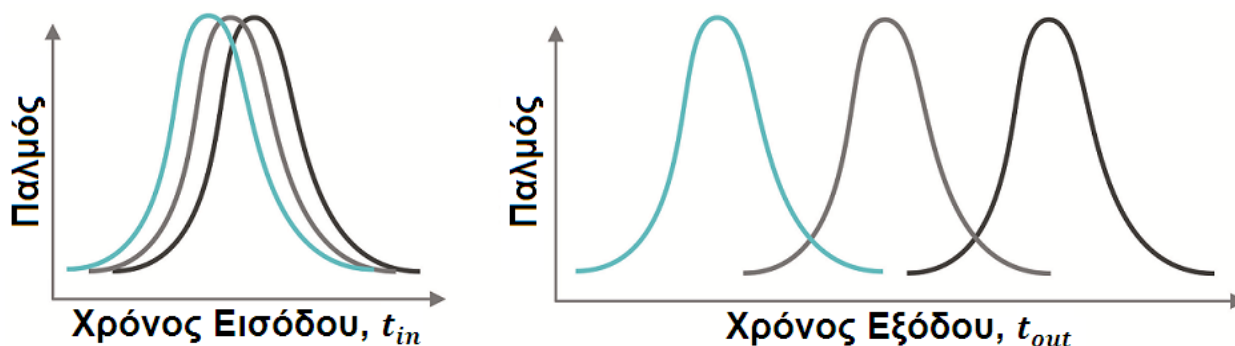
Εικόνα 3. Γωνία υποδοχής οπτικής ίνας.



Σχήμα 4. Με μπλε χρώμα η γραφική παράσταση με τις σταθερές της Corning και με κόκκινο με τις εναλλακτικές.

2.3 Χρωματική διασπορά

Στην OM4 ο δείκτης διάθλασης είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, άρα κάθε ένα μήκος κύματος διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα. Επίσης κανένας πομπός δεν μπορεί να δημιουργήσει σήμα που να αποτελείται από ακριβώς ένα μήκος κύματος, υπάρχει πάντα κάποιο φασματικό εύρος. Τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια ο παλμός κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του από το πομπό στο δέκτη να διευρύνεται. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται χρωματική διασπορά και στο Σχήμα 5 έχουμε ένα οπτικοποιημένο παράδειγμα του.



Σχήμα 5. Χρονική διεύρυνση μεταδιδόμενου παλμου.

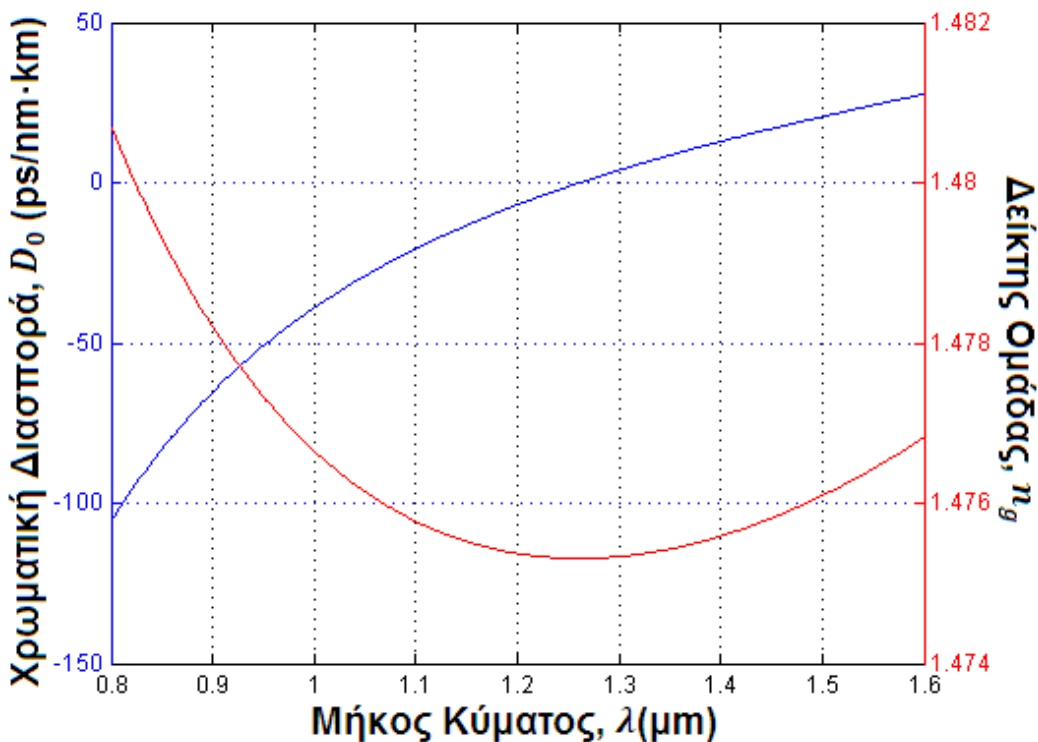
Η σχέση που υπολογίζει τη χρωματική διασπορά φαίνεται παρακάτω:

$$D_0 = \frac{1}{c} \cdot \frac{dn_g}{d\lambda} \quad (6)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και το n_g ο δείκτης ομάδας (group index) ο οποίος υπολογίζεται από το τύπο:

$$n_g = n_0 - \lambda \cdot \frac{dn_0}{d\lambda} \quad (7)$$

Πρακτικά η χρωματική διασπορά χαρακτηρίζεται από τη κλίση του n_g και γι' αυτό για μήκη κύματος κοντά στα 1310nm όπου η κλίση του n_g μηδενίζεται, δεν εμφανίζεται διασπορά. Τα συγκεκριμένα, ονομάζονται μήκη κύματος μηδενικής διασποράς (λ_0) και πάνω από αυτά το D_0 είναι θετικό, ενώ κάτω από αυτά αρνητικό.



Σχήμα 6. Με μπλε η χρωματική διασπορά D_0 και με κόκκινο ο δείκτης ομάδας n_g για τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος.

2.4 Υπολογισμός Αριθμού Τρόπων

Για τον υπολογισμό του αριθμού των τρόπων χρησιμοποιείται ο παρακάτω προσεγγιστικός τύπος:

$$N = \frac{g}{g + 2} \left(\frac{\pi \alpha}{\lambda} \right)^2 NA^2 \quad (8)$$

Για να έχουμε τον αριθμό των τρόπων τελικά πρέπει το N να το διπλασιάσουμε ώστε να συμπεριλάβουμε και τη πόλωση. Κατά την εκτέλεση του μοντέλου στο Comsol παρατηρήσαμε αποκλίσεις στον αριθμό των τρόπων σε σχέση με τον αριθμό που προέκυπτε από τη σχέση (8). Αυτό συμβαίνει καθώς η σχέση (8) υπολογίζει κατά προσέγγιση τον αριθμό των τρόπων.

2.5 Ομάδες Τρόπων

Οι διαφορετικοί τρόποι σε μια ίνα GI-MMF χωρίζονται σε ομάδες. Αυτές οι ομάδες είναι γνωστές ως Ομάδες Τρόπων (Mode Groups) και η κατηγοριοποίηση των τρόπων σε αυτές γίνεται με βάση τη σταθερά διάδοσης β . Θεσπίζεται ένα όριο σύμφωνα με το οποίο, αν η διαφορά των β δεν το ξεπερνάει, δυο ή παραπάνω τρόποι ανήκουν στην ίδια ομάδα. Οι τρόποι αυτοί εμφανίζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά όπως η καθυστέρηση διάδοσης και η εξασθένηση που θα τα δούμε παρακάτω. Για τη συγκεκριμένη μελέτη, με χρήση του Matlab γίνεται ο υπολογισμός των Mode Groups με δεδομένα που εξάγονται από το Comsol.

Παρακάτω φαίνεται το εν λόγω κομμάτι του κώδικα για το οποίο έχουμε ορίσει ότι η διαφορά ανάμεσα σε δυο σταθερές διάδοσης (mode_beta) αν είναι μικρότερη από 10^3 οι δύο τρόποι ανήκουν στο ίδιο Mode Group:

```

j=1;
pmg{j} = [];
for i = 2:num_modes
    pmg{j} = [pmg{j},i-1];
    if abs(mode_beta(1,i) - mode_beta(1,i-1)) > 1e3
        j = j+1;
        pmg{j} = [];
    end
end
pmg{j} = [pmg{j} ,i];

```

2.6 Καθυστέρηση Διάδοσης Τρόπου

Κάθε τρόπος ταξιδεύει μέσα στην ίνα με διαφορετικό «οπτικό μονοπάτι». Αυτό κάνει το χρόνο διάδοσης να διαφέρει από τρόπο σε τρόπο. Για τον υπολογισμό αυτής της καθυστέρησης χρησιμοποιούμε το παρακάτω τύπο:

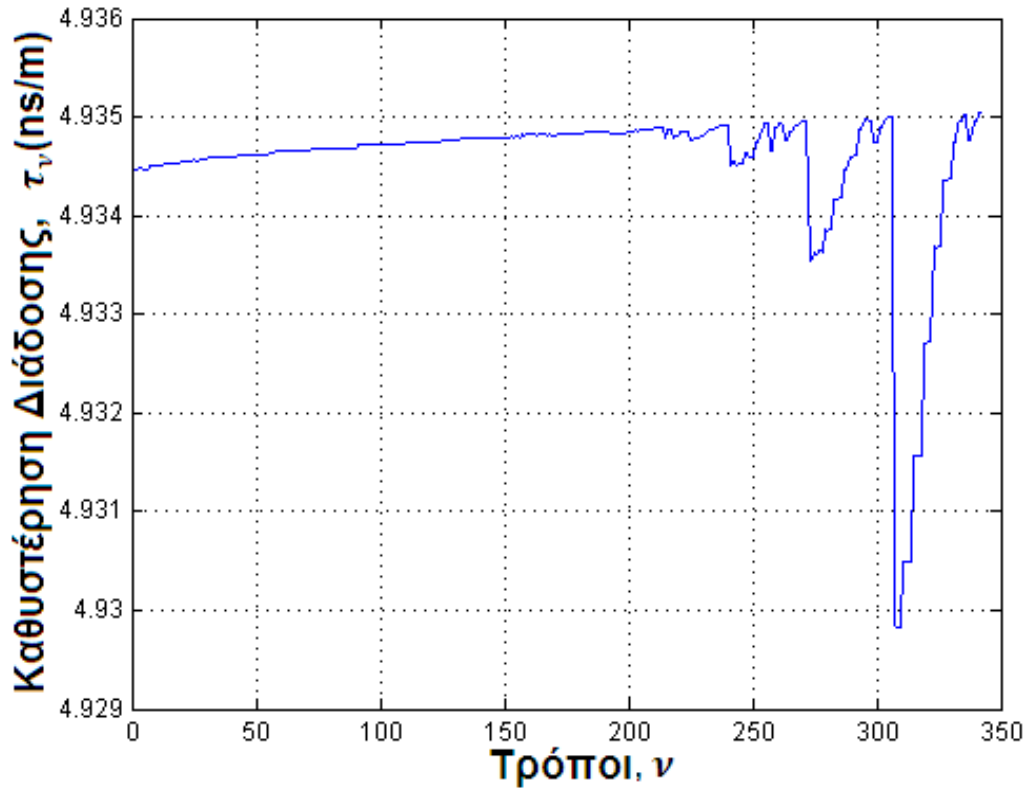
$$\tau_v = \frac{\partial \beta_v}{\partial \omega} \quad (9)$$

όπου η μερική παράγωγος της σταθεράς διάδοσης β_v ως προς τη γωνιακή συχνότητα ω μας δίνει το αποτέλεσμα για κάθε τρόπο. Για τον υπολογισμό αυτό, χρησιμοποιήσαμε έναν μαθηματικό τύπο, προσεγγιστικό του αποτελέσματος, ο οποίος φαίνεται παρακάτω:

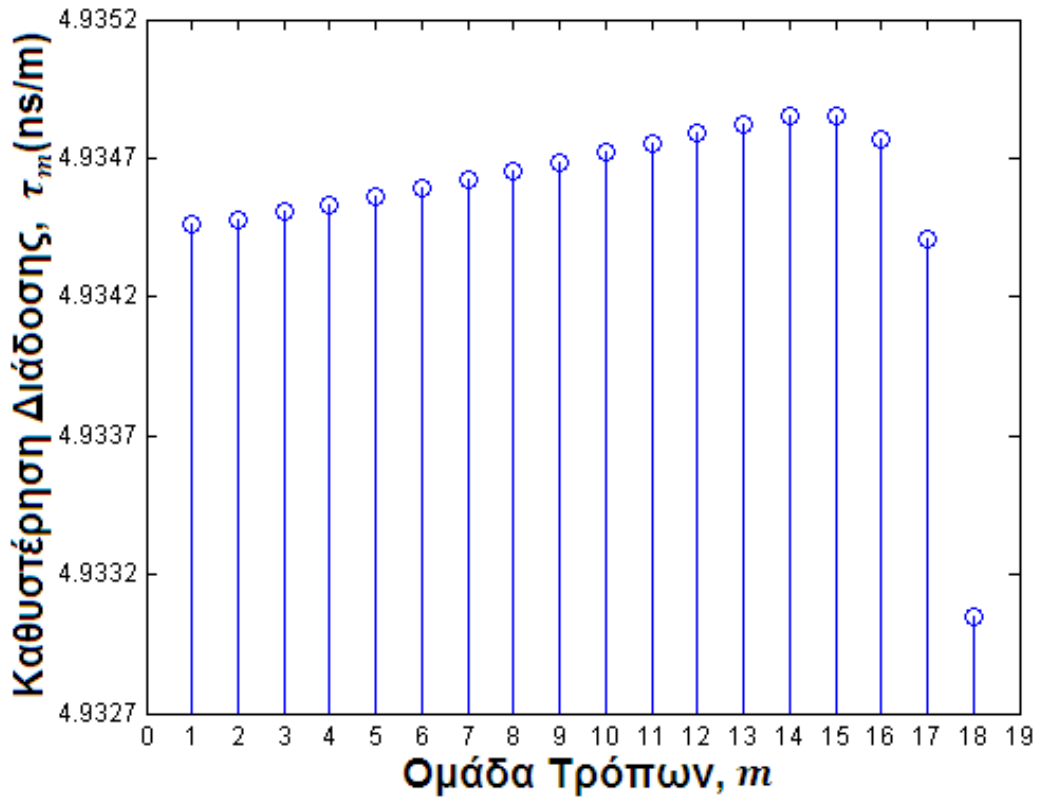
$$\tau_v \approx \frac{\beta_v(\omega(\lambda + h)) - \beta_v(\omega(\lambda - h))}{\omega(\lambda + h) - \omega(\lambda - h)} \quad (10)$$

με $\omega = 2\pi c/\lambda$. Έγιναν αρκετές δοκιμές με το Comsol ώστε να βρεθεί η κατάλληλη διαφορά h που θα μας δώσει ικανοποιητική ακρίβεια. Στο Κεφάλαιο 3.4 αναφέρεται η σχετική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε. Υπολογίστηκε το μοντέλο και για τις δύο τιμές του λ και από τα αρχεία που παράχθηκαν, μέσω του Matlab έγινε ο τελικός υπολογισμός για τη καθυστέρηση διάδοσης ανα τρόπο.

Στο Σχήμα 7 οπτικοποιείται η καθυστέρηση διάδοσης κάθε τρόπου για την OM4 όπως παράχθηκε από το Matlab με δεδομένα που εξήχθησαν από το Comsol. Στο Σχήμα 8 μπορούμε να δούμε τη καθυστέρηση διάδοσης του Mode Group. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούμε το μέσο όρο των καθυστερήσεων των τρόπων που συμπεριλαμβάνονται σε κάθε ένα.



Σχήμα 7. Καθυστέρηση διάδοσης ανα τρόπο για $g = 2$ και $\lambda = 850nm$.



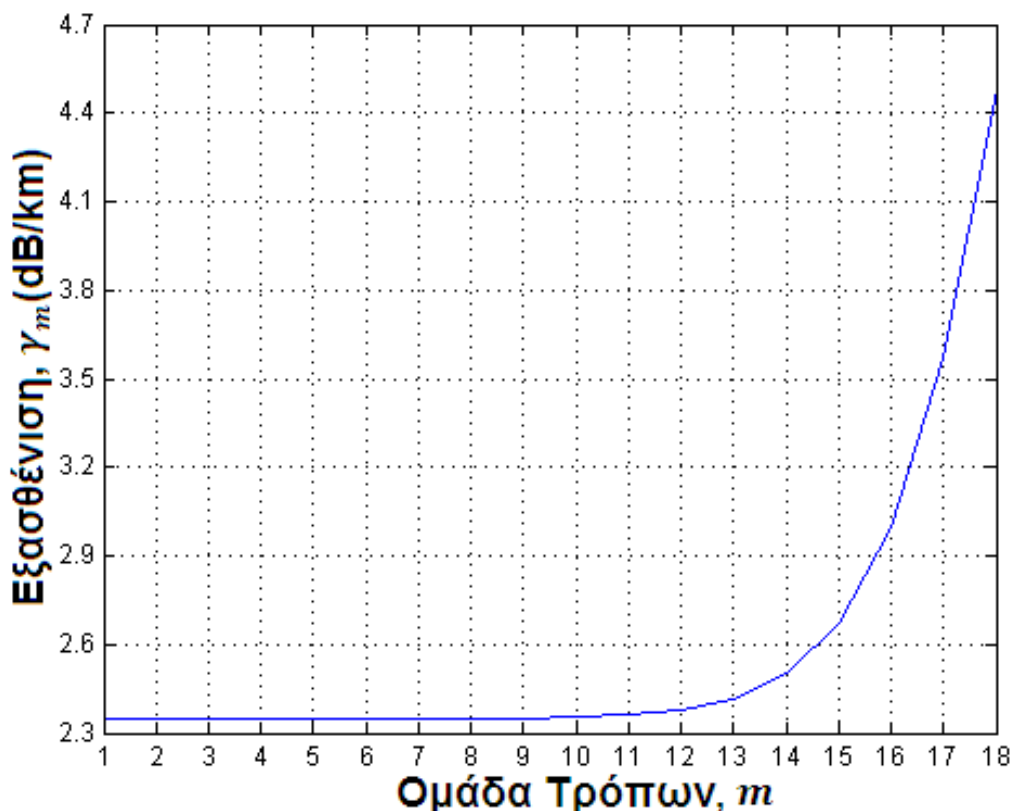
Σχήμα 8. Καθυστέρηση διάδοσης ανα Mode Group για $g = 2$ και $\lambda = 850nm$.

2.7 Διαφορική Εξασθένηση Ομάδας Τρόπων

Κάθε τρόπος αντιμετωπίζει διαφορετική εξασθένηση κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Φαινόμενα όπως η απορρόφηση του υλικού και η σκέδαση Rayleigh προκαλούν απώλειες οι οποίες ονομάζονται Διαφορική Εξασθένηση Ομάδας Τρόπων (Differential Mode Attenuation). Η εξασθένηση επηρεάζει κυρίως τους τρόπους που βρίσκονται κοντά στο cladding καθώς οι διαδιδόμενες ακτίνες κάνουν μεγαλύτερη απόσταση μέχρι το προορισμό. Για τον υπολογισμό της εξασθένησης ομάδας τρόπων χρησιμοποιούμε το παρακάτω τύπο:

$$\gamma_m = \gamma_0 + \gamma_0 \cdot I_9 \left(7.35 \left(\frac{m-1}{M} \right)^{\frac{2g}{g+2}} \right) \quad (11)$$

όπου το γ_0 είναι η εξασθένηση του θεμελιώδη τρόπου που ταξιδεύει το μικρότερο οπτικό μονοπάτι, ως καθαρός αριθμός, I_9 η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και 9ης τάξης και το $m = 1, 2, \dots, M$. (Η παρένθεση δεξιά της I_9 είναι παράμετρος της συνάρτησης Bessel).



Σχήμα 9. Εξασθένηση ανα Mode Group σύμφωνα με τη σχέση (11), για $\gamma_0 = 2.35 \text{ dB/km}$ και $M = 18$ στα 850nm μήκους κύματος.

Το γ εκφράζεται σε μονάδες dB/km. Για να μπορέσουμε να το μετατρέψουμε σε καθαρό αριθμό ανα μονάδα μήκους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το τύπο:

$$\gamma_m (\text{dB/km}) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \approx 4.343 \gamma_m \quad (12)$$

όπου P_{in} η ισχύς εισόδου και P_{out} η ισχύς εξόδου οι οποίες ακολουθούν τη σχέση $P_{out} = P_{in} \exp(-\gamma_m L)$.

3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

Κατά τη διάρκεια συγκρότησης του μαθηματικού μοντέλου της ίνας έγινε προσπάθεια για επαλήθευση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν σε σχέση με ήδη υπάρχουσες δημοσιεύσεις σε αντίστοιχο ερευνητικό περιεχόμενο με απώτερο σκοπό την αξιολόγηση του μοντέλου ως προς την εγκυρότητά του. Για τις ανάγκες αυτής της επαλήθευσης χρησιμοποιήσαμε αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις και σχήματα που είτε παράχθηκαν μέσω των αναλυτικών αυτών σχέσεων είτε βρέθηκαν στις εκάστοτε έρευνες.

3.1 Αριθμός Ομάδων Τρόπων

Για αρχή έγινε έλεγχος του αποτελέσματος σχετικά με τον αριθμό των τρόπων που το μοντέλο υπολογίζει. Οι δημοσιεύσεις που φάνηκαν χρήσιμες για σύγκριση αποτελεσμάτων ήταν οι [6] και [7]. Για τις ανάγκες αυτής της διερεύνησης με την αναφορά [6] και για να συνάδει με τα δεδομένα της, το μοντέλο στο Comsol τροποποιήθηκε ως εξής:

Αρχικά το μήκος κύματος ορίστηκε σε 1310nm. Επίσης το Δ δεν υπολογίζεται βάση της σχέσης (3) αλλά παίρνει τη τιμή 0.01. Το $NA = 0.2$, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και η τιμή του δείκτη διάθλασης στο cladding δεν ακολουθεί τη σχέση (4) αλλά υπολογίζεται, ως:

$$n_{cl} = \sqrt{n_0^2 - NA^2} \quad (13)$$

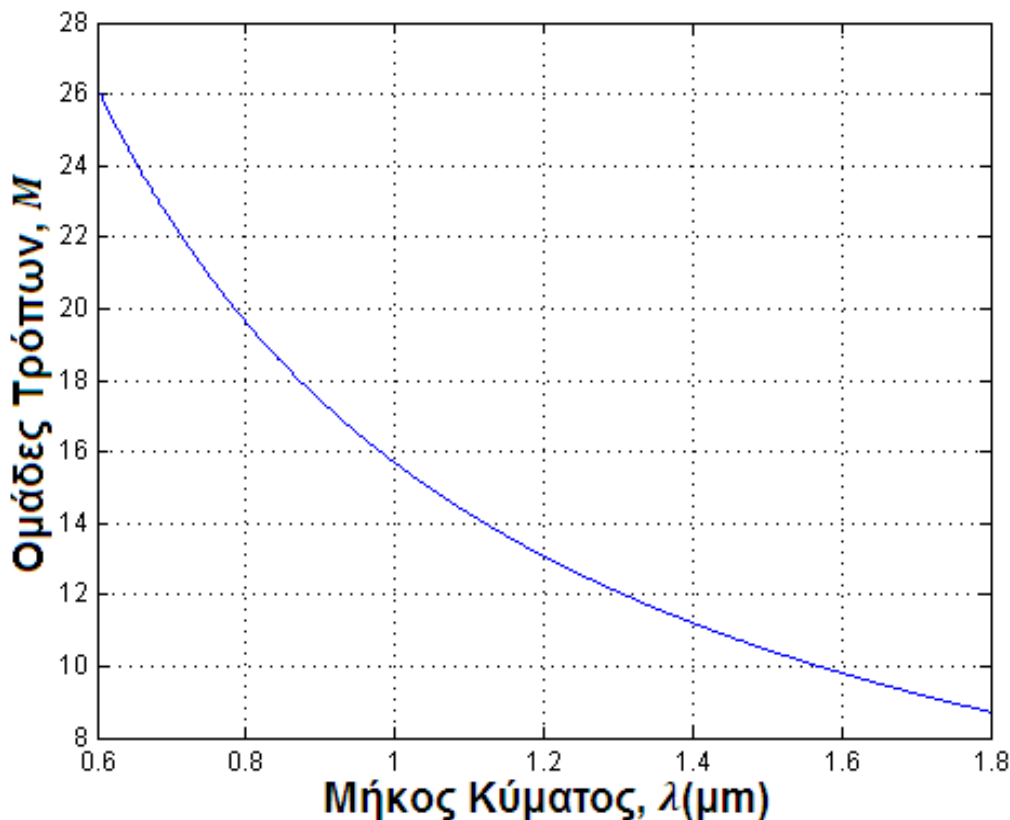
με το n_0 να αποτιμάται με βάση το παρακάτω τύπο:

$$n_0 = \sqrt{\frac{NA^2}{2\Delta}} \quad (14)$$

Σύμφωνα με την αναφορά [6] ο συνολικός αριθμός των Mode Groups για τα συγκεκριμένα στοιχεία είναι 12, αριθμός που επαληθεύτηκε και από την υλοποίησή μας. Επιπλέον από την αναφορά [7] χρησιμοποιήσαμε την αναλυτική μαθηματική σχέση (15) που αφορούσε το συνολικό αριθμό των Mode Groups και φαίνεται παρακάτω:

$$M = 2\pi\alpha \frac{n_0}{\lambda} \sqrt{\frac{g \cdot \Delta}{g + 2}} \quad (15)$$

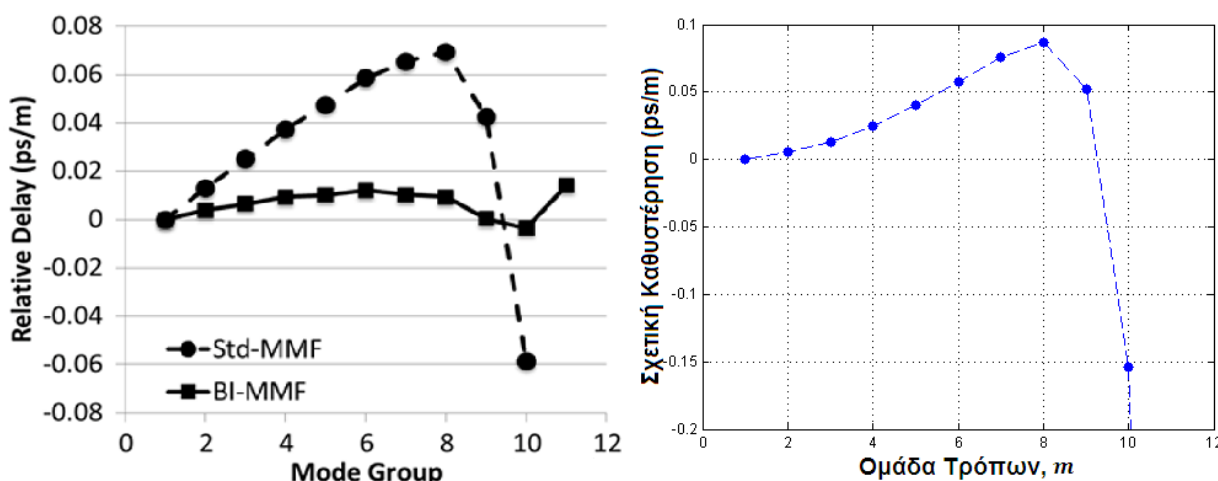
όπου το α αντιπροσωπεύει την ακτίνα και το g τον εκθέτη για το προφίλ του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της ίνας. Για τις ίδιες παραμέτρους ο συνολικός αριθμός των Mode Groups επαληθεύτηκε και πάλι στους 12. Ακόμη δημιουργήσαμε το Σχήμα 10 που αξιοποιεί τη σχέση (15) με τα δεδομένα που ορίζονται για το παρών κεφάλαιο και οπτικοποιεί τη καμπύλη που συσχετίζει το συνολικό αριθμό των Mode Groups (M) με ένα εύρος μηκών κύματος (λ).



Σχήμα 10. Παρατηρούμε τη μεταβολή του αριθμού των Mode Groups για ένα εύρος μηκών κύματος, από 0.6 μέχρι 1.8 μm , στα οποία γίνεται συνήθως η μεταφορά δεδομένων σε μια ίνα GI-MMF.

3.2 Διαφορική Εξασθένιση Ομάδας Τρόπων

Επόμενος έλεγχος πραγματοποιήθηκε περί της εγκυρότητας του μοντέλου για τη Διαφορική Εξασθένιση Ομάδας Τρόπων. Χρησιμοποιήθηκε η αναφορά [6] και συγκεκριμένα το σχήμα που εμφανίζει τη Σχετική Καθυστέρηση των Mode Groups ως προς το πρώτο. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.1.



Σχήμα 11. Σύγκριση Σχετικής Καθυστέρησης. Αριστερά το σχήμα της αναφοράς [6] και δεξιά το σχήμα που παράχθηκε από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το Comsol, με δεδομένα εισόδου αυτά του Κεφαλαίου 3.1.

Στο Σχήμα 11 συγκρίνεται η καμπύλη Std-MMF του αριστερού σχήματος με το δεξί που παράχθηκε από το Matlab, με δεδομένα από το Comsol. Παρατηρούνται κάποιες αποκλίσεις κυρίως στο 10^ο Mode Group. Αυτές μας απασχόλησαν αρκετά και σε

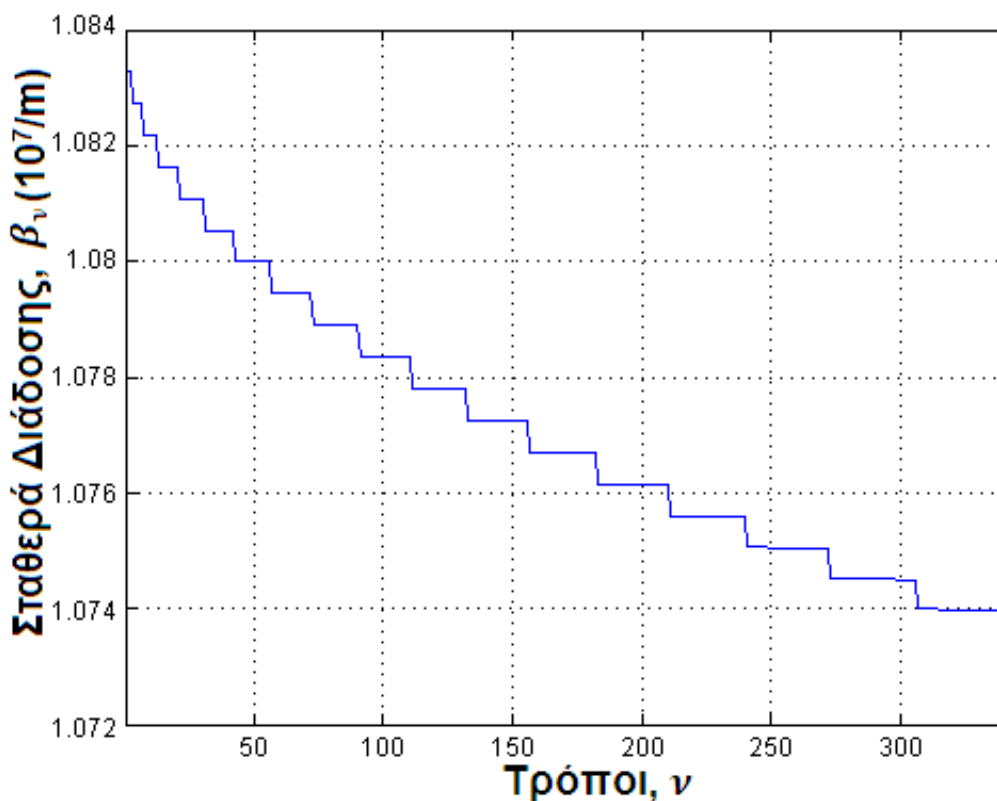
παρακάτω κεφάλαιο συνοψίζεται η διερεύνηση για την ακρίβεια των υπολογισμών του μοντέλου της οπτικής ίνας. Τελικά αποφανθήκαμε πως με δεδομένο ότι υπάρχει μια σχετική συνάφεια μεταξύ των δύο σχημάτων και ότι δεν γνωρίζουμε περισσότερα για το τρόπο που υπολογίστηκε το σχήμα της αναφοράς [6], θεωρούμε ότι η συγκεκριμένη απόκλιση, καθώς και οι άλλες μικρότερες είναι αποτέλεσμα του τρόπου υπολογισμού και της διαφορετικής ακρίβειας που αυτός μπορεί να έχει.

3.3 Σταθερά Διάδοσης

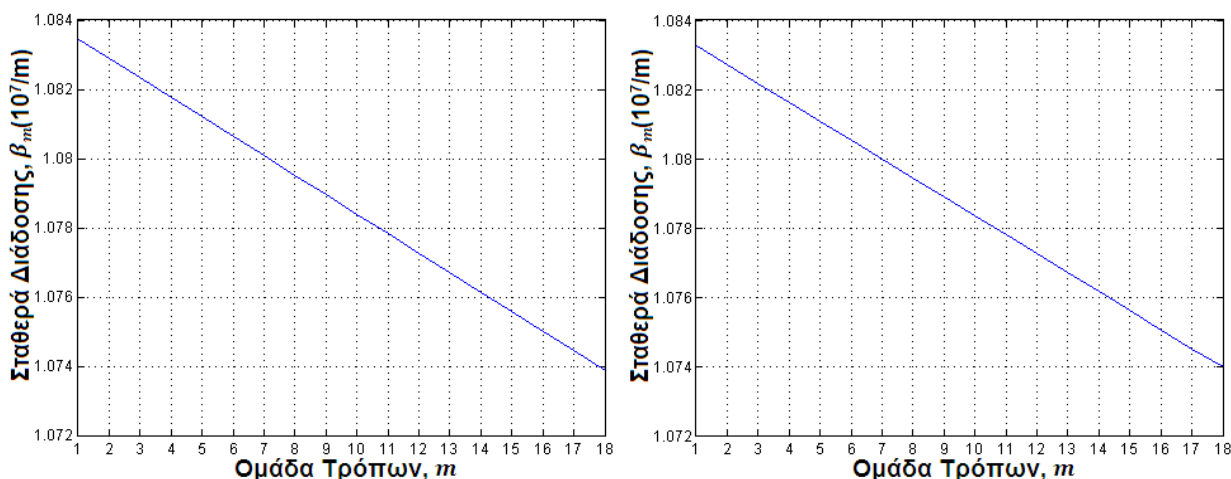
Ο τελευταίος έλεγχος αφορούσε τη σταθερά διάδοσης β από τα αποτελέσματα που εξήγαγε το Comsol για δεδομένα εισόδου αυτά του Κεφαλαίου 2 για OM4, εκθέτη $g = 2$ και μήκος κύματος 850nm . Συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα μιας αναλυτικής σχέσης της αναφοράς [7] που φαίνεται παρακάτω:

$$\beta_m = n_0 \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{m}{M}\right)^{\frac{2g}{g+2}}} \quad (16)$$

Η σχέση (16) υπολογίζει τη σταθερά διάδοσης ανα ομάδα τρόπων (β_m). Καθώς όμως τα αποτελέσματα που παράγονται από το Comsol σχετικά με τη σταθερά διάδοσης είναι ανα τρόπο, για να γίνει η εν λόγω σύγκριση, υπολογίζουμε το β_m από το μέσο όρο των β_n που συμπεριλαμβάνονται σε κάθε Mode Group. Από τη σύγκριση προέκυψε ότι τα δεδομένα έχουν εξαιρετική ομοιότητα. Εξακριβώνεται λοιπόν πως το μοντέλο παράγει ορθά αποτελέσματα άρα με μεγαλύτερη ασφάλεια θα χρησιμοποιήσουμε τους συγκεκριμένους υπολογισμούς. Για πληρότητα του ελέγχου οπτικοποιείται η σταθερά διάδοσης β_n στο Σχήμα 12 και επιπρόσθετα παρατίθεται το Σχήμα 13 που δημιουργήθηκε συγκριτικά από τις δυο προσεγγίσεις των β_m .



Σχήμα 12. Σταθερά διάδοσης β_n για την OM4 με $g = 2$ και $\lambda = 850\text{nm}$.



Σχήμα 13. Σύγκριση Σταθεράς Διάδοσης. Αριστερά το σχήμα από την αναλυτική σχέση της αναφοράς [7] και δεξιά αυτό των αποτελεσμάτων του μοντέλου για OM4, $g = 2$ και $\lambda = 850nm$.

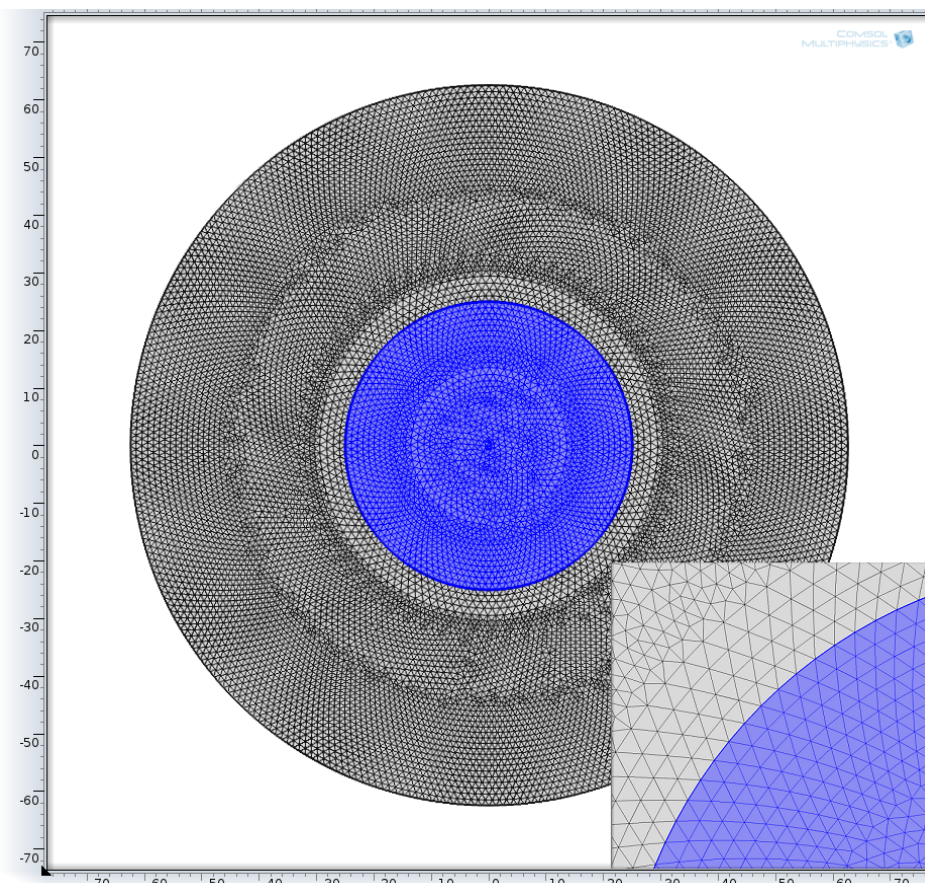
3.4 Ακρίβεια των Υπολογισμών

Κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης του μοντέλου πολλές διαφορετικές παράμετροι του μοντέλου και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν εξετάστηκαν ενδελεχώς, κυρίως αυτές που αφορούσαν την ακρίβεια των υπολογισμών στο Comsol.

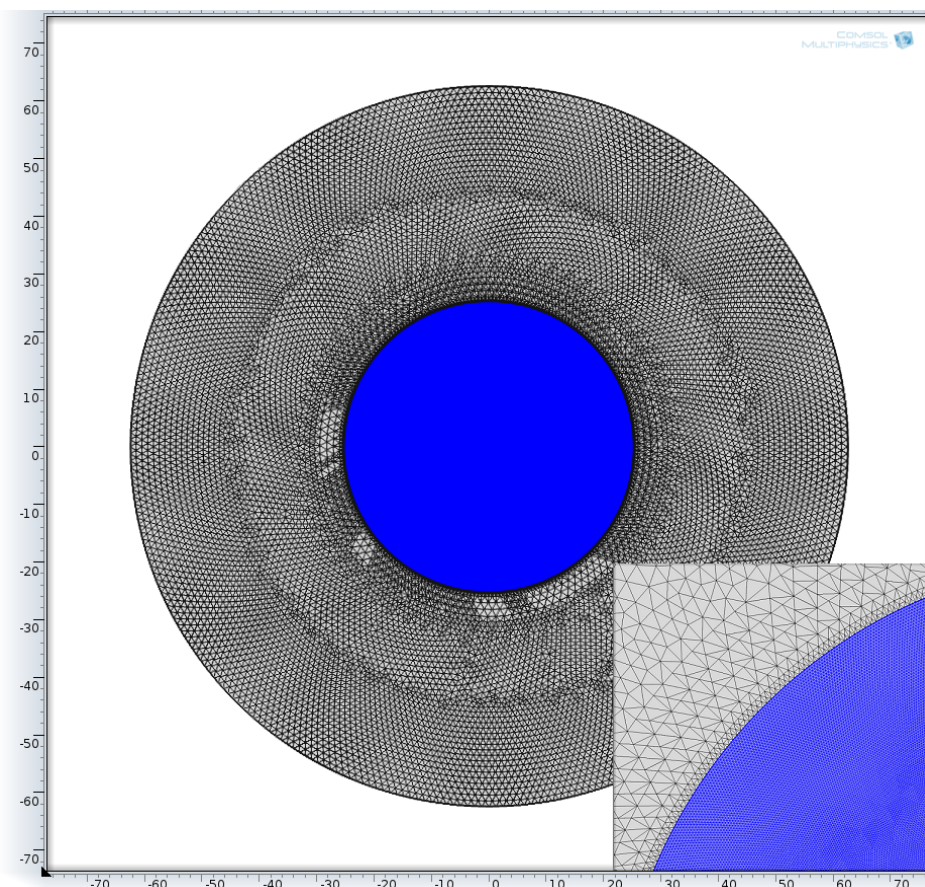
Όσον αφορά τον υπολογισμό της καθυστέρησης διάδοσης τ_v , χρειάστηκε, σύμφωνα με τη σχέση (10), να εκτελέσουμε το Comsol δύο φορές με δύο διαφορετικές, πολύ κοντινές, τιμές για λ . Στα πλαίσια αυτά διερευνήθηκαν διαφορές από $h = 10^{-4}$ μέχρι $10^{-10} \mu m$. Πορευτήκαμε ανάλογα με το αν τα αποτελέσματα και συγκεκριμένα το Σχήμα 11 παρήγαγε τιμές σύμφωνες με τις αναφορές της βιβλιογραφίας. Εδώ να αναφέρουμε ότι ταυτόχρονα γίνονταν και μια πιο ενδελεχής διερεύνηση σχετικά με το πλήθος των σημείων ελέγχου του Comsol που αναφέρεται παρακάτω. Τελικά καταλήξαμε με βάση τα αποτελέσματα ότι τα $10^{-8} \mu m$ ήταν η βέλτιστη τιμή της απόκλισης του μήκους κύματος για το συγκεκριμένο υπολογισμό.

Στη διαμόρφωση του μοντέλου διερευνήθηκε επίσης το πλήθος των σημείων ελέγχου που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τους υπολογισμούς του και πώς μπορεί να αυξηθεί η πυκνότητά τους. Με ειδικές ρυθμίσεις καταφέραμε να αυξήσουμε τη πυκνότητα στον πυρήνα της ίνας αφήνοντας το cladding ως είχε. Για έλεγχο της εγκυρότητας δοκιμάσαμε μεγαλύτερη ακρίβεια και στο cladding όμως δεν φάνηκε ότι κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για ορθά αποτελέσματα. Οπότε, αναλογιζόμενοι και τους τεχνικούς περιορισμούς που υπήρχαν κατά τη διάρκεια της διερεύνησης, καθώς το συγκεκριμένο υπολογιστικό πρόγραμμα χρειάζεται πολλούς πόρους συστήματος άρα και πολύ χρόνο για τη κάθε προσομοίωση, καταλήξαμε στην επιλογή για αύξηση της ακρίβειας (Mesh) μόνο στον πυρήνα. Έτσι αυξήσαμε την ανάλυση στο πυρήνα 4 φορές περισσότερο από το cladding στο οποίο επιλέξαμε μια αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια. Οι εικόνες που ακολουθούν παράχθηκαν από το Comsol.

Ακόμη να αναφέρουμε και τη προσπάθειά μας να μειώσουμε το χρόνο αποπεράτωσης της εκτέλεσης του μοντέλου στο Comsol. Σε αυτήν τη προσπάθεια, ελέγξαμε το κατά πόσο θα μπορούσε η μικρότερη διάμετρος του cladding να βοηθήσει στη κατεύθυνση αυτή και ταυτόχρονα σε ένα πλαίσιο όπου η εγκυρότητα του αποτελέσματος δεν θα επηρεαζόταν. Παρατηρήσαμε ότι μικραίνοντας το cladding μέχρι τα $70 \mu m$ διαμέτρου κατά πρώτον τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονταν αλλά μαζί με αυτά δεν επηρεαζόταν και ο χρόνος αποπεράτωσης, παρά μόνο ελάχιστα δευτερόλεπτα. Έτσι επαναφέραμε το cladding στα $125 \mu m$ και όλες μας οι υπόλοιπες διερευνήσεις στηρίχθηκαν σε αυτό.



Εικόνα 4. Στοιχεία για τον υπολογισμό του Comsol. Κάτω δεξιά φαίνεται σε μεγέθυνση ένα κομμάτι στο όριο πυρήνα-cladding.



Εικόνα 5. Στοιχεία για τον υπολογισμό του Comsol, με μεγάλη ακρίβεια. Κάτω δεξιά φαίνεται σε μεγέθυνση ένα κομμάτι στο όριο πυρήνα-cladding.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

Στο παρών κεφάλαιο αναφέρουμε ότι έχει να κάνει με τη μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης του οπτικού σήματος με βάση την GI-MMF OM4 που αναλύσαμε παραπάνω. Στόχος εδώ είναι τελικά η σύνθεση της συνάρτησης μεταφοράς ώστε να βρεθεί το εύρος ζώνης της ίνας.

4.1 Συντελεστής Διέγερσης Τρόπου

Αρχικά επικεντρωθήκαμε στο κομμάτι της διέγερσης των τρόπων (mode excitation). Μελετήσαμε δηλαδή το πώς η ενέργεια που εισχωρεί την οπτική ίνα κατανέμεται στους τρόπους ανάλογα με το σημείο εισαγωγής του φωτός σε αυτή. Σε κάθε σύνδεση ενός Laser με μια οπτική ίνα η μίας οπτικής ίνας με μια άλλη, το σημείο που από τη πηγή θα τροφοδοτείται η οπτική ίνα παίζει εξέχοντα ρόλο στη τελική διέγερση των εκάστοτε τρόπων. Μπορεί με αυτόν το τρόπο να γίνει κάποιου είδους επιλογή και στο κατά πόσο θα διεγερθούν οι τρόποι και στο ποιοι. Όταν για παράδειγμα η ίνα τροφοδοτηθεί ακριβώς στο κέντρο του πυρήνα της τότε διεγείρεται ο θεμελιώδης τρόπος (fundamental mode) ενώ όσο μετακινούμαστε κατά μια ακτινική μετατόπιση (radial offset) τότε διεγείρονται και διαφορετικοί.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή διέγερσης τρόπου ρ_ν (mode excitation coefficient), που προσδιορίζει για κάθε τρόπο το ποσοστό της συνολικής ισχύος που έχει συζευχθεί σε αυτόν, χρησιμοποιήσαμε το Matlab με δεδομένα για το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο της ίνας που παράχθηκαν μετά από εκτέλεση του Comsol. Με το Matlab κανονικοποιούμε τα πεδία χρησιμοποιώντας το παρακάτω τύπο από την αναφορά [8]:

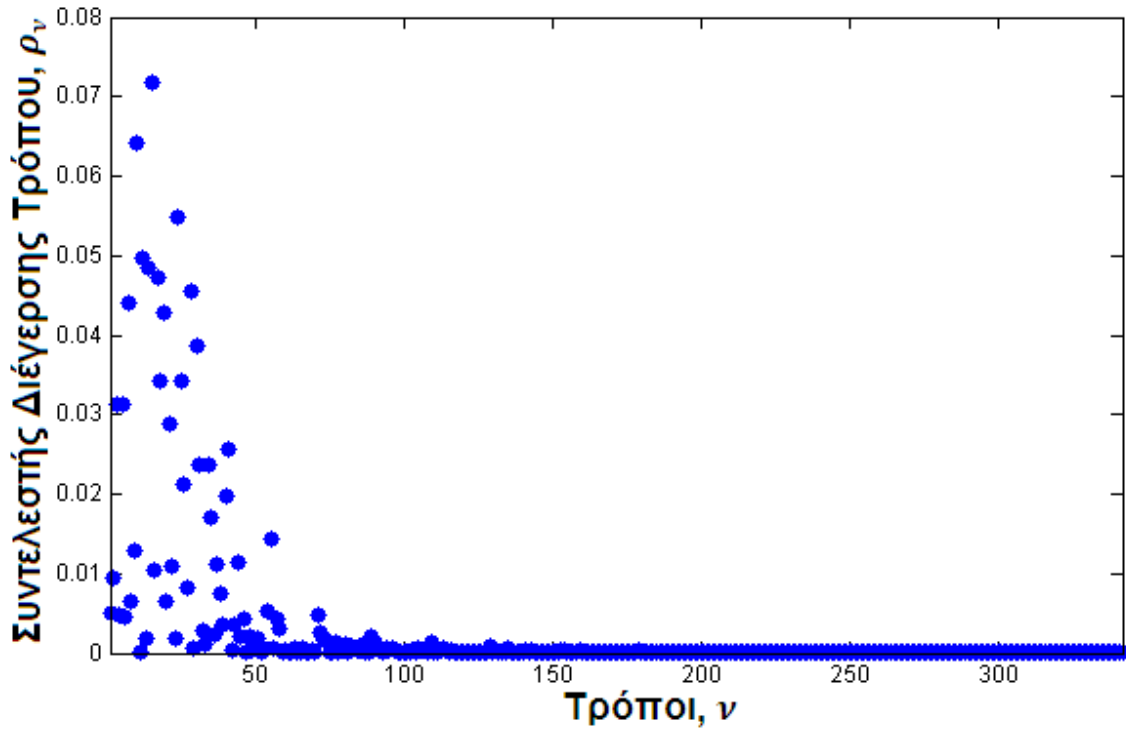
$$P_{z,\nu} = \frac{1}{2} \text{Re} \iint E_\nu \times H_\nu^* \cdot u_z dx dy \leq 1 \quad (17)$$

όπου $P_{z,\nu}$ η μέση ισχύς που διαδίδεται στον τρόπο ν και το u_z το μοναδιαίο διάνυσμα στη κατεύθυνση διάδοσης. Τα E_ν, H_ν^* αναφέρονται στο ηλεκτρικό και στο συζυγές μαγνητικό πεδίο κάθε τρόπου ν .

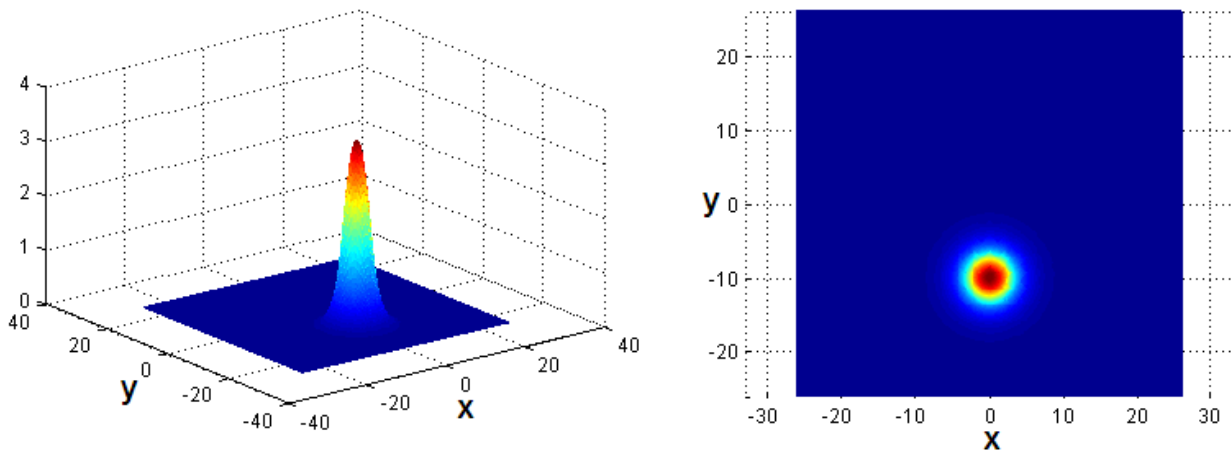
Ως πεδίο εισόδου της ίνας, για 850nm μήκους κύματος του οπτικού σήματος, χρησιμοποιούμε το κανονικοποιημένο ηλεκτρικό πεδίο από μια SI-SMF με διάμετρο πυρήνα 6μm. Ο λόγος είναι η όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσέγγιση του πεδίου που παράγει ένα VCSEL τα οποία χρησιμοποιούνται στις OM4. Κάνουμε χρήση του ολοκληρώματος επικάλυψης (overlap integral) για το ηλεκτρικό πεδίο διέγερσης (E_{in}), μετατοπισμένο κατά κάποιο radial offset, με το συζυγές μαγνητικό πεδίο της GI-MMF (H_ν^*) όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\rho_\nu = \frac{1}{2} \text{Re} \iint E_{in} \times H_\nu^* \cdot u_z dx dy \quad (18)$$

και τελικά υπολογίζεται το ρ_ν . Στο Σχήμα 14 φαίνεται οι τρόποι οι οποίοι διεγείρονται για ένα radial offset 10μm και το ποσό της αρχικής ισχύος της διέγερσης που έχει συζευχθεί μέσα σε κάθε έναν. Ανάλογα με το radial offset επηρεάζεται το ταίριασμα του τρόπου διέγερσης του πομπού με τους τρόπους της ίνας (mode matching) και κατ' επέκταση το συνολικό ποσό της ισχύος του πομπού που θα καταφέρει να κυματοδηγηθεί σε αυτή. Για να υπολογίσουμε το ποσοστό αυτό προσθέσουμε το ποσοστό όλων των τρόπων.



Σχήμα 14. Ο συντελεστής διέγερσης ρ_n .



Εικόνα 6. Το προφίλ του πεδίου διέγερσης E_n , για το fundamental mode με radial offset 10 μ m.



Εικόνα 7. Αριστερά το πεδίο διέγερσης E_n , και δεξιά η ισχύς του πεδίου E_n^2 με radial offset 10 μ m.

4.2 Κρουστική απόκρουση

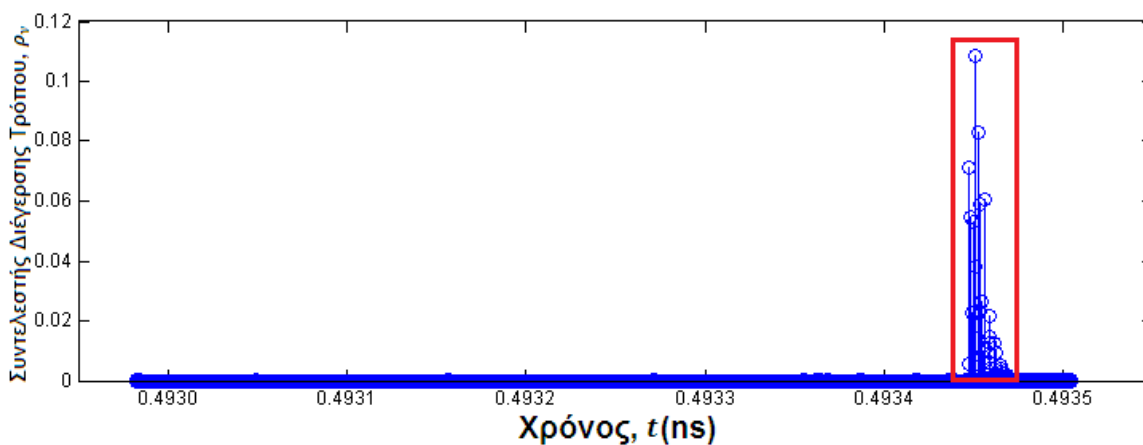
Επόμενο στάδιο της μοντελοποίησης του καναλιού ήταν η κρουστική απόκρουση του συστήματος. Αυτή υπολογίζεται από το παρακάτω τύπο:

$$h(t) = \sum_{\nu=1}^N \rho_{\nu} \cdot \delta(t - \tau_{\nu}) \quad (19)$$

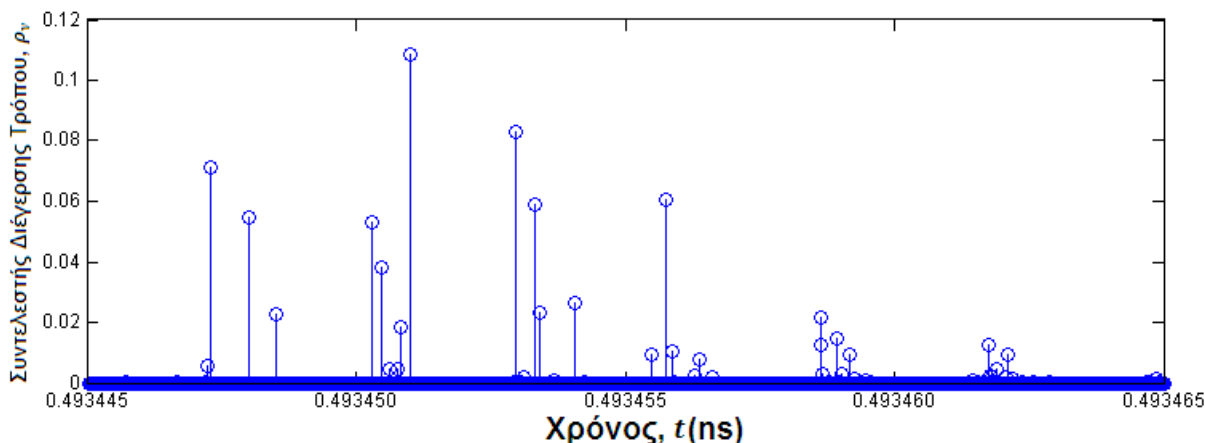
όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των τρόπων που υποστηρίζει η ίνα για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, ρ_{ν} ο συντελεστής διέγερσης για κάθε τρόπο και τ_{ν} η καθυστέρηση διάδοσης τρόπου. Η δ είναι η κρουστική συνάρτηση γνωστή και ως Dirac delta function [9]:

$$\delta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (20)$$

Στο Σχήμα 15 φαίνεται το αποτέλεσμα στο Matlab με δεδομένα εισόδου από το Comsol για τη ζητούμενη ζεύξη. Συγκεκριμένα εμφανίζεται η κρουστική απόκρουση όπως θα έχει διαμορφωθεί έπειτα από μετάδοση 100 μέτρων μέσα στην ίνα. Στο Σχήμα 16 φαίνεται η μεγέθυνση του κόκκινου πλαισίου του Σχήμα 15. Να σημειωθεί εδώ ότι ο υπολογισμός πραγματοποιείται για χρονικό διάστημα από την ελάχιστη καθυστέρηση τ_{ν} ως τη μέγιστη. Αυτό γίνεται για πιο γρήγορους υπολογισμούς και πιο ακριβείς, με βάση τους συγκεκριμένους υπολογιστικούς πόρους που υπήρχαν στη διάθεσή μας.



Σχήμα 15. Κρουστική απόκρουση συστήματος μετά από διάδοση 100 μέτρων.



Σχήμα 16. Κρουστική απόκρουση, μεγέθυνση από το Σχήμα 15.

4.3 Συνάρτηση Μεταφοράς

Το τελευταίο στάδιο της μοντελοποίησης της ζεύξης μας είναι η συνάρτηση μεταφοράς. Μέσω αυτής μπορούμε να υπολογίσουμε το εύρος ζώνης μισής ισχύος (3dB Bandwidth) της ίνας για ένα συγκεκριμένο μήκος της και πρακτικά αυτό είναι το εργαλείο που θα χρησιμοποιήσουμε και στο επόμενο κεφάλαιο ώστε να δοκιμάσουμε το μέγιστο εύρος ζώνης που μπορούμε να επιτύχουμε για τα μήκη ίνας που μας απασχολούν στην συγκεκριμένη διερεύνηση.

Για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς χρειάζεται ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής απόκρουσης του συστήματος. Αρχικά ασχοληθήκαμε με το πώς θα μετασχηματίσουμε τη κρουστική απόκρουση όπως αυτή παράχθηκε από τη μελέτη που αναλύουμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό σε ένα πρώτο στάδιο μας φάνηκε αρκετά χρήσιμο καθώς μπορούσαμε να υπολογίσουμε τη κρουστική απόκρουση για το χρονικό εύρος που μας ενδιέφερε άρα να ελέγξουμε και την ορθότητά των υπολογισμών. Επίσης έγινε μια πρώτη προσπάθεια υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς με το συγκεκριμένη τεχνική μέσω ενσωματωμένων τρόπων υπολογισμού που προσέφερε το Matlab. Τα αποτελέσματα ήταν αξιόλογα, αναλογικά και με τα αναμενόμενα από αντίστοιχες δημοσιοποιημένες διερευνήσεις στις οποίες είχαμε πρόσβαση, όμως κινηθήκαμε στη κατεύθυνση εύρεσης ενός διαφορετικού τρόπου υπολογισμού, που θα μας εξασφάλιζε βελτιωμένη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Με βάση την ιδιότητα του μετασχηματισμού Fourier που φαίνεται στη παρακάτω σχέση:

$$\delta(t - \tau_v) \overset{F}{\leftrightarrow} \exp(-j\omega\tau_v) \quad (21)$$

υιοθετήσαμε το τύπο από την αναφορά [10] για να περάσουμε από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων, με προσθήκη της εξασθένισης ομάδας τρόπων γ_m , από την αναφορά [11]:

$$H_{modal}(\omega) = \sum_{m=1}^M \rho_m \cdot \exp(-j\omega\tau_m L) \cdot \gamma_m^{-L/1000} \quad (22)$$

όπου το L είναι το μήκος διάδοσης σε μέτρα, το ρ_m ο συντελεστής διέγερσης για κάθε Mode Group και το τ_m η καθυστέρηση διάδοσης για κάθε ένα από αυτά. Για το υπολογισμό του ρ_m προστίθεται ο συντελεστής διέγερσης τρόπου για όλους τους τρόπους ανα Mode Group. Η διαφορά σε σχέση με προηγουμένως είναι πως με αυτή τη προσέγγιση ο υπολογισμός γίνεται ανα Mode Group και πως δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς χωρίς το πρότερο υπολογισμό της κρουστικής απόκρουσης, αλλά με το άθροισμα των επιμέρους μετασχηματισμών για κάθε Mode Group. Με βάση και τα αποτελέσματα που παράχθηκαν από αυτή τη σχέση αποφασίσαμε πως προσεγγίζεται καλύτερα το ζητούμενο.

Για το μήκος κύματος των 850nm που μελετάμε η συνάρτηση μεταφοράς δεν είναι ταυτόσημη με την H_{modal} καθώς η χρωματική διασπορά δεν είναι ένα αμελητέο στοιχείο και σίγουρα για να έχουμε έναν ακριβή υπολογισμό δεν θα έπρεπε να το παραλείψουμε. Έτσι από την αναφορά [11], η χρωματική διασπορά σαν παράγοντας της συνάρτησης μεταφοράς για μήκη κύματος κοντά στα 850nm δίνεται από το παρακάτω τύπο:

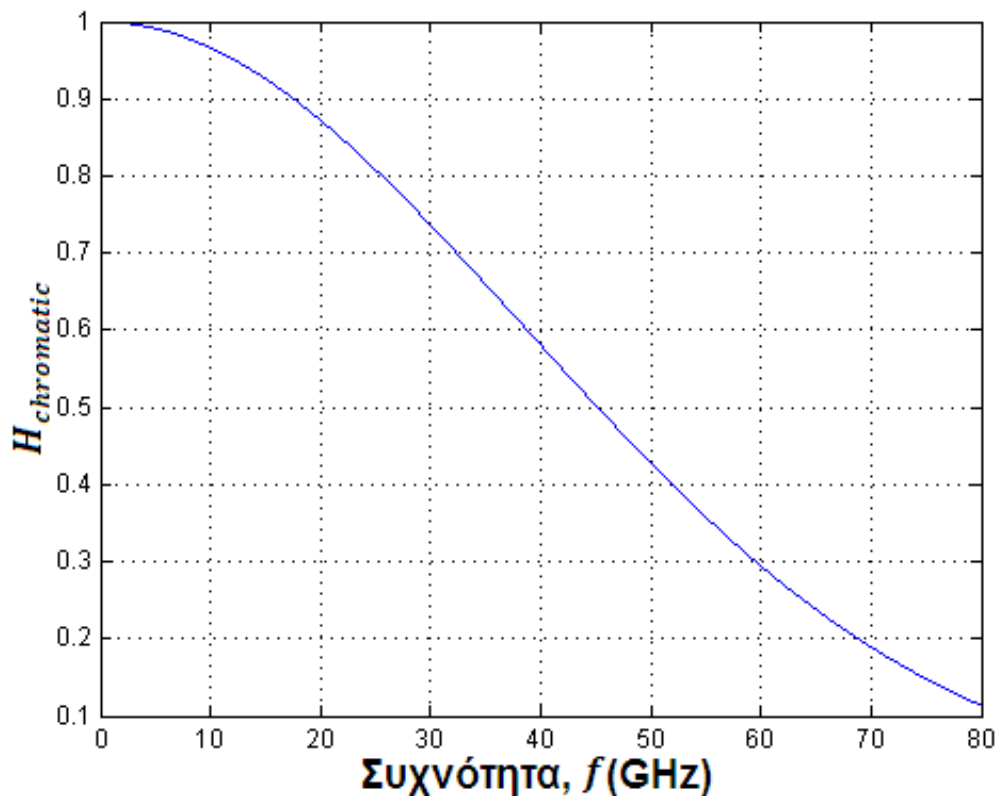
$$H_{chromatic}(\omega) = \exp\left(-\frac{(\omega\sigma_\lambda D_0 L/1000)^2}{2}\right) \quad (23)$$

όπου το σ_λ είναι το εύρος φασματικής γραμμής (spectral linewidth) του Laser και D_0 η χρωματική διασπορά η οποία υπολογίζεται από το τύπο της αναφοράς [12]:

$$D_0(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \quad (24)$$

όπου το λ_0 είναι το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς και S_0 η κλίση στο σημείο αυτό.

Στο Σχήμα 17 μπορούμε να παρατηρήσουμε κατά πόσο επηρεάζει η χρωματική διασπορά, και κατ' επέκταση η συνάρτηση μεταφοράς λόγω της χρωματικής διασποράς, τη συνολική συνάρτηση μεταφοράς για διέγερση με VCSEL από την αναφορά [13] του οποίου το spectral linewidth είναι $\sigma_\lambda = 0.4nm$. Αναφερόμαστε σε 100m διάδοση.



Σχήμα 17. Η συνάρτηση μεταφοράς λόγω χρωματικής διασποράς μετά από μετάδοση σε ίνα 100m για $\sigma_\lambda = 0.4nm$, $S_0 = 0.105$, $\lambda_0 = 1310nm$ και $\lambda = 850nm$.

Τελικά, η συνάρτηση μεταφοράς διαμορφώνεται ως εξής:

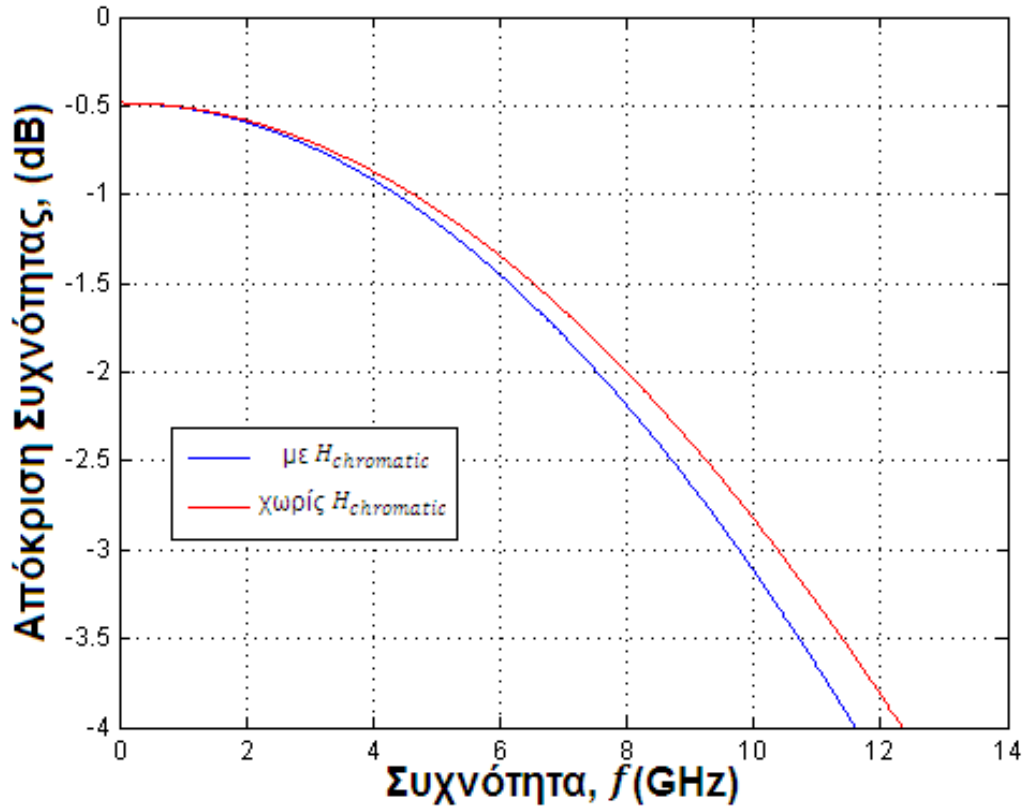
$$H_{MMF}(\omega) = H_{chromatic}(\omega) \cdot H_{modal}(\omega) \quad (25)$$

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το 3dB Bandwidth της ίνας χρειαζόμαστε την ισχύ διάδοσης την οποία υπολογίζουμε από:

$$P_{MMF} = |H_{MMF}|^2 = H_{MMF} \cdot H_{MMF}^* \quad (26)$$

και αφού μετατρέψουμε σε dB, ο αριθμός που μας ενδιαφέρει είναι η συχνότητα στην οποία το σήμα μας θα έχει τη μισή ισχύ. Με βάση αυτό, στο Σχήμα 18 φαίνεται η απόκριση συχνότητας του συστήματός μας για μετάδοση 100m. Για λόγους κατανόησης του ρόλου της χρωματικής διασποράς, στο συγκεκριμένο σχήμα εμφανίζονται συγκριτικά η

απόκριση συχνότητας με τον υπολογισμό της χρωματικής συνάρτησης μεταφοράς και χωρίς αυτόν.



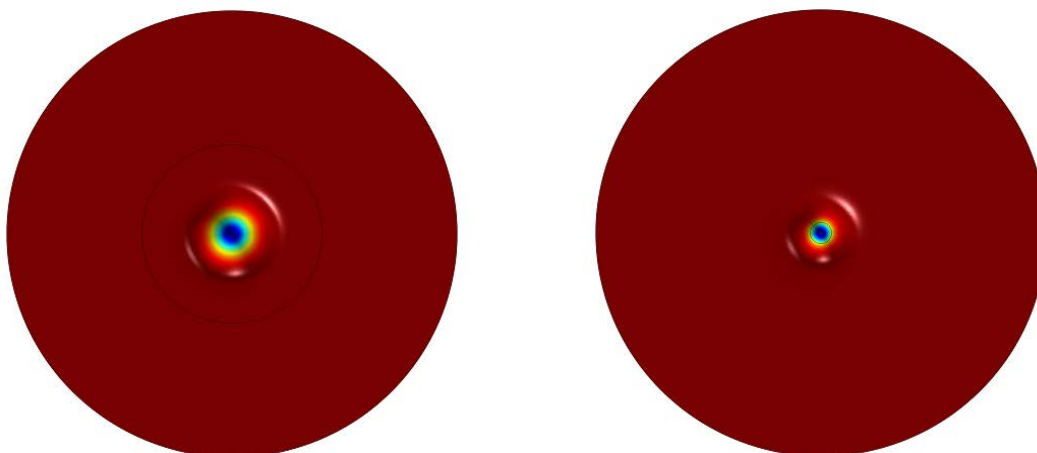
Σχήμα 18. Απόκριση συχνότητας της ίνας για μετάδοση 100m και $\gamma_0 = 2.35 \text{ dB/km}$. Με μπλε ο υπολογισμός με χρωματική διασπορά και με κόκκινο χωρίς για radial offset 10 μm .

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

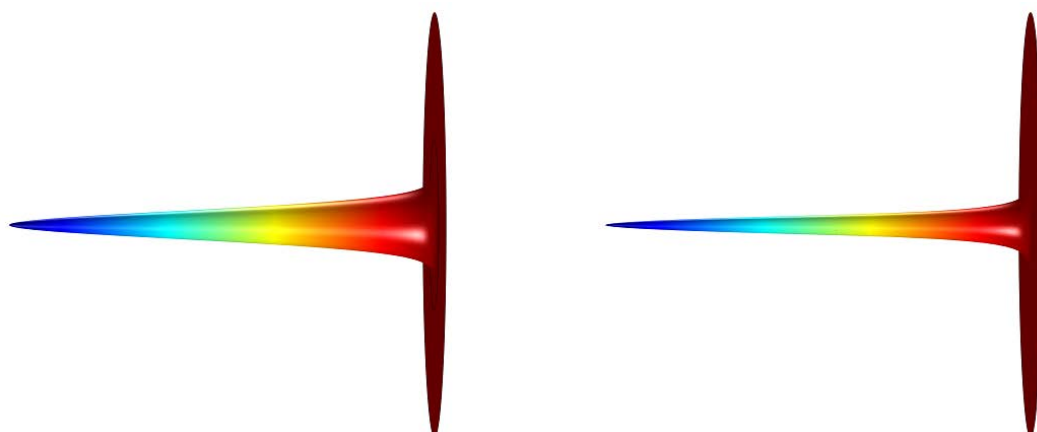
Στο κεφάλαιο αυτό κατά κύριο λόγο παραθέτουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν. Τα αποτελέσματα αφορούν κυρίως το 3dB Bandwidth και στόχος όπως έχει προαναφερθεί είναι να επιτύχουμε τιμές κοντά στο 4x25GHz για μήκος ίνας 100m και radial offsets σε απόσταση από το πυρήνα 0, 7, 14, 19 μ m.

5.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο για τη διέγερση της ίνας χρησιμοποιούμε το κανονικοποιημένο ηλεκτρικό πεδίο από μια SI-SMF με διάμετρο πυρήνα 6 μ m. Αρχικά όμως στη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκε το πεδίο από το fundamental τρόπο της ίδιας της GI-MMF που μελετάμε. Κατά τη σύγκριση των δυο πεδίων, η οποία φαίνεται και στις εικόνες 8 και 9, παρατηρήσαμε ότι η γκαουσιανή καμπάνα από την GI-MMF είχε αρκετά μεγαλύτερο πλάτος από αυτό της SI-SMF.



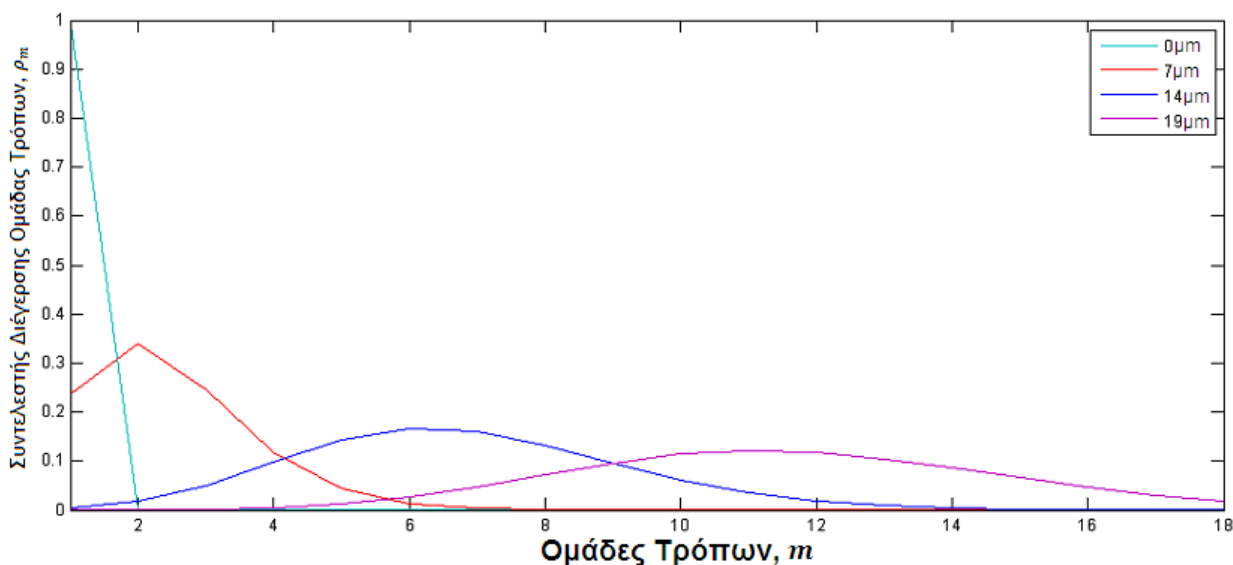
Εικόνα 8. Γκαουσιανές καμπάνες από το fundamental mode για την GI-MMF αριστερά και για την SI-SMF δεξιά.



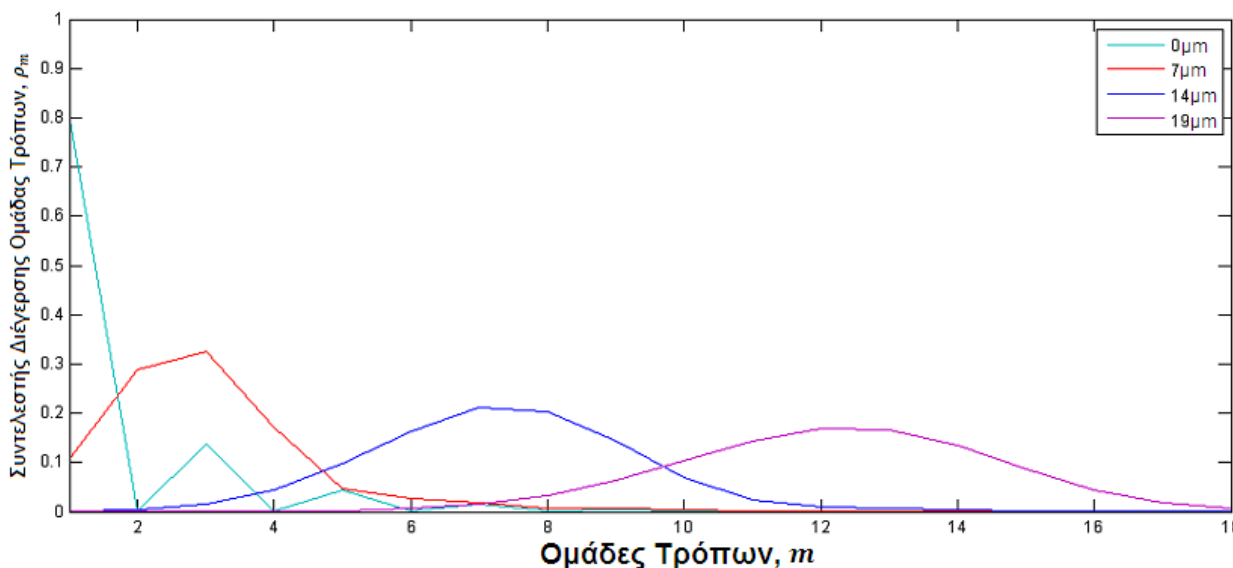
Εικόνα 9. Γκαουσιανές καμπάνες από το fundamental mode για την GI-MMF αριστερά και για την SI-SMF δεξιά.

Για κεντρική διέγερση (central excitation) της ίνας είναι ευνοϊκή η χρήση της πιο πλατιάς δέσμης που ταιριάζει με το fundamental mode της ίδιας της ίνας, ενώ για μεγάλα radial offsets είναι προτιμότερη η χρήση της στενότερης δέσμης όπως φαίνεται στην αναφορά [14].

Στα Σχήματα 19 και 20 μπορούμε να παρατηρήσουμε το φάσμα της διέγερσης τρόπων (mode excitation spectrum) για τις δύο διαφορετικές δέσμες, στα παραπάνω radial offsets. Παρατηρούμε πως με τη πιο στενή δέσμη (Σχήμα 20) τείνει να περιορίζεται η αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των φασμάτων διέγερσης τρόπων.



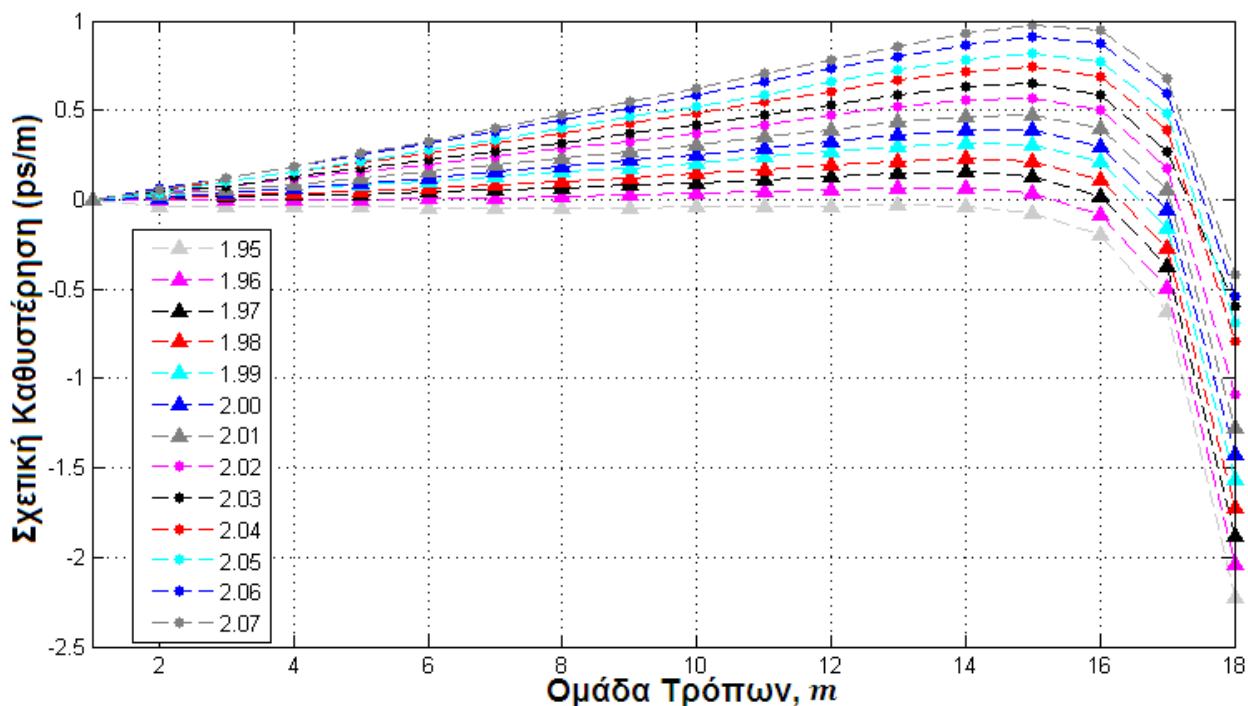
Σχήμα 19. Excitation spectrum με το πεδίο του fundamental mode της GI-MMF και radial offsets που αναγράφονται στο σχήμα.



Σχήμα 20. Excitation spectrum με το πεδίο της SI-SMF και radial offsets που αναγράφονται στο σχήμα.

Στα υπόλοιπα αποτελέσματα που θα παραθέσουμε από εδώ και πέρα το πεδίο διέγερσης θα είναι το ηλεκτρικό της SI-SMF.

Όσο αφορά τον εκθέτη g για το προφίλ του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της ίνας πραγματοποιήσαμε μία σχετική μελέτη με βάση τα αποτελέσματα της απόκρισης συχνότητας. Δοκιμάσαμε μία γκάμα διαφορετικών εκθετών από 1.95 μέχρι 2.07 που φαίνεται και στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21. Σύγκριση των σχετικών καθυστερήσεων των mode groups ως προς το πρώτο, που παράγονται για τους εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.

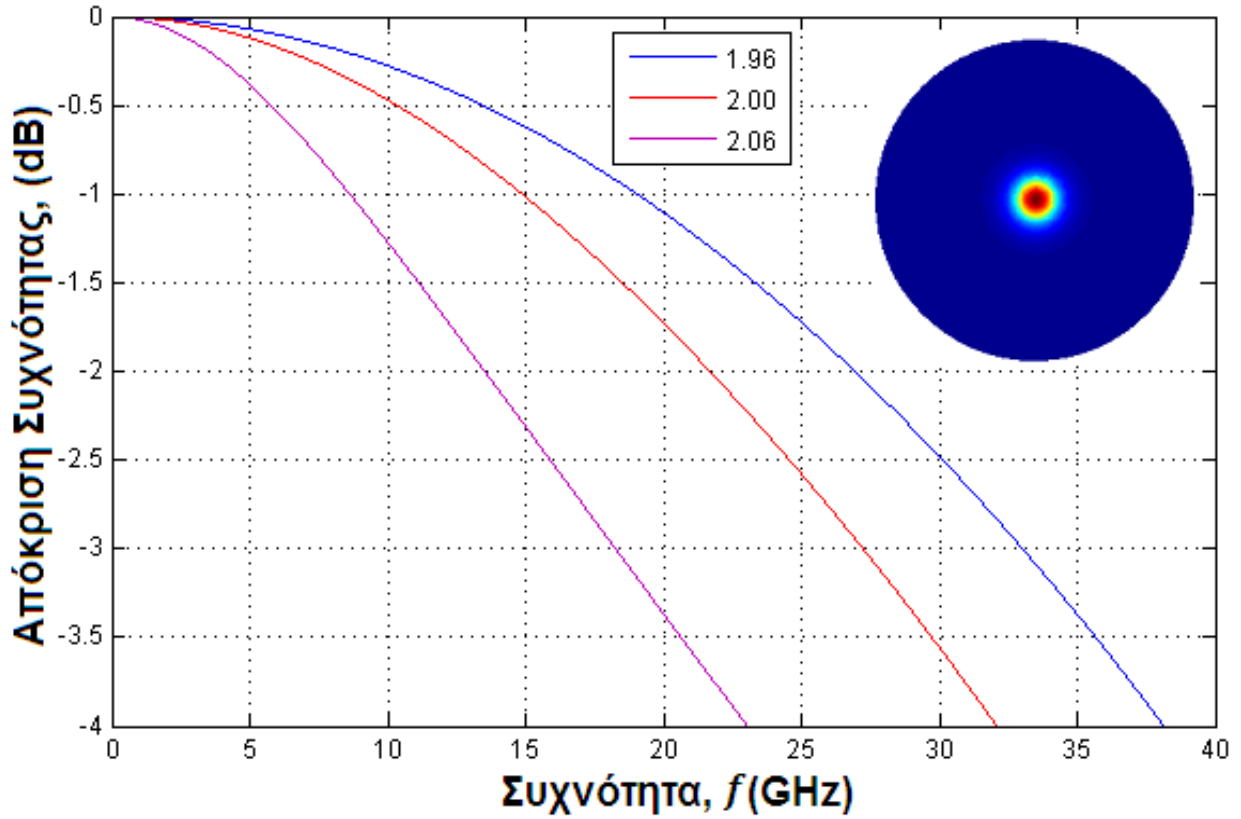
Παρατηρήσαμε ότι οι σχετικές καθυστερήσεις ως προς το πρώτο Mode Group ήταν πολύ μικρές για τον εκθέτη 1.96 με επίπτωση στα τελευταία δύο group στα οποία η τιμή απέκλινε πιο πολύ σε σχέση με άλλους εκθέτες. Παρόλα αυτά, λόγω γενικότερα της απόκλισης των τελευταίων Mode Groups σε καθυστέρηση σε σχέση με τα υπόλοιπα, αλλά και της μεγάλης διαφοράς στο DMA το οποίο παρουσιάζουν, επιλέξαμε να μην τα διεγείρουμε όσο ήταν αυτό δυνατό για να αποφύγουμε τα συγκεκριμένα φαινόμενα και έτσι ο εκθέτης 1.96 φάνηκε ο βέλτιστος με βάση τα αποτελέσματα. Στα σχήματα που θα ακολουθήσουν συμπεριλαμβάνουμε και τα αποτελέσματα για άλλους δυο εκθέτες, δηλαδή συνολικά τους 1.96, 2.00, 2.06, για πληρότητα των αποτελεσμάτων.

Επίσης σε αρχική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για άλλα radial offset, όπως για παράδειγμα τα 0, 8, 15, 20 μm , το 3dB Bandwidth δεν μπόρεσε να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές για τις οποίες η συγκεκριμένη εργασία είχε θέσει ως στόχο. Και έτσι σαν βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκαν τελικά αυτά που αναφέρονται στην αρχή του κεφαλαίου.

5.2 Τελικά Αποτελέσματα

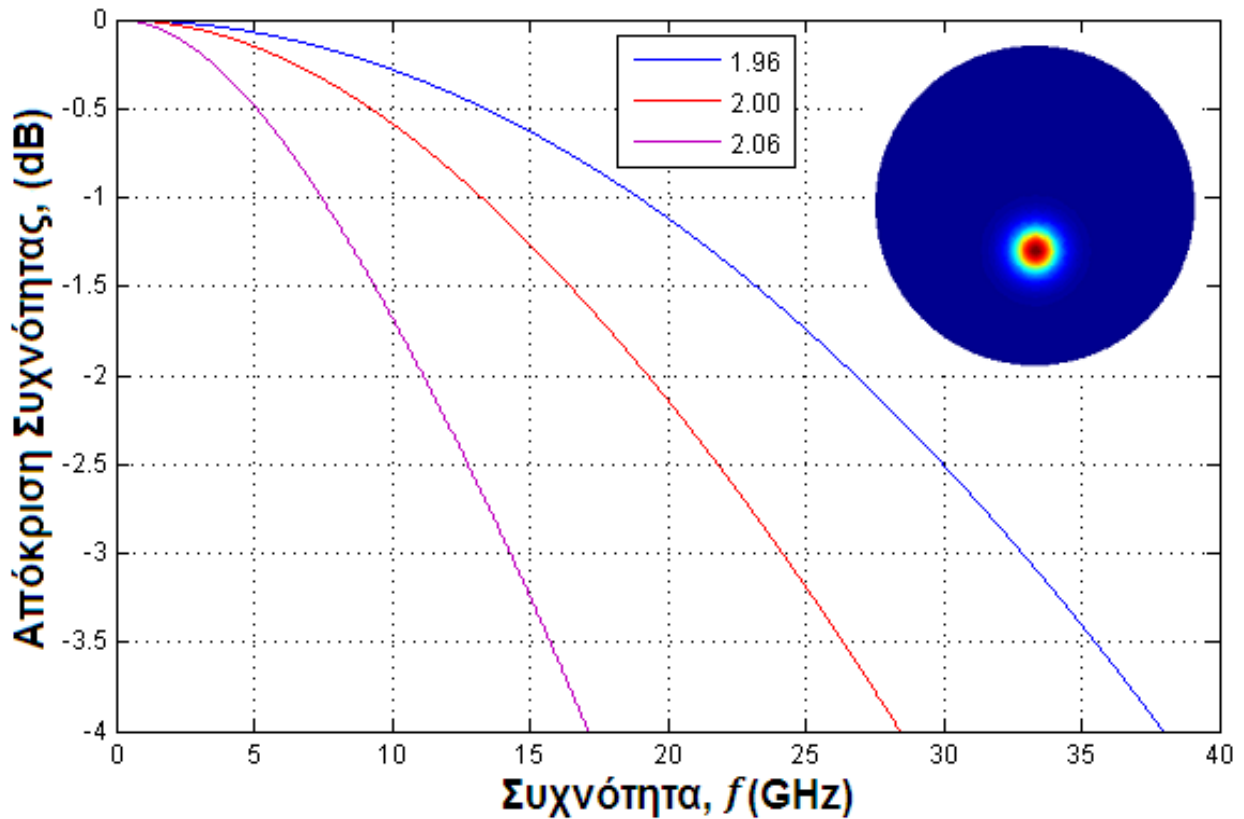
Συνοψίζοντας τα δεδομένα εισόδου που θα παρουσιαστούν στα παρακάτω αποτελέσματα, έχουμε την GI-MMF με διάμετρο πυρήνα 50 μm και μανδύα 125 μm , εκθέτη του προφίλ του πυρήνα $g = 1.96$, μήκος κύματος του οπτικού σήματος $\lambda = 850\text{nm}$ και 100m ίνα. Επίσης με οδηγό τις προδιαγραφές από την αναφορά [15] επιλέξαμε το $\gamma_0 = 2.35\text{ dB/km}$ και $\lambda_0 = 1300\text{nm}$. Για το πεδίο διέγερσης έχουμε την SI-SMF με διάμετρο 6/125 μm και $NA = 0.1$, και τέλος τα radial offsets που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα 0, 7, 14, 19 μm . Τα αποτελέσματα της απόκρισης συχνότητας τα παραθέτουμε ανα radial offset όπου παρουσιάζουμε και το πεδίο διέγερσης. Η καμπύλες έχουν κανονικοποιηθεί ώστε η μέγιστη τιμή να είναι τα 0dB.

Για radial offset = 0μm:



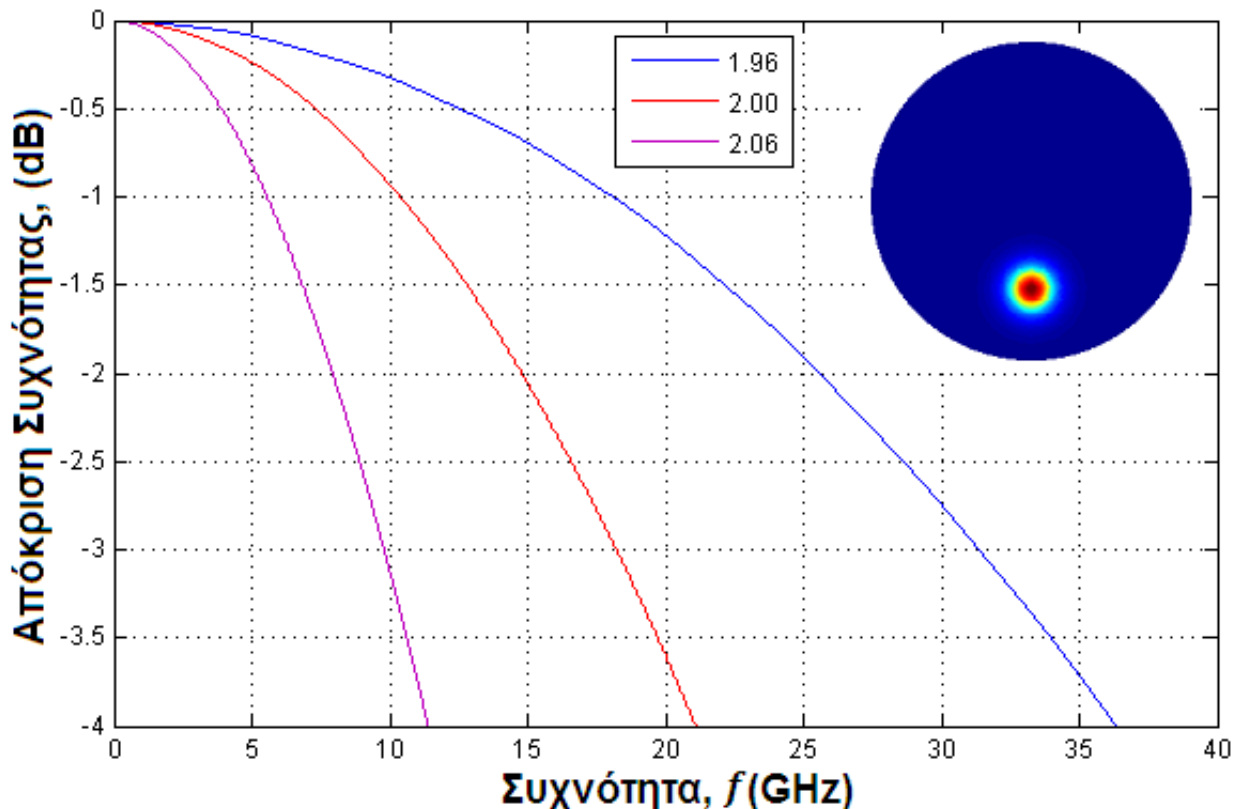
Σχήμα 22. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset μm και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.

Για radial offset = 7μm:



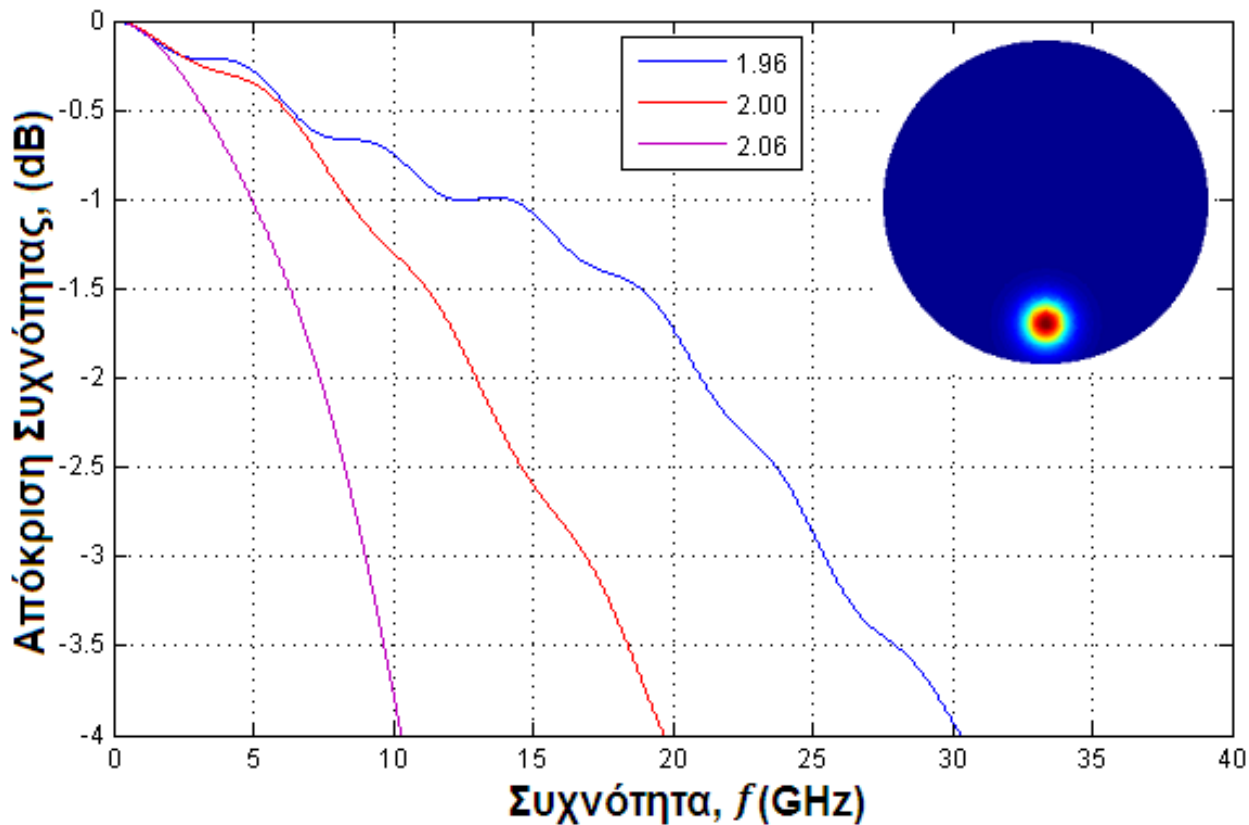
Σχήμα 23. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset 7μm και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.

Για radial offset = 14μm:



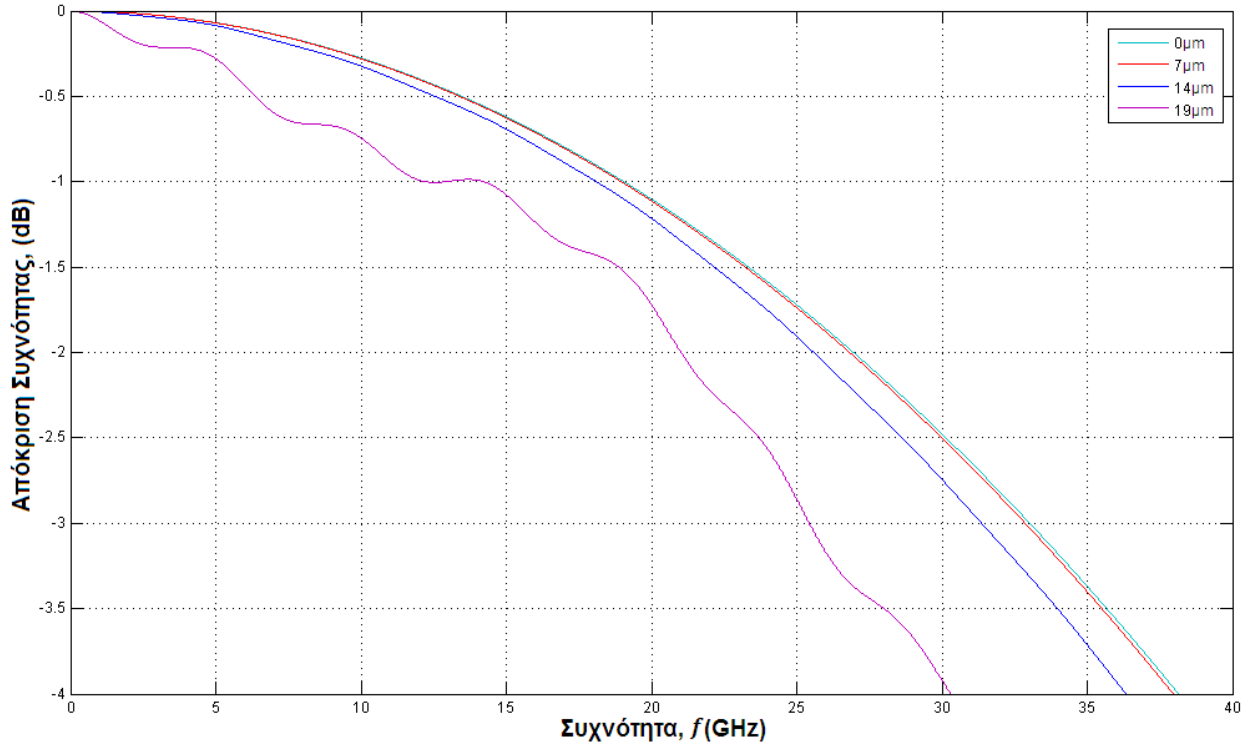
Σχήμα 24. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset 14μm και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.

Για radial offset = 19μm:



Σχήμα 25. Απόκριση συχνότητας του συστήματος για radial offset 19μm και εκθέτες g του πυρήνα που αναγράφονται στο σχήμα.

Από τα επιμέρους αποτελέσματα φαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση το 3dB Bandwidth είναι μεγαλύτερο από το 25GHz για 100m διάδοση. Έτσι μπορούμε με ασφάλεια να συμπεράνουμε ότι το τελικό σύστημά μας θα έχει κατ' ελάχιστο 4x25GHz 3dB Bandwidth και το αρχικό ζητούμενο έχει υλοποιηθεί. Εν συνεχεία με μία διαμόρφωση On-Off-Keying του σήματος μπορούμε να πετύχουμε 100Gbit/s ρυθμό μετάδοσης. Παραθέτουμε στο Σχήμα 26 τις αποκρίσεις συχνότητας μόνο για $g = 1.96$ αυτή τη φορά.



Σχήμα 26. Αποκρίσεις συχνότητας για $g = 1.96$ και για τα radial offsets που αναγράφονται στο σχήμα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετήσαμε ένα μοντέλο πολύτροπων οπτικών ινών για συστήματα μετάδοσης σε Κέντρα Δεδομένων. Η μελέτη επικεντρώθηκε στη συνάρτηση μεταφοράς της οπτικής ίνας και στην εξάρτησή της από το πεδίο διέγερσης και το προφίλ του δείκτη διάθλασης. Για την επίλυση των τρόπων που κυματοδηγούνται στην ίνα (mode solving) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Comsol και για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς το Matlab.

Η συνάρτηση μεταφοράς υπολογίστηκε για τις περιπτώσεις που η πολύτροπη ίνα διεγείρεται με ένα πεδίο γκαουσιανής κατανομής, όπως το πεδίο του fundamental mode μιας μονότροπης ίνας και για διαφορετικά radial offsets του πεδίου αυτού. Φάνηκε πως με τη κατάλληλη επιλογή του προφίλ του δείκτη διάθλασης της πολύτροπης ίνας είναι δυνατόν να έχουμε 4 οπτικά κανάλια (κάθε κανάλι προσδιορίζεται από το radial offset του πεδίου διέγερσης) με τουλάχιστον 25GHz 3dB Bandwidth το κάθε ένα. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσαμε να υλοποιήσουμε ένα σύστημα Πολυπλεξίας Ομάδων Τρόπων (Mode Group Diversity Multiplexing) συνολικού 3dB Bandwidth 4x25GHz. Ένα τέτοιο σύστημα με διαμόρφωση On-Off-Keying μπορεί να υποστηρίξει 100Gbit/s μετάδοση.

Σαν συμπέρασμα φάνηκε ότι οι μετρήσεις και οι παράμετροι στην εργασία χρειάζονται σε ορισμένες περιπτώσεις αρκετή ακρίβεια. Για παράδειγμα, για πολύ μικρές διαφορές στο προφίλ του δείκτη διάθλασης του πυρήνα της ίνας, παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλες αποκλίσεις στο 3dB Bandwidth. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που μια μελέτη σαν τη παρούσα θα πρέπει να πλαισιωθεί με εργαστηριακό-πειραματικό μέρος, ώστε να επιβεβαιωθούν αυτά τα πολύ ευαίσθητα αποτελέσματα. Ακόμη, συνέχεια της εργασίας θα αποτελούσε η ολοκλήρωση του συστήματος μετάδοσης, με τη προσθήκη σε αυτό πομπού, δέκτη, κατάλληλων φίλτρων και συνδετήρων (connectors), ώστε να προσομοιωθεί ένα ολοκληρωμένο οπτικό σύστημα μετάδοσης και να μελετηθούν και άλλα στοιχεία που αυτό έχει, όπως ο Ρυθμός Σφαλμάτων Bit (Bit Error Rate). Ένα ακόμα κομμάτι προς διερεύνηση που θα μπορούσε να λάβει μέρος στην εργασία είναι η Πολυπλεξία Μήκους Κύματος (WDM). Συγκεκριμένα αναφερόμαστε στο Coarse WDM που πραγματοποιεί πολυπλεξία μηκών κύματος, τα οποία έχουν διαφορά μεταξύ τους τουλάχιστον 20nm, διότι επιτυγχάνεται και χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις WDM. Για τη περεταίρω αύξηση του 3dB Bandwidth θα μπορούσε να μελετηθεί λοιπόν ο συνδυασμός ενός συστήματος CWDM και Mode Group Diversity Multiplexing (MGDM) που υλοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία. Με αυτό τον τρόπο, και αν ορίσουμε τέσσερα διαφορετικά μήκη κύματος, θα μπορούσε να εδραιωθεί 3dB Bandwidth της τάξης των 4x4x25GHz δηλαδή 400GHz. Αν αυτό συνδυαστεί και με τη κατάλληλη διαμόρφωση του σήματος εισόδου, για παράδειγμα διαμόρφωση Nyquist-PAM4, τότε το 3dB Bandwidth αγγίζει τα 1.6THz. Αυτή λοιπόν θα ήταν μία ενδιαφέρουσα μελλοντική προσέγγιση.

Τέλος θα θέλαμε να αναφέρουμε πως εξαιτίας της κατάστασης που αυτή τη στιγμή επικρατεί στον χώρο της έρευνας, με την άμεση εξάρτηση των δημοσιεύσεων από τα σχετικά περιοδικά, αντιμετωπίσαμε αρκετές δυσκολίες στην εύρεση βιβλιογραφίας η οποία να μας βοηθά να προχωρήσουμε στη μελέτη μας. Αυτό, επειδή οι περισσότερες δημοσιεύσεις χρειάζονται συνδρομή για να μπορέσουν να αναγνωστούν και έτσι καθίσταται δύσκολη η πρόσβαση σε αυτές. Γενικότερα, η εμπορευματοποίηση της γνώσης και ο ανταγωνισμός των επιχειρήσεων, που χρηματοδοτούν την έρευνα για κάθε κλάδο, βάζουν εμπόδια στην ανάπτυξή τους συνολικά, αφού με γνώμονα το κέρδος δεν προάγεται η επιστήμη που υπηρετεί τον άνθρωπο και τη κοινωνία αλλά, το συμφέρον της κάθε επιχείρησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος

Ελληνικός Όρος

3dB Bandwidth	Εύρος Ζώνης Μισής Ισχύος
Bandwidth	Εύρος Ζώνης
Bit Error Rate	Ρυθμός Σφαλμάτων Bit
Central Excitation	Κεντρική Διέγερση
Cladding	Μανδύας
Cloud Computing	Νεφοϋπολογιστική
Coarse Wavelength Division Multiplexing	Πολυπλεξία Τραχύς Μήκους Κύματος
Complex Refractive Index	Σύνθετος Δείκτης Διάθλασης
Datacenter	Κέντρο Δεδομένων
Dirac Delta Function	Συνάρτηση Δέλτα του Dirac
Excitation Spectrum	Φάσμα Διέγερσης
Fundamental Mode	Θεμελιώδης Τρόπος
Group Index	Δείκτης Ομάδας
Intensity Modulation Direct Detection	Διαμόρφωση Έντασης και Άμεση Φώραση
Mode Excitation	Διέγερση Τρόπου
Mode Excitation Coefficient	Συντελεστή Διέγερσης Τρόπου
Mode Excitation Spectrum	Φάσμα Διέγερσης Τρόπων
Mode Group Diversity Multiplexing	Πολυπλεξία Ομάδων Τρόπων
Mode Matching	Ταίριασμα Τρόπων
Mode Solving	Επίλυση Τρόπων που Κυματοδηγούνται
Near Field Pattern	Κοντινό Πεδίο
Online	Σε Σύνδεση
Overlap Integral	Ολοκλήρωμα Επικάλυψης
Radial Offset	Ακτινικό Διάστημα
Spectral Linewidth	Εύρος Φασματικής Γραμμής
Streaming	Συνεχής Ροή

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DMA	Differential Mode Attenuation
DMD	Differential Mode Delay
EIA	Electronic Industries Alliance
GI	Graded-Index (Διαβαθμισμένος δείκτης διάθλασης)
IP	Internet Protocol (Πρωτόκολλο διαδικτύου)
MGDM	Mode Group Diversity Multiplexing
MMF	Multi Mode Fiber (Πολύτροπη ίνα)
NA	Numerical Aperture
SI	Step-Index (Βηματικός δείκτης διάθλασης)
SMF	Single Mode Fiber (Μονότροπη ίνα)
TIA	Telecommunications Industry Association
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Lasers
ΕΚΠΑ	Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] "Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2013-2018," [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/Cloud_Index_White_Paper.pdf.
- [2] R. Kitamura, L. Pilon and M. Jonasz, "Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature," *Applied Optics*, vol. 46, no. 33, pp. 8118-8133, 2007.
- [3] "RP-Photonics, Sellmeier formula," [Online]. Available: http://www.rpphotonics.com/sellmeier_formula.html.
- [4] "Wikipedia, Sellmeier Equation," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Sellmeier_equation.
- [5] "HPFS Fused Silica Standard Grade," [Online]. Available: <http://www.corning.com/media/worldwide/csm/documents/90aac42d1e5f45cfb3b8d8d2866a81e33.pdf>.
- [6] X. Chen, S. Bickham, H. Liu, O. Dosunmu, J. Hurley and M. Li, "25 Gb/s transmission over 820 m of MMF using a multimode launch from an integrated silicon photonics transceiver," *OPTICS EXPRESS*, vol. 22, no. 2, pp. 2070-2077, 2014.
- [7] I. Gasulla and J. Capmany, "Transfer function of multimode fiber links using an electric field propagation model: Application to Radio over Fibre Systems," *OPTICS EXPRESS*, vol. 14, no. 20, pp. 9051-9070, 2006.
- [8] C. Tsekrekos, "Mode group diversity multiplexing in multimode fiber transmission systems," Electrical Engineering of the Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2008.
- [9] "Matrixlab-Examples, Impulse function - Dirac Delta," [Online]. Available: <http://www.matrixlab-examples.com/impulse-function.html>.
- [10] K. Patel, "Spatially Resolved Equalization: A New Concept in Intermodal Dispersion Compensation for Multimode Fiber," School of Electrical and Computer Engineering of the Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2004.
- [11] G. Yabre, "Comprehensive Theory of Dispersion in Graded-Index Optical Fibers," *LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 18, no. 2, pp. 166-177, 2000.
- [12] "Multimode Chromatic Dispersion Measurement Method," Corning, 2001.
- [13] "850nm 10Gb/s Multimode VCSEL LC TOSA," [Online]. Available: <http://www.laserenterprise.com/resources/pdf/APA7301012000.pdf>.
- [14] J. Saijonmaa, A. B. Sharma and S. J. Halme, "Selective excitation of parabolic-index optical fibers by Gaussian beams," *Applied Optics*, vol. 19, no. 14, pp. 2442-2452, 1980.
- [15] "WideCap-OM4 Multimode Fibre," [Online]. Available: http://prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/fibre/downloads/datasheets/WideCap-OM4_2014-09.pdf.