بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک – اتمی و مولکولی

بررسی انتشار نور در موجبرهای ARROW با استفاده از روش محاسباتی FDTD

نگارش:

فاطمه خسروی

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا زنگنه

شهریور 1391

تقدیم به آنان که در کوره راه زندگی،

قدم‌های استوارشان همراهم است،

آنگاه که زمین می‌خورم،

دستان مهربانشان،

مرا بلند می‌کند،

و آنگاه که از رفتن باز می‌مانم،

نفس‌های گرمشان،

مرا به حرکت وا می‌دارد،

پدر و مادرم

شادی قلب‌های مهربانشان آرزوی من است.

چکیده

موجبرهای نوری بازتابی پادتشدیدی ARROW از نوع موجبرهای تک مد با اتلاف تراگسیلی کم می‌باشند و توانایی محبوس‌کنندگی و هدایت نور در هسته‌ای با ضریب شکست کم‌تر را دارند، لذا در طراحی ابزارهای اپتیک مجتمع نقش بسزایی را ایفا می‌کنند.

در این پایان‌نامه، نحوه‌ی انتشار و هدایت نور و محبوس‌شدگی مدهای پادتشدیدی در موجبرهای نوری بازتابی پادتشدیدی و نیز ساختار و ترکیبات مواد آن‌ها بررسی شد. همچنین ضخامت لایه‌ها، ثابت‌های انتشار و اتلاف تابشی هر مد محاسبه گردید. به منظور بهینه‌سازی عملکرد موجبر، می‌توان پارامترهای هندسی و نوری آن را تغییر داد. لذا ساختاری از موجبر ARROW شیاردار با بهره‌گیری از فناوری سیلیکون جهت کاربردهای حسگری ارائه شد و مشخصه‌های نوری آن با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه‌ی زمان (FDTD) مورد ارزیابی قرار گرفت و انتشار پرتو لیزر در موجبر ARROW مورد نظر شبیه‌سازی گردید.

علاوه بر این، از آن‌جا که فیلترهای نوری سرعت پردازش بالایی دارند، نسبت به دیگر فیلترها دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشند. با ایجاد ناراستی و همچنین تغییر ساختار یک فیلتر نوری می‌توان مشخصه‌های آن را تغییر داد و بخشی از نوار بازتابندگی را به نوار تراگسیلندگی تبدیل نمود. لذا در این پایان‌نامه، موجبری با کاربرد فیلتری در نظر گرفته شد و تاثیر ناراستی با اضافه نمودن ناخالصی SiO_2 و نیز تاثیر حضور نقره در ساختار فیلتر نوری با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت.

کلمات و عبارات کلیدی: موجبرهای نوری بازتابی پادتشدیدی (ARROW)، تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD)، انتشار نور در موجبر، انتشار لیزر، حسگر میدان میرا، فیلتر نوری، شبیه‌سازی، فناوری سیلیکون.

تقدیر و تشکر

حمد و ستایش خدایی را که اول است و پیش از او اولی نبود و آخر است بی آن که بعد از او آخری باشد. شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان‌نامه را به اتمام برسانم.

همه‌ی پیشرفت‌های معنوی و مادی بشر ریشه در تربیت افراد دارد که از منبع زلال ایمان، معرفت، تعهد و ایثار معلم سیراب می‌شوند. از این منظر کشور وامدار همه‌ی استادانی است که بحق چراغ هدایت بشریت را به تأسی از پیامبر اعظم (ص) روشن و فروزان نگاه داشته‌اند. معلمان عزیزی که نه تنها با آموختن علم، بلکه با آموزش روش درست آزاد اندیشیدن و پای‌بندی به اصول اخلاق حرفه‌ای، همواره انسان‌ها را از آسیب کج‌فهمی، تعصب و گمراهی دور نگه داشته و راه زندگی درست و آزادگی را می‌آموزند. پس به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر حمیدرضا زنگنه که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از پدر و مادر عزیز، دلسوز و مهربانم که پیوسته جرعه‌نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آن‌ها بوده‌ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده است؛ سپاسگزاری می‌نمایم.

از مساعدت‌های بی‌شائبه‌ی سرکار خانم مهندس مرضیه اسدنیای فرد جهرمی که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده‌اند؛ کمال تشکر را دارم.

خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند؛ خالصانه تشکر می‌نمایم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه 1

فصل اول : انواع موجبرهای نوری 4

1-1 مقدمه 5

2-1 موجبرها بر اساس هندسه‌ی ساختار 5

3-1 ساخت موجبرها 6

4-1 کاربردها 7

5-1 موجبرهای کانالی 8

1-5-1 موجبر پوشانیده شده 8

2-5-1 موجبر شیاردار 9

3-5-1 موجبر نوار نصب شده 9

6-1 فیبر نوری 9

7-1 موجبر توری 11

8-1 فیبرهای براگ: هسته‌ی هوا و هم‌محور 12

9-1 توری براگ فیبری 13

10-1 موجبر بلور فوتونی 15
11-1 فیبرهای بلور فوتونی 16
12-1 موجبر خمیده 18
13-1 توری‌های موجبر آرایه‌ای 19
14-1 موجبرهای نوری بازتابی پادتشدیدی 21

فصل دوم : نظریه‌ی موجبرهای نوری 22
1-2 مقدمه 23
2-2 نظریه‌ی موج موجبرهای نوری 23
1-2-2 ساختمان موجبر 23
2-2-2 تشکیل مدهای هدایت شده 25
3-2-2 معادلات ماکسول 27
3-2 موجبرهای نوری مسطح 28
1-3-2 موجبرهای تیغه‌ای 28
1-1-3-2 استخراج معادلات پایه 28
2-1-3-2 معادلات پاشندگی برای مدهای TE 30
3-1-3-2 محاسبه‌ی ثابت انتشار 33
4-1-3-2 توزیع میدان الکتریکی 35
2-3-2 موجبرهای مستطیلی 36
1-2-3-2 معادلات پایه 36

2-2-3-2 معادلات پاشندگی برای مدهای E_{pq}^{x} و E_{pq}^{y} و روش Marcatili 37

2-2-3-3 روش ضریب شکست موثر 40

2-4 نظریه جفت‌شدگی مد 41

2-4-1 بهنجارش و تعامد ظاهری 41

2-4-2 بسط ظاهری میدان الکترومغناطیسی 43

2-4-3 معادلات مد جفت شده : ضرایب جفت‌شدگی 44

2-4-4 نظریه‌ی جفت‌شدگی مد 47

فصل سوم : روش تفاضل متناهی در حوزه‌ی زمان 49

3-1 مقدمه 50

3-2 مفهوم تفاضل متناهی (FD) 50

3-3 معرفی روش تفاضل متناهی حوزه‌ی زمان (FDTD) 51

3-3-1 شبکه‌بندی و المان‌سازی میدان 53

3-3-2 معادلات پایه‌ای در الگوریتم FDTD 56

3-3-3 معرفی نمادگذاری 57

3-3-4 عبارت تفاضل متناهی برای معادلات ماکسول در سه بعد 57

3-4 پاشندگی عددی 59

3-5 تعیین ابعاد شبکه در FDTD 61

3-6 تحلیل پایداری و تعیین گام زمانی در FDTD 62

3-7 شرایط مرزی 63

3-7-1 شرایط مرزی PEC و PMC 65
3- 7-2 شرط مرزی جذب Mur 66
3-7-3 شرط مرزی PML 68
3-7-4-1 اصول پیاده‌سازی شرط مرزی PML 70
3-7-4-2 گسسته سازی الگوریتم PML 74
3-8 چشمه موج در FDTD 75
3-8-1 روش‌های اعمال منبع موج در FDTD 75
3-8-2 شکل منبع موج 77

فصل چهارم : شبیه‌سازی انتشار پرتو لیزر در ساختار موجبر نوری بازتابی پادتشدیدی ARROW 79
4-1 مقدمه 80
4-2 ساختار ARROW-Type 80
4-3 انتشار نور در موجبر ARROW 82
4-4 ضخامت لایه‌های موجبر ARROW 83
4-5 ثابت انتشار در موجبر ARROW 86
4-6 اتلاف در موجبر ARROW 87
4-7 مد در موجبر ARROW 87
4-8 شبیه‌سازی 89
4-8-1 شبیه‌سازی در یک بعد 90
4-8-2 پایداری و روش FDTD 93

4-8-3 شرط مرزی جذب در یک بعد 93
4-8-4 انتشار در محیط دی‌الکتریک 95
4-8-5 شبیه‌سازی منبع‌های متفاوت 96
4-8-6 انتشار در یک محیط دی‌الکتریک اتلافی 97
4-8-7 شبیه‌سازی در دو بعد 98
4-8-8 شبیه‌سازی تاثیر لایه‌ی تطبیق یافته (PML) در دو بعد 100
4-8-9 شبیه‌سازی در سه بعد 103
4-8-10 شبیه‌سازی تاثیر لایه‌ی تطبیق یافته (PML) در سه بعد 105
4-8-11 شبیه‌سازی انتشار پرتو لیزر در موجبر نوری بازتابی پادتشدیدی 106
4-8-12 تاثیر لایه‌نشانی فلز و حضور SiO_2 با ساختار دوره‌ای دو بعدی در مشخصه‌های فیلترهای نوری 110

نتیجه‌گیری و آینده‌ی کار 114

منابع و مراجع 116

پیوست 123

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (پ-1): مواد مورد استفاده هر لایه در موجبر ARROW 123

جدول (پ-2): مواد مورد استفاده هر لایه در موجبر ARROW-B 123

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (1-1): دو نوع متفاوت موجبرها. (الف) موجبرهای مسطح. (ب) موجبرهای کانالی 6

شکل (1-2): انواع موجبر کانالی. (الف) پوشانیده شده. (ب) شیاردار. (ج) نوار نصب شده 8

شکل (1-3): هندسه‌ی معمول یک فیبر نوری 10

شکل (1-4): انواع فیبر نوری 10

شکل (1-5): طرح اولیه از ساختار موجبر توری معمولی. میدان الکتریکی مد هدایت شده تحت شرایط تشدیدی نشان داده شده است 11

شکل (1-6): سطح مقطع فیبر براگ. (الف) فیبر براگ با هسته‌ی هوا. (ب) فیبر براگ هم‌محور 12

شکل (1-7): روش هولوگرافیک عرضی جهت نقش بر توری‌های فیبری 13

شکل (1-8): توری براگ فیبری یکنواخت 14

شکل (1-9): تصویری شماتیک از تناوب بلورهای فوتونی در (الف) یک بعد. (ب) دو بعد. (ج) سه بعد 15

شکل (1-10): انواع مختلف موجبر داخل یک PhC . (الف) موجبر کاواک جفت‌شده با تغییر قطر حفره‌ها. (ب) موجبر کاواک جفت‌شده با حذف حفره‌ها. (ج) هدایت موج در امتداد خط پیوسته‌ای از حفره‌ها با شعاع تغییر یافته. (د) موجبر W1. (ه) موجبر W3. دایره‌های نقطه‌چین حفره های حذف شده را نشان می دهند 16

شکل (1-11): ساختار یک فیبر بلور فوتونی با روکش هوا 17

شکل (1-12): (الف) اولین PCF با هسته‌ی شیشه‌ای جامد که توسط یک آرایه‌ی مثلثی از کانال‌های هوا به قطر $300nm$ و با فاصله‌گذاری $2/3\ mm$ احاطه شده است. (ب) جزئیات PCF با هسته جامد با اتلاف کم (فاصله‌ی درون حفره‌ای ~ $2mm$). (ج) اولین PCF با هسته‌ی توخالی. (د) PCF با هسته‌ی کوچک بیرون آمده از شیشه‌ی SCHOTT SF6 17

شکل (1-13): یک موجبر تیغه‌ای خمیده با محور y به عنوان محور تقارن 18

شکل (1-14): توزیع میدان الکتریکی بهنجار در راستای محور z در یک موجبر خمیده‌ی فلزی در 2 GHz. (الف) توزیع میدان در یک موجبر مستقیم. (ب) توزیع میدان در یک موجبر خمیده‌ی منحنی. (ج) توزیع میدان در یک موجبر خمیده‌ی راست‌گوشه تیز 19

شکل (1-15): ساختار یک چندگانه‌ساز توری موجبر آرایه‌ای AWG . آرایش جفت‌کننده‌ی FPR (گوشه‌ی سمت راست بالا) و پارامترهای موجبری (گوشه‌ی سمت چپ بالا) 20

شکل (1-16): ساختار اصلی موجبرARROW 21

شکل (2-1): ساختار اصلی و ضرایب شکست موجبر نوری 24

شکل (2-2): پرتوهای نوری و جبهه‌های فازی آن‌ها در موجبر 25

شکل(2-3): بازتاب کلی موج تخت در فصل مشترک دی‌الکتریک 26

شکل (2-4): موجبر نوری تیغه‌ای 29

شکل (2-5): موجبر مستطیلی سه بعدی 36

شکل (2-6): تعاریف مد و توزیع‌های میدان الکتریکی در روش Marcatili 39

شکل (2-7): موجبر شیاردار 40

شکل (2-8): ساختار موجبر که در راستای ثابت انتشار ناورداست، توسط توزیع فضایی گذردهی دی‌الکتریک $\varepsilon(x,y)$ آن توصیف می‌شود (همچنین حجم مورد نظر جهت انتگرال‌گیری نشان داده شده است.) 42

شکل (2-9): چپ: ساختار دو موجبر مستقل (جفت نشده) با میدان‌های ظاهری ψ_a و ψ_b و ثابت های انتشار β_a و β_b. راست: وقتی دو موجبر به هم نزدیک شوند، میدان‌های ظاهری در اثر جفت‌شدگی متقابل، به ψ_e و ψ_o تغییر می‌یابند 47

شکل (2-10): سیستم دو موجبر جفت شده، هر دو موجبر تک مد هستند ولی ثابت‌های انتشار متفاوت دارند. پس از روانه کردن نور به موجبر I، تبادل توان جزئی به موجبر II وجود دارد 48

شکل (2-11): سیستم دو موجبر تک مد جفت شده که مقدار یکسانی برای ثابت های انتشار دارند. پس از روانه کردن نور به موجبر I، تبادل توان کلی به موجبر II وجود دارد 48

شکل (3-1): موقعیت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در طرح Yee. (الف) ارتباط بین عناصر الکتریکی و مغناطیسی. (ب) عنصر الکتریکی در سه بعد. (ج) عنصر مغناطیسی در دو بعد 54

شکل (3-2): نمایش آرایش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در الگوریتم 55

شکل (3-3): بررسی طریقه‌ی خاتمه دادن به شبکه‌ی مورد تحلیل 59

شکل (3-4): خطای پاشندگی عددی در روش FDTD. (الف) $\Delta x = \Delta y = \lambda/5$. (ب) $\Delta x = \Delta y = \lambda/10$. (ج) $\Delta x = \Delta y = \lambda/20$ 61

شکل (3-5): شرایط مرزی (الف) PEC . (ب) PMC 65

شکل (3-6): شرط مرزی جذب 66

شکل (3-7): بررسی میزان بازتاب از مرز مشترک دو ماده PML 73

شکل(3-8): روش پیاده‌سازی ضرایب در مرزها و نقاط تلاقی 74

شکل (4-1): ساختار اصلی موجبرهای ARROW- Type. (الف) ARROW. (ب) ARROW- B 81

شکل (4-2): تغییرات ساختار ARROW .(الف) هسته‌ی ARROW با ماده‌ای با ضریب شکست کم پوشانده شده است. (ب) ARROW متقارن. (ج) روکش تداخلی شامل L جفت لایه. (د) ماده‌ای با ضریب شکست کم برای زیرلایه 81

شکل (4-3): نحوه‌ی انتشار نور در هسته‌ی موجبر ARROW. 82

شکل (4-4): تحلیل مدل موجبر ARROW 83

شکل (4-5): شماتیکی از یک موجبر ARROW جهت محاسبه‌ی ضخامت لایه‌های تداخلی. d_1, n_1 ضریب شکست و ضخامت اولین لایه‌ی روکش، d_2, n_2 ضریب شکست و ضخامت دومین لایه‌ی روکش 84

شکل (4-6): الگوریتم Yee 90

شکل (4-7): جای‌گیری میدان‌های **E** و **H** در فضا و زمان در فرمول بندی FDTD 91

شکل (4-8): جای‌گیری میدان‌های **E** و **H** برای فرمول بندی دو بعدی TM (برای مد TM) 99

شکل (4-9): نتایج شبیه‌سازی دو بعدی در چند گام زمانی 99

شکل (4-10): شبیه سازی تاثیر PML در دو حالت دو بعدی در T=40 وT=100 103

شکل (4-11): سلول Yee 103

شکل (4-12): یک آنتن دو قطبی 104

شکل (4-13): شبیه‌سازی تابش میدان E از یک آنتن دو قطبی در برنامه‌ی سه بعدی در چند گام زمانیFDTD 105

شکل (4-14): شبیه سازی تاثیر PML در حالت سه بعدی در چند گام زمانی، هنگامی که تابش از یک آنتن دو قطبی را داریم 106

شکل (4-15): سطح مقطع ساختار موجبرهای ARROW 107

شکل (4-16): نحوه‌ی انتشار مولفه‌ی حقیقی E_yدر موجبر 108

شکل(4-17): سطح مقطع ساختار فیلتر نوری. a = 5 µm و b = 4 µm و c =0/6 µm و d =0/2 µm 110

فهرست نمودارها

عنوان **صفحه**

نمودار (2-1) ضرایب شکست موجبر تیغه‌ای 31

نمودار (2-2): ارتباط $u - w$ در موجبر تیغه‌ای 33

نمودار (2- 3): منحنی پاشندگی برای مدهای TE درموجبر تیغه‌ای 34

نمودار (4-1): شبیه سازی FDTD از پالسی در فضای آزاد 93

نمودار (4-2): شبیه‌سازی FDTD با شرایط مرزی جذب 94

نمودار (4-3): شبیه‌سازی پالس برخوردکننده به ماده‌ی دی‌الکتریک 95

نمودار (4-4): شبیه‌سازی موج سینوسی انتشار یافته‌ی 700 MHz که به محیطی با ثابت دی‌الکتریک نسبی 4 برخورد می‌کند . (الف) T=150 (ب) T= 425 96

نمودار (4-5): شبیه‌سازی موج سینوسی انتشار یافته که به ماده‌ی دی‌الکتریک اتلافی برخورد می‌کند. منبع 700MHz است و در سلول شماره‌ی 5 آغاز می‌شود 98

نمودار (4-6): ثابت انتشار در موجبر ARROW مدل‌سازی شده بر حسب طول‌موج 109

نمودار (4-7): ضریب شکست موثر بر حسب طول موج 109

نمودار (4-8): ضریب شکست گروه بر حسب طول موج 109

نمودار (4-9): اتلاف موجبر ARROW مدل سازی شده بر حسب طول موج 110

نمودار (4-10): تغییرات بازتابندگی و تراگسیلندگی برحسب طول موج در ساختار شکل (4-17)، (قطبش نور در راستای x) 111

نمودار (4-11): تغییرات بازتابندگی و تراگسیلندگی برحسب طول موج در ساختار شکل(4-17)، هنگامی که حفره‌های خالی یک درمیان با SiO_2 پر شده باشند. (قطبش نور در راستای x) 111

نمودار (4-12): تغییرات بازتابندگی و تراگسیلندگی برحسب طول موج در ساختار شکل(4-17)، هنگامی که حفرها با SiO_2 پر شده باشند. (قطبش نور در راستای x) 112

نمودار(4-13): تغییرات بازتابندگی و تراگسیلندگی برحسب طول موج فیلتر شکل(4-17) با حضور نقره به ضخامت 0/1μmدر قسمت بالای زیرلایه 112

مقدمه

پیشرفت‌های مخابرات فیبر نوری، سیستم‌های الکترواپتیک و مدارهای مجتمع فوتونیکی روی زیرلایه‌ی نیمه‌هادی باعث کوچک‌سازی، پایداری بالا، تنوع عملکرد، تولید انبوه و کاهش قیمت سیستم‌ها می‌شود. موجبر نوری تک مد روی یک زیرلایه‌ی نیمه‌هادی یکی از اجزای اصلی مدارهای مجتمع فوتونیکی می‌باشد.

موجبرهای نوری بازتابی پادتشدیدی ARROW[1] نوعی از موجبرهای تک مد هستند که روی یک زیرلایه‌ی نیمه‌هادی قرار می‌گیرند. ایده‌ی اولیه‌ی این نوع موجبرها اولین بار در سال 1986 توسط M. A. Duguay و همکارانش مطرح گردید [1]. این موجبرها به دلیل ویژگی‌های جذابی که دارند توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در خصوص ویژگی‌های آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: (1) انتشار موثر تک مدی؛ (2) اتلاف کم؛ (3) محبوس‌کنندگی بزرگ نور؛ (4) عملکرد بر اساس مشخصه‌های انتخاب طول موج و قطبش؛ (5) اندازه‌ی به نسبت بزرگ هسته مناسب برای اتصال موثر با فیبرهای تک مد؛ (6) فرآیند ساخت آسان به علت روکش نازک بین هسته و زیرلایه؛ (7) حد مجاز بزرگ برای ضرایب شکست و ضخامت‌های لایه‌ها در روکش تداخلی؛ (8) طراحی آسان به دلیل بیان ساده برای ثابت انتشار و اتلاف؛ (9) انتخاب متنوع مواد موجبر [2]. بنابراین این نوع موجبرها به طور یکپارچه با اجزای الکترونیکی می‌توانند مجتمع شوند، لذا گزینه‌ی مطلوبی برای طراحی مدارات اپتیک مجتمع می‌باشند.

موجبرهای ARROW و ARROW-B شامل هسته و جفت لایه‌ی روکش تداخلی می‌باشند که این روکش بین هسته و زیرلایه‌ی نیمه‌هادی محدود می‌شود و شامل یک و یا چند جفت لایه است. موجبرهای ARROW و ARROW-B را که موجبرهای ARROW-Type می‌نامیم، دارای ساختار به طور کامل مشابه ولی شکل ضریب شکست متفاوت هستند.

[1] *Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide*

از موجبرهای ARROW-Type در شبکه‌های مخابرات نوری، فیلترهای گزینش طول موج، جفت‌کننده‌های جهت‌دار، تقسیم‌کننده‌های توان، مدولاتورهای نوری، منابع لیزر نیمه‌هادی، آشکارسازها و حسگرهای نوری استفاده می‌شود [3].

پدیده‌ها و ساختارهای مختلف الکترومغناطیسی با کمک معادلات ماکسول تشریح می‌گردند. این معادلات تغییر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در مکان و زمان را نشان می‌دهند و برای طیف گسترده‌ای از شرایط فیزیکی قابل اعمال بوده و نقش بسیار مهمی در بسیاری مسائل از جمله میکرو و نانو ساخت مدارات مجتمع و سایر ادوات الکترومغناطیسی بازی می‌کنند.

با توجه به پیچیدگی این مسائل، نیاز به استفاده از روش‌های عددی برای تحلیل آن‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. روش تفاضل متناهی در حوزه‌ی زمان (FDTD[1]) رایج‌ترین روش عددی برای حل مسائل الکترومغناطیس است. هر چند که پیدایش این روش به سال‌ها پیش برمی‌گردد، ولی با کاهش روزافزون هزینه‌ی پردازش، رواج این الگوریتم روز به‌روز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بسط و توسعه‌ی این روش و اضافه شدن قابلیت‌های جدید به آن منجر به گسترده‌تر شدن کاربردهای آن شده است [4].

روش FDTD به آن شکلی که برای اولین بار توسط Kane Yee در سال 1966 پیشنهاد شد [5]، روشی ساده و در عین حال کارآمد برای گسسته‌سازی شکل دیفرانسیلی معادلات ماکسول است. ایشان با استفاده از یک شبکه‌ی میدان الکتریکی و یک شبکه‌ی میدان مغناطیسی که از نظر زمانی و مکانی دارای مقداری جابجایی[2] نسبت به هم بودند، مولفه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی نقاط موجود در دامنه‌ی محاسباتی را برحسب اندازه‌ی این مولفه‌ها در گام زمانی قبل محاسبه نمود. این الگوریتم با وجود سادگی و مفید بودن، به دلیل نیاز به توان پردازشی زیاد، در ابتدا چندان مورد توجه قرار نگرفت. از دیگر نقاط ضعف این الگوریتم در ابتدای انتشار آن، عدم توانایی در مدل‌سازی مسائل باز[3] بود. لیکن به تدریج با رفع نقایص الگوریتم FDTD و افزایش توان پردازشی کامپیوترها، علاقه و توجه به این الگوریتم فزونی گرفت.

جهت تشریح خصوصیات مدل عددی بسط داده شده برای حل میدان، در محیط برنامه‌نویسی می‌توان الگوریتم‌های مختلف و مورد نیاز برنامه را نوشت.

---

[1] *Finite Difference Time Domain (FDTD)*
[2] *Offset*
[3] *Open Problems*

ساختار پایان‌نامه

در فصل اول ما موجبرها را بر اساس هندسه‌ی ساختار دسته‌بندی می‌کنیم و موجبر مسطح، موجبر کانالی و فیبر نوری را مورد بررسی قرار می‌دهیم. سپس مهم‌ترین موجبرهایی را برمی‌شماریم که با توجه به این سه نوع کلی هندسه‌ی ساختار موجبرها ساخته می‌شوند.

در فصل دوم ابتدا به بیان مفاهیم اساسی و معادلات نظریه‌ی موج الکترومغناطیسی برای درک انتشار امواج نور در موجبرهای نوری می‌پردازیم. سپس با در نظر گرفتن موجبر تیغه‌ای، به طور کیفی محبوس‌شدگی نور و تشکیل مدها در موجبر توضیح داده می‌شوند. همچنین معادلات ماکسول و شرایط مرزی نیز توصیف می‌گردند. سپس چند روش تحلیلی جهت تشریح موجبرهای مستطیلی سه بعدی ارائه می‌گردد. همچنین با استفاده ار نظریه‌ی جفت‌شدگی، به بررسی برهم‌کنش‌های متقابل موج نوری بین دو مد انتشاری می‌پردازیم.

در فصل سوم ابتدا به طور خلاصه مفهوم تفاضل متناهی (FD [1]) را بررسی می‌نماییم. سپس به معرفی روش تفاضل متناهی در حوزه‌ی زمان و شبکه‌بندی و المان‌سازی میدان و نیز معادلات پایه‌ای در الگوریتم FDTD می‌پردازیم. در این راستا ابعاد شبکه و گام زمانی را تعیین می‌کنیم. همچنین شرایط مزری را در محیط شبیه‌سازی بیان می‌نماییم.

در فصل چهارم به بررسی نحوه‌ی انتشار و هدایت نور و محبوس‌شدگی مدهای پادتشدیدی در موجبرهای نوری بازتابی پادتشدیدی و همچنین ساختار و ترکیبات مواد آن‌ها می‌پردازیم. در این راستا ضخامت لایه‌ها، ثابت‌های انتشار و اتلاف تابشی هر مد محاسبه می‌گردند. سپس ساختاری از موجبر ARROW شیاردار جهت کاربردهای حسگری ارائه می‌نماییم و مشخصه‌های نوری آن را با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه‌ی زمان (FDTD) مورد ارزیابی قرار می‌دهیم و به شبیه‌سازی آن می‌پردازیم. علاوه بر این، یک فیلتر نوری را با استفاده از روش FDTD مشخصه‌یابی می‌کنیم.

در پایان، به جمع‌بندی و آینده‌ی کار پرداخته می‌شود.

[1] *Finite Difference*