



# دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش معماری کامپیوتر

عنوان

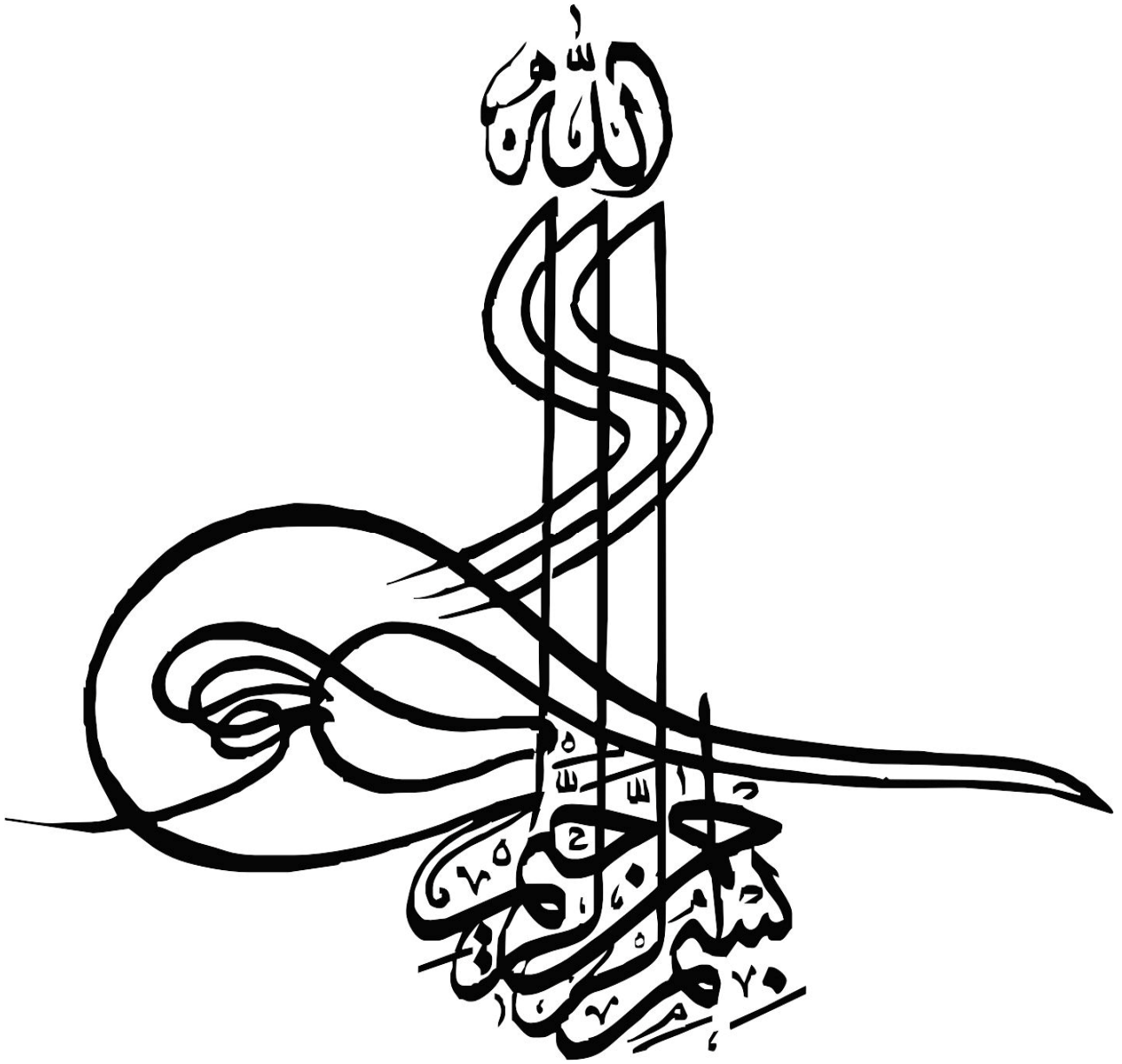
ارائه معماری با قابلیت باز پیکربندی بر روی شبکه نوری روی تراشه

نگارش  
هاجر فلاحتی

استاد راهنما  
دکتر شاهین حسابی

شهریور ۱۳۹۰





به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی شان  
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است  
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرکردانی و ترس در پناہشان به شجاعت می گراید  
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به

پدر

و

مادر عزیزم

تقدیم می کنم.

در آغاز لازم می‌دانم از زحمات پدر و مادر گرامی ام و کلیه کسانی که در دوران تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند، کمال تشکر را بنمایم.

هم‌چنین از زحمات اساتید محترم و به‌خصوص استاد ارجمند

جناب آقای مهندس سببا

که بارها همتی‌های خود را هکشتای اینجانب بوده‌اند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

## چکیده

با توجه به محدود بودن توان مصرفی بر روی تراشه و برای دستیابی همزمان به کارایی بالا و توان مصرفی کم، معماری های چند پردازنده ای ارائه شده اند. بخش عمده ای از توان مصرفی در این معماری ها به اتصالات روی تراشه تعلق دارد. کاهش توان مصرفی با حفظ کارایی بالا در این معماری ها یکی از مسایل مورد توجه می باشد. قابلیت اتصالات نوری برای کاهش توان مصرفی و افزایش کارایی، معماری جدیدی با عنوان شبکه های نوری روی تراشه پیشنهاد می کند که قادر است از مزایای سیگنال ها و المان های نوری برای انتقال اطلاعات استفاده کند.

در این پایان نامه یک معماری جدید با قابلیت بازپیکربندی برای شبکه ی نوری روی تراشه ارائه می شود. هدف از ارائه ی این معماری بررسی قابلیت بهبود پارامترهای یک شبکه ی نوری با توجه به ویژگی های ترافیک توزیع شده در سطح تراشه می باشد. در این راستا لازم است با توجه به ترافیک شبکه، همبندی شبکه تغییر نماید و لینک ها و مسیر یاب های مناسب انتخاب شود. برای ارزیابی طرح پیشنهادی، ابتدا یک شبیه ساز شبکه ی نوری روی تراشه با توجه به ساختار پیشنهادی در سطح رفتاری پیاده سازی کرده و سپس آن را از نظر توان مصرفی و تأخیر با یک شبکه ی الکتریکی و یک شبکه ی نوری روی تراشه فاقد قابلیت بازپیکربندی مقایسه می کنیم.

## کلمات کلیدی

انتقال نوری، شبکه های روی تراشه، بازپیکربندی.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول - مقدمه
5	فصل دوم - فناوری نوری سیلیکونی
5	1-2- عناصر پایه برای انتقال نور در سطح تراشه
9	2-2- شبکه‌های نوری روی تراشه
9	1-2-2- مسیریاب $\lambda$
11	2-2-2- معماری Columbia
12	3-2-2- معماری CONoC
13	4-2-2- معماری FONoC
14	5-2-2- سویچ ماتریسی $5 \times 5$
15	6-2-2- معماری Oblivious
16	7-2-2- معماری Corona
17	8-2-2- معماری FireFly-Pan
17	9-2-2- معماری PROPEL
18	10-2-2- معماری 2D-MM
19	فصل سوم - قابلیت بازپیکربندی
19	1-3- دستیابی به قابلیت بازپیکربندی
19	1-1-3- همبندی فراگیر
19	2-1-3- افزودن مسیر
20	2-3- قابلیت بازپیکربندی در شبکه‌های الکتریکی
21	1-2-3- افزودن مسیر

21	2-2-3- بازپیکربندی با استفاده از گذرگاه
22	3-3- قابلیت بازپیکربندی در شبکه‌های نوری
23	1-3-3- همبندی فراگیر- معماری RePNoC
23	2-3-3- افزودن مسیر- قابلیت بازپیکربندی در شبکه‌های چندپردازنده ای
25	<b>فصل چهارم - معماری پیشنهادی</b>
26	1-4- معماری شبکه نوری روی تراشه پیشنهادی
26	1-1-4- همبندی
29	2-1-4- گذر بین همبندی‌ها
30	3-1-4- طراحی مسیریاب نوری
30	1-3-1-4- تخصیص طول موج
32	2-3-1-4- الگوریتم مسیریابی
33	3-3-1-4- مسیریاب نوری
35	1-3-3-1-4- ریزحلقه‌های تشدیدگر
39	2-3-3-1-4- مسیریاب پیشنهادی
39	3-3-3-1-4- بخش تزریق/دفع
39	4-3-3-1-4- بخش مسیریابی
48	2-4- معماری شبکه کنترلی
48	1-2-4- واحد کنترل
49	2-2-4- پیاده‌سازی Crossbar نوری مقیاس پذیر
51	3-2-4- بسته واریسی مقصد
54	4-2-4- تخصیص طول موج به واحدهای کنترل
53	3-4- ارسال داده

58	4-4- ویژگی‌های معماری پیشنهادی
62	فصل پنجم - نتایج شبیه‌سازی
63	1-5- محیط شبیه‌سازی
64	1-1-5- نحوه تولید ترافیک
66	2-5- روش محاسبه تأخیر در شبکه
68	3-5- روش محاسبه توان در شبکه
72	4-5- تحلیل نتایج شبیه‌سازی
73	1-4-5- همبندی توری دوبعدی
73	1-1-4-5- تحلیل تأخیر
79	2-1-4-5- تحلیل توان
85	3-1-4-5- تحلیل انرژی
87	2-4-5- همبندی پروانه
88	1-2-4-5- تحلیل تأخیر
93	2-2-4-5- تحلیل توان
98	3-2-4-5- تحلیل انرژی
101	فصل ششم - نتیجه‌گیری و کارهای آتی
104	فصل هفتم - فهرست منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل 2-1- عناصر اصلی در انتقال نوری روی تراشه ..... 6
- شکل 2-2- عناصر نوری مسیریابی: ریزحلقه تشدیدگر، در حالت متقاطع ..... 7
- شکل 2-2- عناصر نوری مسیریابی: ریزحلقه تشدیدگر، در حالت موازی ..... 7
- شکل 2-2- عناصر نوری مسیریابی: ریزحلقه تشدیدگر، فیلتر نوری اضافه/کم ..... 7
- شکل 2-3- مسیریاب  $\lambda$  ..... 10
- شکل 2-4- الف- سویچ ماتریسی  $5 \times 5$  [Poon\_09]، ساختار اولیه ..... 15
- شکل 2-4- ب- سویچ ماتریسی  $5 \times 5$  [Poon\_09]، ساختار اصلاح شده ..... 15
- شکل 2-5- مسیریاب طول موج [Kirman\_10] ..... 16
- شکل 3-1- افزودن لینک به یک ساختار مبتنی بر مش ..... 21
- شکل 2-3- معماری FLEX BUS ..... 22
- شکل 3-3- معماری  $4 \times 4$  Rmesh ..... 22
- شکل 3-4- معماری RePNoC ..... 24
- شکل 3-5- معماری با قابلیت بازپیکربندی با افزودن لینک ..... 24
- شکل 4-1- معماری با قابلیت بازپیکربندی با افزودن لینک ..... 27
- شکل 2-4- الف- همبندی ReTMesh، نگاشت همبندی توری ..... 27
- شکل 2-4- ب- همبندی ReTMesh، نگاشت همبندی پروانه ..... 27
- شکل 3-4- همبندی مش دو-بعدی اصلاح شده [Shafaei\_10]، جانمایی  $(4 \times 4 \text{ 2D-MM})$  ..... 28
- شکل 4-4- همبندی پروانه، [Parhami\_99] ..... 28
- شکل 4-5- نحوه پوشش گره‌های شبکه توسط کانال‌های تزریق ..... 32
- شکل 4-6- الف- مسیرهای موجود در همبندی توری - بدون چرخش ..... 36
- شکل 4-6- ب- مسیرهای موجود در همبندی توری - دارای چرخش ..... 36
- شکل 4-6- ج- مسیرهای موجود در همبندی پروانه - بدون چرخش ..... 36
- شکل 4-6- د- مسیرهای موجود در همبندی پروانه با الگوریتم مسیریابی اولین جد مشترک- دارای چرخش ..... 36
- شکل 4-6- ه- مسیرهای موجود در همبندی پروانه با الگوریتم ترتیب بعد- دارای چرخش ..... 36
- شکل 4-7- حالت‌های مختلف مسیریابی و دفع بسته در معماری پیشنهادی ..... 38
- شکل 4-8- دو مسیریاب پیشنهادی اولیه بر اساس امکان اتصال کلیه گره‌ها ..... 40
- شکل 4-9- مسیریاب نوری پیشنهادی ..... 41
- شکل 4-10- الف- مسیریاب نوری به کاررفته در  $2\text{D-MM}$  [Shafaei\_10] بخش تزریق/دفع ..... 43
- شکل 4-10- ب- مسیریاب نوری به کاررفته در  $2\text{D-MM}$  [Shafaei\_10] بخش مسیریابی ..... 43

- شکل 4-11- مسیر یاب نوری برای شبکه نوری مبتنی بر هم‌بندی پروانه ..... 43
- شکل 4-12- معماری شبکه کنترلی ..... 51
- شکل 4-13- ارسال داده در وضعیت آزاد ..... 54
- شکل 4-14- الف- نحوه برخورد با وضعیت مشغول در روش ارسال مجدد ..... 56
- شکل 4-14- ب- نحوه برخورد با وضعیت مشغول در روش ذخیره موقت ..... 56
- شکل 4-15- ساختار حافظه میانگیر در هر گره ..... 57
- شکل 5-1- الف- متوسط تأخیر کل (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین ..... 74
- شکل 5-1- ب- متوسط تأخیر کل (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط ..... 74
- شکل 5-1- ج- متوسط تأخیر کل (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک ..... 74
- شکل 5-2- الف- متوسط تأخیر تک‌پخشی (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین ..... 75
- شکل 5-2- ب- متوسط تأخیر تک‌پخشی (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط ..... 75
- شکل 5-2- ج- متوسط تأخیر تک‌پخشی (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک ..... 75
- شکل 5-3- الف- متوسط تأخیر چندپخشی (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین ..... 76
- شکل 5-3- ب- متوسط تأخیر چندپخشی (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط ..... 76
- شکل 5-3- ج- متوسط تأخیر چندپخشی (پیکو ثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک ..... 76
- شکل 5-4- الف- تسریع شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری در ارسال تک‌پخشی ..... 77
- شکل 5-4- ب- تسریع شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری در ارسال چندپخشی ..... 77
- شکل 5-4- ج- تسریع شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری در ارسال کلی ..... 77
- شکل 5-5- الف- میزان افزایش تأخیر شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی بر هم‌بندی توری در ارسال تک‌پخشی ..... 78

شکل 5-5-ب- میزان افزایش تاخیر شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی برهم‌بندی توری در ارسال چندپخشی ..... 78

شکل 5-5-ج- میزان افزایش تاخیر شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ارسال کلی ..... 78

شکل 5-6-الف- متوسط توان مصرفی کل (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین ..... 80

شکل 5-6-ب- متوسط توان مصرفی کل (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط ..... 80

شکل 5-6-ج- متوسط توان مصرفی کل (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک ..... 80

شکل 5-7-الف- متوسط توان مصرفی تک‌پخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین ..... 81

شکل 5-7-ب- متوسط توان مصرفی تک‌پخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط ..... 81

شکل 5-7-ج- متوسط توان مصرفی تک‌پخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک ..... 81

شکل 5-8-الف- متوسط توان مصرفی چندپخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین ..... 82

شکل 5-8-ب- متوسط توان مصرفی چندپخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط ..... 82

شکل 5-8-ج- متوسط توان مصرفی چندپخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک ..... 82

شکل 5-9-الف- میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین ..... 83

شکل 5-9-ب- میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط ..... 83

شکل 5-9-ج- میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک ..... 83

شکل 5-10-الف- میزان افزایش توان شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی برهم‌بندی توری در ارسال تک‌پخشی ..... 84

شکل 5-10-ب- میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ارسال چندپخشی ..... 84

- شکل 5-10- ج- میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ارسال کلی..... 84
- شکل 5-11- الف- میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین..... 86
- شکل 5-11- ب- میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط..... 86
- شکل 5-11- ج- میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک..... 86
- شکل 5-12- الف- میزان کاهش انرژی شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سنگین..... 87
- شکل 5-12- ب- میزان کاهش انرژی شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک متوسط..... 87
- شکل 5-12- ج- میزان کاهش انرژی شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، مبتنی برهم‌بندی توری دوبعدی در ترافیک سبک..... 87
- شکل 5-13- الف- متوسط تأخیر کل (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک سنگین..... 89
- شکل 5-13- ب- متوسط تأخیر کل (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک متوسط..... 89
- شکل 5-13- ج- متوسط تأخیر کل (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک سبک..... 89
- شکل 5-14- الف- متوسط تأخیر تک‌پخشی (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک سنگین..... 90
- شکل 5-14- ب- متوسط تأخیر تک‌پخشی (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه ب در ترافیک متوسط..... 90
- شکل 5-14- ج- متوسط تأخیر تک‌پخشی (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک سبک..... 90
- شکل 5-15- الف- متوسط تأخیر چندپخشی (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک سنگین..... 91
- شکل 5-15- ب- متوسط تأخیر چندپخشی (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک متوسط..... 91
- شکل 5-15- ج- متوسط تأخیر چندپخشی (پیکوثانیه) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه در ترافیک سبک..... 91

شکل 5-16- تسريع شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه شبکه روی تراشه الکتريکی، هر دو مبتنی برهم‌بندی پروانه ..... 92

شکل 5-17- میزان افزایش تاخیر شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی برهم‌بندی پروانه ..... 93

شکل 5-18- الف- متوسط توان مصرفی کل (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک سنگین..... 95

شکل 5-18- ب- متوسط توان مصرفی کل (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک متوسط..... 95

شکل 5-18- ج- متوسط توان مصرفی کل (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک سبک..... 95

شکل 5-19- الف- متوسط توان مصرفی تک‌پخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک سنگین ..... 96

شکل 5-19- ب- متوسط توان مصرفی تک‌پخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک متوسط ..... 96

شکل 5-19- ج- متوسط توان مصرفی تک‌پخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک سبک..... 96

شکل 5-20- الف- متوسط توان مصرفی چندپخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک سنگین ..... 97

شکل 5-20- ب- متوسط توان مصرفی چندپخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک متوسط ..... 97

شکل 5-20- ج- متوسط توان مصرفی چندپخشی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ترافیک سبک..... 97

شکل 5-21- الف- میزان کاهش متوسط توان مصرفی (میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ارسال تک‌پخشی..... 98

شکل 5-21- ب- میزان کاهش متوسط توان مصرفی (بر حسب میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ارسال چندپخشی..... 98

شکل 5-21- ج- میزان کاهش متوسط توان مصرفی (بر حسب میلی وات) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه در ارسال کلی..... 98

شکل 5-22- الف- میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه با قابلیت بازپیکربندی در ترافیک سنگین..... 99

شکل 5-22- ب- میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتريکی، مبتنی برهم‌بندی پروانه با قابلیت بازپیکربندی در ترافیک متوسط..... 99

شکل 5-22- ج- میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهمبندی پروانه با قابلیت بازپیکربندی در ترافیک سبک..... 99

شکل 5-23- الف- میزان کاهش انرژی شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، مبتنی برهمبندی پروانه در ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک ..... 100

شکل 5-24- میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی برهمبندی پروانه..... 100

## فهرست جدول‌ها

- جدول 4-1 مقایسه مسیریاب پیشنهادی با مسیریاب نوری دو شبکه نوری توری و پروانه بدون قابلیت بازپیکربندی ..... 42
- جدول 5-1 ترافیک‌های مصنوعی برای تولید بسته‌های تک‌پخشی ..... 64
- جدول 5-2 اجزاء اصلی تأخیر انتقال در شبکه نوری و الکتریکی ..... 65
- جدول 5-3 اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده‌ی توان مصرفی در شبکه نوری و الکتریکی ..... 67

## فصل اول

### مقدمه

پیشرفت فناوری مدارهای مجتمع و کاهش ابعاد ترانزیستورها منجر به افزایش تعداد و سرعت ترانزیستورها روی تراشه شده است. این پدیده باعث برهم خوردن تعادل سرعت بین المانهای پردازشی و واسطهای ارتباطی شده و بر این اساس می‌توان گفت که کاهش ابعاد ترانزیستورها باعث افزایش تأخیر و توان مصرفی اتصالات در سطح تراشه شده است. با توجه به محدود بودن توان مصرفی بر روی تراشه و برای دستیابی همزمان به کارایی بالا و توان مصرفی کم، سیستم‌های روی تراشه چندپردازنده‌ای<sup>1</sup> ارائه شده‌اند. در این سیستم فرکانس کاری هر پردازنده کاهش یافته که در کاهش توان مصرفی نقش مهمی دارد و البته با افزایش تعداد پردازنده‌ها کارایی کل سیستم هم بهبود یافته است. سیستم‌های چندپردازنده‌ای برای دستیابی به کارایی و پهنای باند بالا نیاز به استفاده از یک شیوه انتقال داده مناسب و با کارایی بهینه دارند.

براساس پیش بینی ITRS، مکانیزم‌های ارتباطی موجود برای کارهای آتی گلوگاه محسوب می‌شوند و دیگر مکانیزم‌های ارتباطی امروزی که بیشتر بر اساس گذرگاه<sup>2</sup> هستند قادر به تأمین پهنای باند و تأخیر مورد نیاز نخواهند بود. این عوامل باعث ارائه‌ی ایده‌ی شبکه‌های روی تراشه<sup>3</sup> برای پیاده‌سازی ارتباطات سراسری در سطح تراشه شده است. اتصالات روی سطح تراشه بر اساس طول آنها به سه دسته محلی، سراسری و میانی تقسیم می‌شوند. طول اتصالات میانی مانند المان‌های پردازشی مقیاس‌پذیر با پیشرفت فناوری کاهش می‌یابد ولی طول اتصالات سراسری تقریباً ثابت است. این اتصالات نسبت کمتری در مقایسه با سایر اتصالات دارند ولی نقش آنها در تأخیر و کارایی سیستم به مراتب بیشتر است. از این رو اتصالات سراسری بر روی یک سیستم چند پردازشی با استفاده از یک شبکه میان ارتباطی، شامل

<sup>1</sup>Multi-Processor System-on-Chip (MPSoC)

<sup>2</sup>Bus

<sup>3</sup> Network On Chip

تعدادی مسیریاب که توسط یک سری اتصالات به هم متصل شده‌اند، به هم وصل می‌شوند.

[Hemani\_00]، [Dally\_01]، [Benini\_02]، [Kumar\_05].

هر چند استفاده از شبکه‌های روی تراشه در معماری‌های چندپردازنده‌ای موجب بهبود پهنای باند می‌شود، اما به درستی مشخص نمی‌باشد که چگونه شبکه‌های روی تراشه الکتریکی قادر خواهند بود پهنای باند و تأخیر مورد نیاز در معماری‌های آتی را در محدوده‌ی توان قابل تحمل تراشه تأمین کنند [Shacham\_08]. این مسئله ناشی از محدودیت‌های اتصالات الکتریکی برای انتقال اطلاعات در سطح تراشه می‌باشد ضمن اینکه طراحی این اتصالات با کاهش ابعاد ترانزیستورها پیچیده‌تر شده است. از جمله‌ی مهمترین این محدودیت‌ها می‌توان به محدودیت پهنای باند و تأخیر در سیم‌های الکتریکی، افزایش توان مصرفی متناسب با پهنای باند، نویز هم‌شنوایی<sup>1</sup> و تداخل الکترومغناطیسی (EMI)<sup>2</sup> اشاره کرد. [Bakoglu\_85]، [Goodman\_84]

انتقال اطلاعات به صورت نوری در سطح تراشه برای اولین بار در دهه‌ی 1980 مطرح شد [Soref\_86]. اما با پیشرفت فناوری ساخت ادوات نوری مبتنی بر سیلیکون در ابعاد میکرومتر، امروزه اتصالات نوری به عنوان یک جایگزین مناسب برای اتصالات الکتریکی در سطح تراشه مطرح هستند. استفاده از امواج نوری برای انتقال داده‌ها می‌تواند بسیاری از مشکلات مطرح در اتصالات الکتریکی، مانند پهنای باند، تأخیر و نویز هم‌شنوایی را برطرف کند [Miller\_00]. علاوه بر این موارد وجود دو ویژگی زیر در اتصالات نوری، ایده‌ی شبکه‌های نوری روی تراشه<sup>3</sup> (ONoC) را به عنوان یک راهکار شگرف برای انتقال داده‌ها بین پردازنده‌ها در سطح تراشه مطرح می‌کند.

**شفافیت نرخ بیت<sup>4</sup> در عناصر سویچینگ نوری [Guillemot\_98]:** این ویژگی باعث افزایش پهنای-

باند قابل وصول بر روی یک موج‌بر نوری، به ازای توان محدود، می‌شود. بر خلاف مسیریاب‌های

---

<sup>1</sup> Crosstalk

<sup>2</sup> Electro-Magnetic Interference

<sup>3</sup> Optical Network On Chip

<sup>4</sup> Bit Rate Transparency

مبتنی بر تکنولوژی CMOS که بایستی برای هر بیت از داده‌ی انتقالی سوئیچ کنند، سوئیچ‌های نوری با هر پیام تغییر وضعیت داده و انرژی مصرفی به نرخ بیت بستگی ندارد.

**تلفات انتشار پایین<sup>1</sup> در موج‌برهای نوری<sup>2</sup> [Zhou\_06]:** در مقیاس طولهای مطرح در سطح تراشه، توان اتلاف شده به طول پیموده شده در یک موج‌بر نوری بستگی ندارد. این ویژگی باعث کاهش قابل توجه توان مصرفی در عناصر نوری سیلیکونی می‌شود.

با وجود تمام مزایای اشاره شده برای اتصالات نوری در سطح تراشه، مسائلی مانند معیار هزینه، سربار تبدیل سیگنال‌های الکتریکی به نوری (و بالعکس)، اتلاف توان در انتقال سیگنال نوری تولید شده به درون تراشه و کارایی پایین عناصر سیلیکونی برای تولید سیگنال نوری از مهم‌ترین مشکلات در زمینه‌ی بکارگیری اتصالات نوری مبتنی بر سیلیکون در سطح تراشه می‌باشند. معیار هزینه، مهم‌ترین مانع برای معرفی تراشه‌های تجاری مبتنی بر اتصالات نوری مجتمع شده می‌باشد [Lipson\_05].

با توجه به اهمیت توان مصرفی در شبکه‌های روی تراشه و قابلیت کاهش توان مصرفی توسط اتصالات نوری، ایده‌ی شبکه‌های نوری روی تراشه به عنوان یک راهکار جدید برای انتقال داده‌ها بین پردازنده‌ها در سطح تراشه مطرح شده است. پیاده‌سازی شبکه‌های نوری روی تراشه منجر به کاهش توان مصرفی و تأخیر و افزایش پهنای باند شبکه میان‌ارتباطی خواهد شد. در این پایان نامه در پی طراحی یک شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی می‌باشیم. از آنجا که در اتصالات نوری برخلاف اتصالات الکتریکی، مسافت بین گره‌ها تأثیر منفی بر پارامترهایی چون تأخیر ندارد در این‌جا هدف بازپیکربندی، تغییر هم‌بندی براساس کاربرد، کاهش ازدحام و انتقال سیگنال از مسیر با کمترین تعداد ریزحلقه روشن می‌باشد. در صورتی که بتوان با توجه به نیازهای ترافیکی و کاربرد مورد نظر شبکه را بازپیکربندی کرد، کارایی و قابلیت شبکه روی تراشه افزایش می‌یابد. در این پروژه یک معماری جدید ارائه می‌گردد که قادر به پشتیبانی از هم‌بندی توری مدور و هم‌بندی پروانه می‌باشد. ضمن اینکه ساختار این هم‌بندی به گونه‌ای

---

<sup>1</sup> Propagation loss

<sup>2</sup> Waveguide

است که می‌توان سایر هم‌بندی‌های درختی را هم با آن پیاده‌سازی کرد و علاوه بر آن امکان داشتن همزمان چند هم‌بندی پروانه را فراهم می‌آورد.

معماری ارائه شده قادر به پشتیبانی از ارتباطات چندپخشی که در آن یک پیام مشترک از طرف یک گره مبدأ به سوی تعداد دلخواهی گره مقصد ارسال می‌شود، می‌باشد. این ارتباط کاربرد فراوانی در برنامه‌های پیاده‌سازی شده بر روی سیستم‌های چندپردازنده‌ای دارد. به عنوان نمونه، سد همگام‌سازی<sup>1</sup> [Xu\_92]، تکثیر داده<sup>2</sup> [McKinley\_92] و پروتکل‌های همسان‌سازی حافظه نهان<sup>3</sup> [Malumbres\_96] دارد.

با توجه به اینکه حذف پردازش الکتریکی در مسیریاب‌ها و شبکه الکتریکی برای انتقال بسته‌های کنترلی تأثیر به‌سزایی در کاهش توان مصرفی در تراشه دارد، در طراحی مسیریاب‌های نوری از عناصر سویچینگ نوری غیر فعال استفاده شده است. به این ترتیب بسته‌های نوری به صورت نوری و بدون نیاز به پردازش الکتریکی، مسیریابی می‌شوند. بسته‌های کنترلی نیز مانند بسته‌های داده از طریق اتصالات نوری و بدون نیاز به شبکه الکتریکی در سطح تراشه جابه‌جا می‌گردند.

در ادامه ابتدا برخی اطلاعات اولیه در زمینه فناوری نوری، المان‌های اولیه و تکنیک‌های مورد استفاده به همراه تعدادی از شبکه‌های نوری روی تراشه که تاکنون ارائه شده‌اند، در فصل 2 بیان می‌شود. فصل 3 به بررسی روش‌های پیاده‌سازی قابلیت بازپیکربندی در شبکه‌های الکتریکی و نوری اختصاص دارد. معماری پیشنهادی برای افزودن قابلیت بازپیکربندی در یک شبکه نوری روی تراشه در فصل 4 بیان شده است. روش شبیه‌سازی طرح و نتایج به دست آمده، در فصل 5 ذکر می‌گردد و معماری پیشنهادی از نظر تأخیر و توان مصرفی با بهترین شبکه روی تراشه الکتریکی و شبکه‌های نوری براساس همبندی مش و پروانه بدون قابلیت بازپیکربندی مقایسه می‌شود. در انتها نیز در فصل 6، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پایان‌نامه ارائه می‌شود.

---

<sup>1</sup> Barrier synchronization

<sup>2</sup> Data replication

<sup>3</sup> Cache coherency protocols

## فصل دوم

### فناوری نوری سیلیکونی

برای طراحی یک سیستم نوری نیاز به آشنایی با مفاهیم پایه این فناوری داریم، در این فصل به بیان اطلاعات اولیه در زمینه فناوری نوری و المان‌های به کار رفته در آن می‌پردازیم و پس از آن برای آشنایی بیشتر به بیان چند معماری در این زمینه می‌پردازیم.

#### 2-1- عناصر پایه برای انتقال نور در سطح تراشه

از آنجا که شبکه‌ی نوری روی تراشه به صورت یک لایه‌ی اضافی از المان‌های نوری و نوری-الکتریکی روی سطح سیلیکون ساخته می‌شود، نیاز به طراحی المان‌های نوری با توان مصرفی و تأخیر کم و ابعاد فیزیکی کوچک احساس می‌شود. علاوه بر این، ساختار فیزیکی این عناصر باید با فرآیند ساخت CMOS تطبیق‌پذیر باشد. منابع نور، موج‌برهای نوری، مدولاتورها و آشکارسازهای نوری از جمله المان‌های اصلی در این تکنولوژی به شمار می‌روند که در شکل نحوه‌ی ارتباط این المان‌ها نشان داده شده است (شکل 2-1). با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی ساخت ادوات نوری سیلیکونی، همچنان امکان مجتمع‌سازی منابع نوری با کارایی بالا و مساحت کم به صورت انطباق‌پذیر با فناوری CMOS وجود ندارد. به همین جهت از منابع نوری خارج از تراشه استفاده می‌شود. استفاده از منابع نوری خارج از تراشه، همچنین سبب کاهش توان مصرفی و مساحت تراشه می‌گردد (به دلیل حذف منبع نوری درون تراشه).

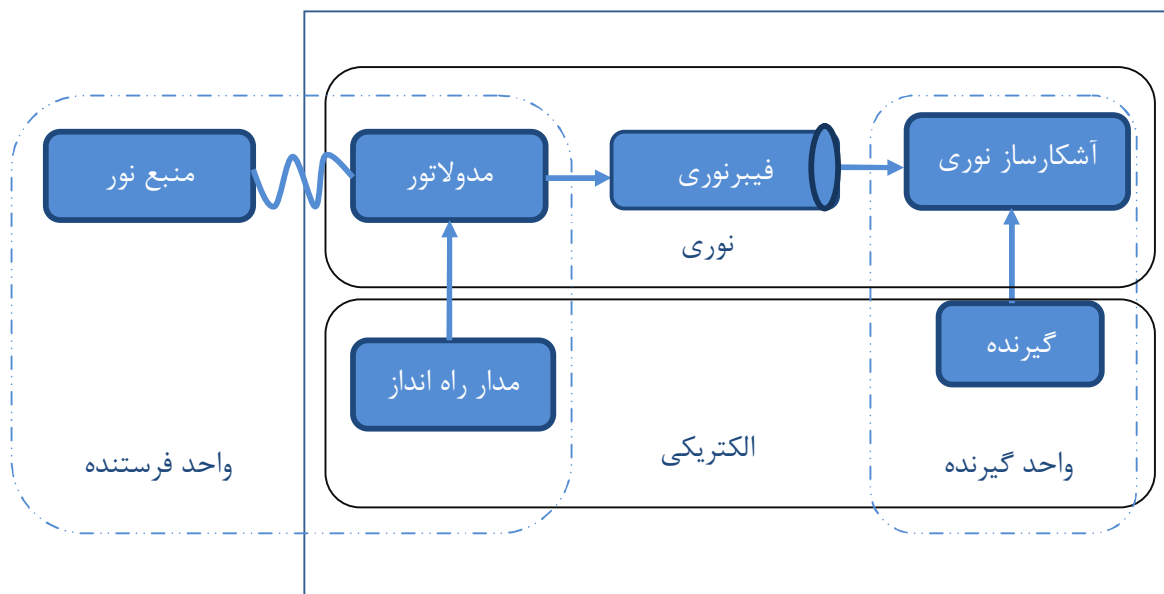
سیگنال‌های نوری تولید شده توسط منبع لیزر با استفاده از فیبرهای نوری به داخل تراشه انتقال و در اختیار مدولاتور قرار داده می‌شود. مدولاتور با استفاده از امواج نوری دریافتی از لیزر، اطلاعات الکتریکی دریافتی از مدار راه‌انداز<sup>1</sup> را به امواج نوری مدوله شده تبدیل می‌کند. برای انتقال امواج تولید

---

<sup>1</sup> Driver

شده در مدولاتور از موجبر استفاده می شود. در طرف گیرنده یک آشکارساز نوری برای تبدیل سیگنال نوری به سیگنال الکتریکی وجود دارد.

در تکنولوژی نوری امکان ارسال چندین سیگنال با طول موجهای مختلف به صورت همزمان وجود دارد که به عنوان تکنیک <sup>1</sup>WDM (ارسال همزمان چند سیگنال نوری روی طول موجهای مختلف در یک موجبر) شناخته می شود استفاده از این تکنیک در افزایش کارایی ارتباطات نوری امری اجتناب-ناپذیر است. در این حالت در قسمت آشکارساز یک فیلتر حساس به طول موج <sup>2</sup>، برای تفکیک سیگنال بر اساس طول موج قرار داده می شود.



شکل 2-1: عناصر اصلی در انتقال نوری روی تراشه

مسیریابی بسته های نوری درون تراشه مستلزم مجتمع سازی عناصر سویچینگ نوری است. سویچینگ سیگنال نوری با استفاده از ریزحلقه های <sup>3</sup> تشدیدگر <sup>4</sup> امکان پذیر می شود. ریزحلقه تشدیدگر یک موجبر انحنایافته است که دارای یک طول موج تشدید می باشد. در ساده ترین حالت، یک موجبر

<sup>1</sup> Wavelength Division Multiplexing

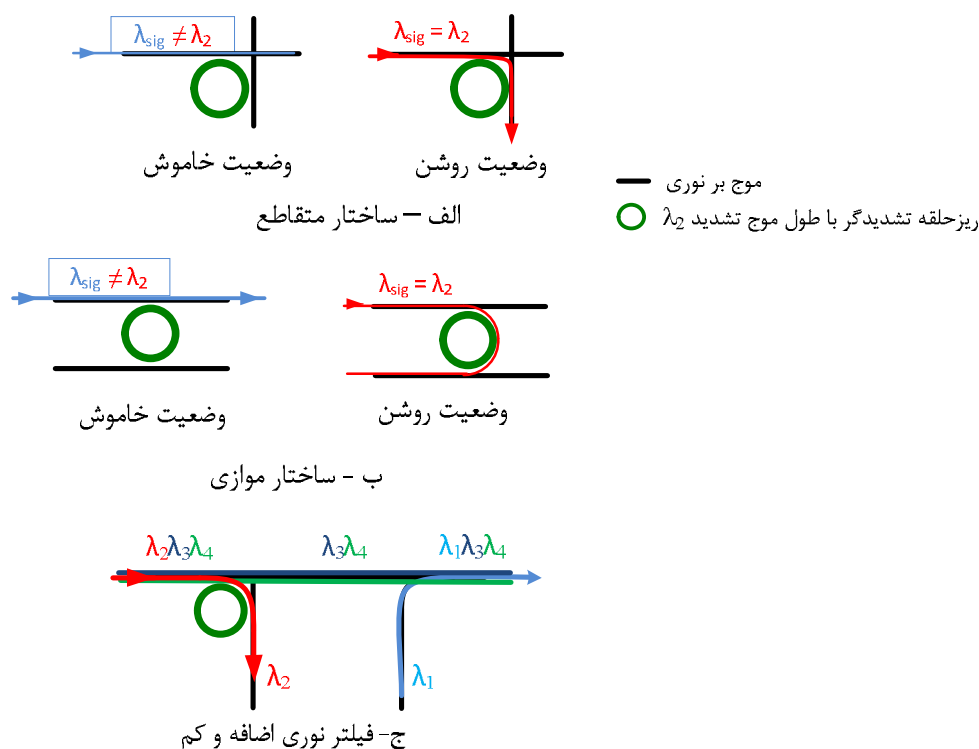
<sup>2</sup> Wavelength selective filter

<sup>3</sup> Microring

<sup>4</sup> Resonator

نوری با یک ریزحلقه جفت<sup>1</sup> می‌شود. وقتی طول موج سیگنال عبوری از موج‌بر با طول موج تشدید ریزحلقه هم‌پوشانی داشته باشد، سیگنال از روی موج‌بر برداشته شده به ریزحلقه منتقل می‌شود (وضعیت روشن). اما اگر طول موجها متفاوت باشند، سیگنال نوری به مسیر خود بر روی موج‌بر ادامه می‌دهد (وضعیت خاموش).

عنصر سویچینگ پایه یک سویچ 1x2 مبتنی بر ریزحلقه تشدیدگر است که در طراحی مسیریاب‌های نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو ساختار متفاوت برای ساخت عنصر سویچینگ پایه موجود است: ساختار متقاطع و ساختار موازی. هر دو ساختار از یک ریزحلقه و دو موج‌بر نوری تشکیل می‌شوند. تفاوت آنها در موقعیت موج‌برها نسبت به یکدیگر است. شکل‌های (2-2-الف) و (2-2-ب)، به ترتیب ساختار متقاطع و موازی را در هر دو حالت روشن و خاموش نشان می‌دهد.



شکل 2-2: عناصر نوری مسیریابی: ریزحلقه تشدیدگر (الف) متقاطع، (ب) موازی، و (ج) فیلتر نوری اضافه/کم

<sup>1</sup> Couple

فیلترهای نوری اضافه/کم (OAD)<sup>1</sup> با استفاده از ریزحلقه‌های تشدیدگر، یکی دیگر از عناصر مورد استفاده در طراحی مسیریاب‌های نوری می‌باشد [Koonath\_05]. این فیلترها قادرند کانال‌های نوری را به یک جریان داده‌ی نوری اضافه یا طول‌موج‌های نوری را از یک جریان داده‌ی نوری کم کنند. شکل (2-2-ج) یک OAD را نشان می‌دهد که طول موج  $\lambda_2$  را از جریان داده‌ی نوری کم و طول موج  $\lambda_1$  را به آن اضافه می‌کند.

عناصر نوری مبتنی بر ریزحلقه تشدیدگر در یکی از دو حالت زیر می‌توانند به کار گرفته شوند:

1. حالت فعال<sup>2</sup>: در حالت فعال، امکان تغییر طول موج تشدید و در نتیجه تغییر وضعیت خاموش یا روشن ریزحلقه در زمان عملکرد شبکه وجود دارد. فرستنده قبل از ارسال سیگنال نوری، باید با توجه به مسیر گره مقصد وضعیت سویچ‌های میانی را به گونه‌ای مناسب تغییر دهد.

2. حالت غیر فعال<sup>3</sup>: در حالت غیر فعال، طول موج تشدید ریزحلقه در زمان ساخت تعیین و پس از آن ثابت می‌ماند. در این حالت ریزحلقه به یک طول موج (یا مجموعه‌ای از طول موج‌های متوالی) حساس خواهد بود و امکان تغییر طول موج تشدید در زمان عملکرد شبکه وجود ندارد. با توجه به اینکه در این حالت کنترل سویچ تنها از طریق طول موج سیگنال عبوری فراهم می‌شود، فرستنده باید سیگنال نوری را با طول موجی ارسال کند که مسیر مبدأ-مقصد به درستی پیموده شود.

همانطور که بیان شد امکان تغییر طول موج تشدید وجود دارد. در ادامه چگونگی تغییر طول موج تشدید ریزحلقه را بیان می‌کنیم. تغییر طول موج تشدید ریزحلقه از طریق تغییر ضریب شکست آن حاصل می‌شود. برای تغییر ضریب شکست نیز بایستی غلظت بار الکترون‌ها و حفره‌ها در سیلیکون تغییر کند. برای تغییر غلظت بار الکترون‌ها و حفره‌ها در سیلیکون یک راه حل، اعمال میدان الکتریکی برای

---

<sup>1</sup>Optical Add/Drop

<sup>2</sup> Active Mode

<sup>3</sup> Passive Mode

تزریق یا تخلیه حامل در سیلیکون می‌باشد. استفاده از اثر پلاسما-پراکندگی حامل آزاد<sup>1</sup> [Soref\_87] مؤثرترین روش برای تغییر ضریب شکست سیلیکون در سرعت‌های بالا می‌باشد. در این روش با تغییر غلظت بار الکترون‌ها و حفره‌ها، ضریب شکست سیلیکون تغییر می‌کند. اما در صورت استفاده از ریزحلقه‌ها به صورت غیر فعال، دیگر نیازی به یک مدار الکتریکی برای اعمال ولتاژ نمی‌باشد. بنابراین توان مصرف شده در ریزحلقه، در حالت غیر فعال کمتر از حالت فعال خواهد بود.

## 2-2- شبکه‌های نوری روی تراشه

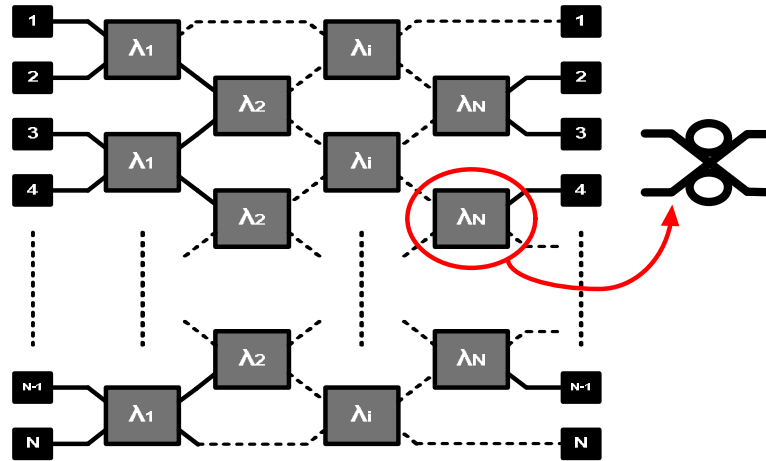
برای اتصال پردازنده‌های یک تراشه با استفاده از اتصالات نوری معماری‌های مختلفی ارائه شده است [Kirman\_06]، [Briere\_07]، [Shacham\_08]، [Vantrease\_08]، [Koochi\_09]. در ادامه‌ی این بخش به معرفی تعدادی از شبکه‌های نوری روی تراشه خواهیم پرداخت. شبکه‌های نوری را بر اساس نحوه مسیریابی می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. شبکه‌هایی که مسیریابی براساس طول موج انجام شده و به رزرو مسیر نیازی نیست، شبکه‌هایی که مسیریابی در آنها نیاز به فاز رزرو دارد. برای مسیریابی بر اساس طول موج دو حالت را می‌توان در نظر گرفت. در حالت اول به مسیر موجود بین دو گره یک طول موج تخصیص می‌دهیم که به عنوان مسیریابی  $\lambda$  شناخته می‌شود و در حالت دیگر به هر گره یک طول موج تخصیص می‌دهیم که آن طول موج نقش آدرس آن گره را بازی می‌کند. در این پروژه از حالت دوم برای مسیریابی استفاده شده است.

### 2-2-1- مسیریاب $\lambda$

این معماری توسط Briere et al. [Briere\_07] ارائه شده است. هر هسته پردازشی یک فرستنده و یک گیرنده دارد که شبکه ارتباطی بین آنها یک ساختار مسیریابی نوری مجتمع به نام مسیریاب  $\lambda$  می‌باشد. مسیریاب  $\lambda$ ، یک شبکه میان‌ارتباطی چندطبقه، متشکل از عناصر نوری غیرفعال است. این شبکه ارتباطی با استفاده از مجموعه‌ای از سویچ‌های نوری چهار درگاه (شامل دو درگاه

<sup>1</sup> Free Carrier Plasma-Dispersion Effect

ورودی و دو دوگانه خروجی) پیاده‌سازی شده است. سویچ‌های نوری بر اساس فیلترهای نوری اضافه/کم طراحی شده‌اند. این مسیریاب در شکل 2-3 نشان داده شده است.



شکل 2-3: مسیریاب  $\lambda$ ، [Briere\_07]

در مسیریاب  $\lambda$ ، هر گره (هسته پردازشی) یک مسیر فیزیکی متفاوت نسبت به گره‌های دیگر دارد و برای ایجاد تمایز بین مسیرها، به هر مسیر فیزیکی یک طول موج مشخص تخصیص می‌دهد. در این روش تعداد طول موج‌های مورد نیاز در شبکه برابر با تعداد گره‌های شبکه است. به این ترتیب گره فرستنده برای ارسال داده به یک گره خاص، باید سیگنال نوری را با طول موجی ارسال کند تا سیگنال مسیر فیزیکی منتهی به گره مقصد را سپری کند. به بیان دیگر گره فرستنده آدرس گره مقصد را توسط طول موج سیگنال نوری تعیین می‌کند. در این نوع مسیریابی، آدرس مقصد به جای آن که در سرآیند<sup>1</sup> بسته تعیین شود، توسط طول موج سیگنال نوری مشخص می‌گردد و مسیریابی طول موج نامیده می‌شود. در این معماری، اگر یک هسته پردازشی داده‌ای را بر روی طول موج‌های مختلف ارسال کند (تکنیک WDM)، ارتباط چندبخشی به راحتی انجام‌پذیر است.

مسیریاب  $\lambda$ ، با ترکیب مسیریابی طول موج و تکنیک WDM، یک شبکه تمام نوری بدون رقابت ایجاد می‌کند. این برتری با استفاده از تعداد فراوانی منبع نوری با طول موج‌های مختلف و سویچ‌های سریع برای انتخاب طول موج بدست می‌آید. در این معماری تعداد ریزحلقه‌های مورد نیاز متناسب با مربع

<sup>1</sup> Header

تعداد گره‌های شبکه است. این ویژگی محدود شدن مقیاس‌پذیری طرح همچنین افزایش توان مصرفی و مساحت موردنیاز برای پیاده‌سازی شبکه نوری روی تراشه را در پی دارد.

## 2-2-2 معماری Columbia

معماری ترکیبی Columbia [Shacham\_08]، یک معماری ترکیبی از یک شبکه نوری با یک شبکه الکتریکی روی تراشه می‌باشد. هر دو شبکه بر پایه هم‌بندی توری مدور طراحی شده‌اند. شبکه نوری امکان استفاده از توانایی بالای انتقال داده در موج‌برهای نوری و سویچ‌های سیلیکونی را فراهم می‌آورد. این شبکه داده‌های بزرگ را با روش راه‌گزینی مداری<sup>1</sup> ارسال می‌کند. شبکه الکتریکی توانایی بافر کردن و پردازش در سطح الکتریکی را ممکن می‌سازد. ارسال بسته‌های کنترلی و داده‌های کوچک، با استفاده از راه‌گزینی بسته‌ای<sup>2</sup>، در این شبکه صورت می‌گیرد. در ادامه روند ارسال داده در معماری Columbia را بررسی می‌کنیم. ارسال داده در این معماری به روش زیر است:

1. ابتدا از طریق شبکه الکتریکی یک بسته کنترلی به نام بسته راه‌اندازی مسیر<sup>3</sup>، به سمت مقصد ارسال می‌شود. این بسته، عناصر نوری مورد نیاز را برای ارسال سیگنال نوری بین گره آغازگر و پایانی رزرو می‌کند.
2. پس از رزرو مسیر، سیگنال نوری با سرعت بالا در مسیر رزرو شده از گره آغازگر به پایانی ارسال می‌شود. داده با استفاده از تکنیک WDM بر روی تعدادی طول موج ارسال می‌شود. این تکنیک افزایش سرعت در پی خواهد داشت.
3. پس از اتمام ارسال داده، بایستی منابع رزرو شده در مسیر برای استفاده داده‌های دیگر آزاد شوند. برای آزادسازی منابع، یک بسته کنترلی دیگر به نام گسست مسیر<sup>4</sup> توسط مسیرپاب مقصد به سمت گره آغازگر از طریق شبکه الکتریکی ارسال می‌شود.

---

<sup>1</sup> Circuit switching

<sup>2</sup> Packet switching

<sup>3</sup> Path setup

<sup>4</sup> Path-teardown

این معماری بدون رقابت نیست، در صورتی که مسیر نوری مورد درخواست با دست کم یکی از مسیرهای رزرو شده در شبکه تداخل داشته باشد، بسته راه اندازی مسیر موفق به رزرو مسیر نمی شود. در این حالت بسته از شبکه الکتریکی حذف می شود. از سوی دیگر برای آزادسازی منابع رزو شده، بسته کنترلی دیگری به نام مسیر-مسدود به سمت گره آغازگر ارسال می-شود. بسته مسیر-مسدود، مسیرهای نوری که تاکنون رزرو شده اند، را آزاد می کند. رخداد رقابت افزایش تأخیر راه اندازی مسیر و در نتیجه تأخیر کل را در پی دارد.

در این معماری در کنار رقابت، استفاده از یک شبکه الکتریکی برای رزرو و آزاد کردن مسیر نوری نیز، سربار تأخیر در این شبکه را به همراه دارد. کاهش سربار تأخیر شبکه الکتریکی نیاز به ارسال داده نوری بزرگی دارد.

## 2-2-3 معماری CONoC<sup>1</sup>

معماری CONoC [Koochi\_09]، یک شبکه نوری روی تراشه مبتنی بر همبندی Spidergon بدون رقابت ارائه می کند. این شبکه قادر است ازدحام بین داده ها را به صورت نوری حل نماید. برای حل مشکل رقابت از ترکیب مسیریابی طول موج و تکنیک WDM، استفاده شده است. همبندی Spidergon با N هسته پردازشی (N زوج) مشابه همبندی حلقه می باشد، که در آن گره های مقابل هم توسط اتصالات عرضی به یکدیگر متصل می شوند. عبور دو موج بر نوری روی یکدیگر نویز هم شنوایی ایجاد می کند، مقدار نویز تولید شده به زاویه برخورد دو موج بستگی دارد. اگر زاویه برخورد 90 درجه باشد، مقدار نویز هم شنوایی قابل صرف نظر است. در جانمایی همبندی Spidergon، برای کاهش نویز هم شنوایی بین موجبرها زاویه 90 درجه در نظر گرفته شده است. در این همبندی درجه تمام گره ها ثابت می باشد. به این ترتیب طراحی مسیریاب های نوری آسان تر و با تعداد کمتری

---

<sup>1</sup> Contention-Free Optical NoC

ریزحلقه انجام می‌شود. مهمترین مزیت این معماری در مقایسه با مسیریاب‌های بدون رقابت دیگر مانند مسیریاب  $\lambda$ ، مقیاس‌پذیری می‌باشد.

معماری مسیریاب  $\lambda$  بر اساس یک شبکه چندطبقه‌ای از سویچ‌ها طراحی شده است. و تعداد ریزحلقه‌ها متناسب با مربع تعداد گره‌های شبکه است. به علاوه، برای درستی مسیریابی طول موج، به تعداد گره‌ها نیاز به طول موج می‌باشد. معماری CONoC، بر پایه شبکه‌ای از مسیریاب‌ها، طراحی شده است. بر این اساس تعداد طول موج‌ها نسبتی خطی با تعداد گره‌های شبکه دارد. این تعداد به یک چهارم تعداد گره‌ها محدود شده است. این دو مسئله در کنار یکدیگر، سبب مقیاس‌پذیری بهتر معماری CONoC در مقایسه با معماری مسیریاب  $\lambda$  می‌شود.

محدودیت CONoC، ناتوانی یک گره پردازشی برای دریافت همزمان چند داده از فرستنده‌های مختلف می‌باشد. این مشکل به کمک مکانیزم ارسال مجدد برطرف شده است. در این مکانیزم، ابتدا یک بسته کنترلی به نام وارسی مقصد<sup>1</sup> توسط شبکه الکتریکی به سمت مقصد ارسال می‌شود. در صورت مشغول بودن مقصد، بسته وارسی مقصد به گره آغازگر پس فرستاده می‌شود تا در آینده دوباره ارسال شود. در صورت آزاد بودن مقصد، بسته کنترلی دیگری به نام رزرو مسیر از مقصد به سمت گره آغازگر از طریق شبکه الکتریکی ارسال می‌شود. به بیان دیگر معماری CONoC مشکل رقابت را به صورت نوری حل می‌کند، و برخلاف معماری Columbia، امکان حذف شدن بسته رزرو مسیر وجود ندارد. در هر دو معماری رزرو الکتریکی مسیر سبب افزایش تأخیر ارسال می‌گردد.

## 2-2-4- معماری FONoC<sup>2</sup>

معماری FONoC [Gu\_09a]، یک شبکه نوری روی تراشه مبتنی بر هم‌بندی Fat-tree می‌باشد. این هم‌بندی به عنوان یک شبکه‌ی میان‌ارتباطی چندطبقه‌ای برای اتصال هسته‌های پردازشی به کار می‌رود. برتری مهم این معماری استفاده از شبکه نوری برای ارسال بسته‌های کنترلی و داده می‌باشد. به این

<sup>1</sup> Destination checking

<sup>2</sup> Fat-tree based Optical NoC

ترتیب دیگر نیازی به شبکه الکتریکی نیست. حذف این شبکه، سبب کاهش هزینه می‌شود. از سوی دیگر به دلیل آن‌که بسته کنترلی در هر مسیر یاب نیاز به یک تبدیل نوری به الکتریکی و بالعکس دارد، تاخیر ارسال داده با وجود نبودن شبکه الکتریکی کاهش نمی‌یابد.

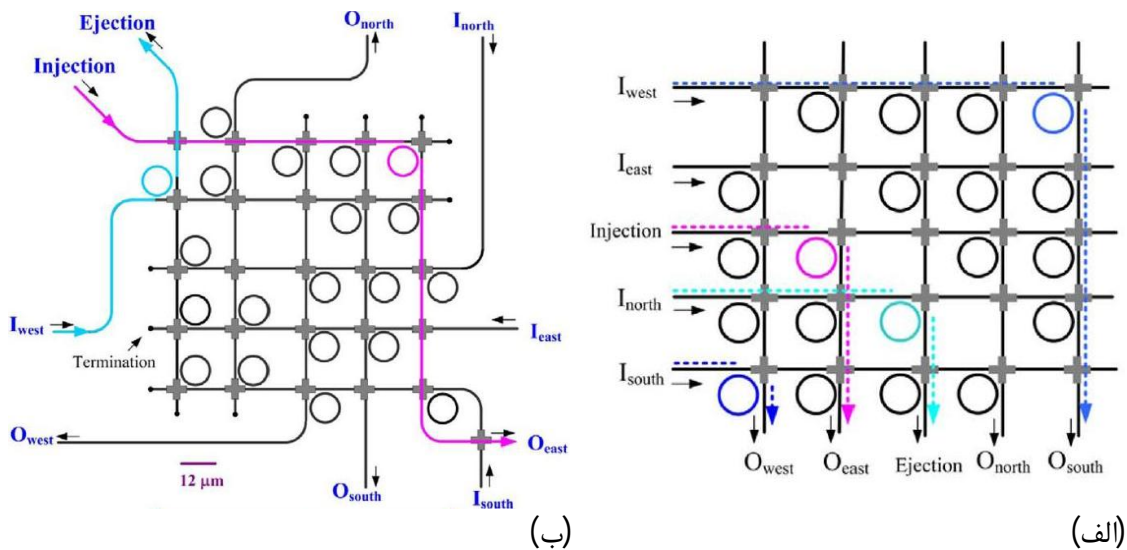
مسیر یاب استفاده شده در این معماری از شش ریزحلقه تشدیدگر (برای مسیریابی سیگنال‌های نوری)، یک واحد کنترل الکتریکی (برای تغییر وضعیت ریزحلقه‌ها متناسب با الگوریتم مسیریابی) و چهار رابط کنترلی (برای تبدیل سیگنال‌های کنترلی نوری به الکتریکی و بالعکس) تشکیل شده است. برای ارسال داده، ابتدا بسته‌های کنترلی به صورت راه‌گزینی بسته‌ای فرستاده می‌شوند. پس از ورود به هر مسیر یاب بسته کنترلی، با استفاده از رابط کنترلی به سیگنال الکتریکی تبدیل و به واحد کنترل تحویل داده می‌شود. در واحد کنترلی براساس الگوریتم مسیریابی، ریزحلقه‌های تشدیدگر روشن یا خاموش می‌شوند. پس از رزرو مسیر، سیگنال نوری به صورت راه‌گزینی مداری ارسال می‌شود.

## 2-2-5- سویچ ماتریسی 5x5

سویچ ماتریسی 5x5 [Poon\_09]، یک سویچ نوری بدون انسداد برای یک شبکه نوری روی تراشه مبتنی بر هم‌بندی توری دو بعدی می‌باشد. در این هم‌بندی، هر مسیر یاب حداکثر با چهار مسیر یاب دیگر در جهت‌های شمال، شرق، جنوب و غرب در ارتباط است و یک درگاه نیز برای ارتباط با هسته پردازشی نیاز دارد. بر این اساس، ساده‌ترین مسیر یاب برای این هم‌بندی یک سویچ ماتریسی 5x5 می‌باشد که از 20 ریزحلقه تشدیدگر و 25 تقاطع موج‌بر تشکیل شده است. ساختار این سویچ ماتریسی 5x5 در شکل (2-4-الف)، نشان داده شده است. هر درگاه سویچ با توجه به جهت تراز شده است تا موج‌برهای بین دو سویچ همسایه با یکدیگر تقاطع نداشته باشند شکل (2-4-ب). ایراد مهم ساختار پیشنهادی، تعداد زیاد تقاطع بین موج‌برهای نوری می‌باشد که موجب محدود شدن مقیاس پذیری آن می‌شود.

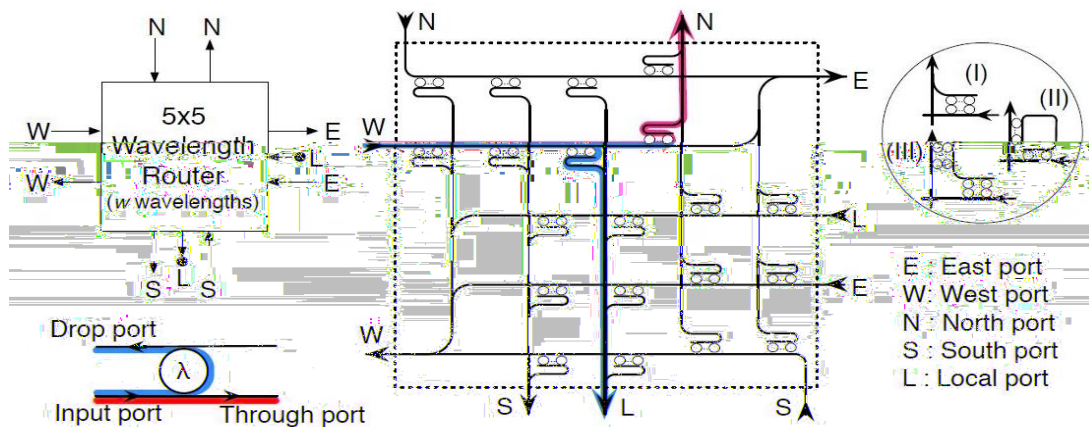
## 2-2-6- Oblivious معماری

معماری Oblivious [Kirman\_10]، مبتنی بر هم‌بندی توری مدور دوبعدی و بر مبنای مسیریابی طول موج طراحی شده است. در این مسیریابی، به‌ازای هر جفت گره فرستنده-گیرنده، یک طول موج خاص در نظر گرفته می‌شود که داده توسط آن طول موج در شبکه تزریق می‌گردد. در طراحی مسیریاب، از عناصر نوری غیر فعال استفاده شده است که به بهینه شدن توان مصرفی معماری کمک می‌کند. شکل (2-5)، مسیریاب طراحی شده در این معماری را که مسیریاب طول موج نامیده می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل 2-4: سویچ ماتریسی 5x5 [Poon\_09]، (الف) ساختار اولیه، (ب) ساختار اصلاح شده

در این معماری، هر گره تنها امکان ارسال یک داده نوری را دارد. برای افزایش تعداد داده‌های ارسالی توسط هر گره، چندین نسخه از شبکه در تراشه تکرار شده است که موجب افزایش تعداد عناصر نوری لازم برای ساخت معماری می‌شود.



شکل 2-5: مسیریاب طول موج [Kirman\_10]

## 2-2-7- معماری Corona

معماری Corona [Vantrease\_08]، یک شبکه نوری مبتنی بر گذرگاه می‌باشد. برای کاهش توان مصرفی، گذرگاه‌های نوری در این معماری، به صورت چند نویسنده-یک خواننده (<sup>1</sup>MWSR) پیاده‌سازی شده‌اند. هر گره یک کانال اختصاصی برای دریافت داده دارد و برای ارسال از سایر کانال‌ها استفاده می‌کند. در این معماری یکی از دلایل رقابت ارسال همزمان دو گره، به یک گره مشترک می‌باشد. برای جلوگیری از مشکل رقابت، یک مکانیزم داوری مبتنی بر نشانه <sup>2</sup> به معماری Corona افزوده شده است. این شیوه تضمین می‌کند که دو گره همزمان از یک کانال برای ارسال داده به گره مشترک استفاده نمی‌کنند. هر گره با جذب نشانه که یک طول موج اختصاصی است، کانال را در اختیار می‌گیرد. با اتمام ارسال روی آن کانال، طول موج (نشانه) مجدداً توسط گره به شبکه تزریق می‌شود. در این معماری برای انجام همه‌پخشی، یک گذرگاه اختصاصی به صورت چند نویسنده-چند خواننده (<sup>3</sup>MWMR) پیاده‌سازی شده است. از آنجا که در هر لحظه فقط یک ارتباط چندپخشی در شبکه می‌تواند انجام گیرد، دسترسی به کانال ارتباط چندپخشی نیز مستلزم داوری است.

<sup>1</sup> Multiple-Write-Single-Read

<sup>2</sup> Token

<sup>3</sup> Multiple-Write-Multiple-Read

## 8-2-2 معماری FireFly-Pan

معماری Pan [Pan\_09]، یک معماری Firefly ترکیبی و سلسله مراتبی می‌باشد. در این معماری برای ارتباطات کوتاه و محلی، سیگنالینگ الکتریکی و برای ترافیک طولانی و سراسری، اتصالات نوری به کار رفته است. در بخش اتصالات نوری یک crossbar استفاده شده است (شکل 2-8). این crossbar یک گذرگاه نوری است که اجازه‌ی چند نوشتن و یک خواندن همزمان را می‌دهد و از داوری بر مبنای نشانه استفاده می‌کند. برای جلوگیری از مشکلات داوری سراسری به چند crossbar دیگر تقسیم شده تا عملیات داوری به صورت محلی انجام گیرد. هر چند که آمارهای ارائه شده در این تحقیق اعداد خوبی را نسبت به شبکه‌های الکتریکی نشان می‌دهند، داوری در این شبکه، مانند فاز رزرو مسیر در ساختارهای پیشین، می‌تواند گلوگاهی برای کارایی کل شبکه به حساب آید.

## 9-2-2 معماری PROPEL

معماری PROPEL [Kodi\_10]، مبتنی بر crossbar می‌باشد. در این معماری شبکه ارتباطی به جای استفاده از یک crossbar سراسری، توسط مجموعه‌ای از crossbar های محلی طراحی شده است. گره‌های یک سطر و گره‌های یک ستون از طریق crossbar محلی به یکدیگر متصل می‌شوند. هر گره دارای یک کانال اختصاصی برای دریافت داده از گره‌های هم سطر و یک کانال اختصاصی برای دریافت داده از گره‌های هم ستون می‌باشد. همچنین به هر گره در یک سطر (ستون)، یک طول موج مجزا نسبت داده می‌شود تا گره‌های موجود در یک سطر (ستون) به طور هم‌زمان، داده بر روی کانال دریافت هر گره ارسال کنند. ارسال داده به یک گره در سطر یا ستون دیگر از طریق یک گره میانی انجام می‌گیرد. بسته در گره میانی مجدداً تولید و به سمت مقصد ارسال می‌شود. این مسئله اثر منفی بر روی تأخیر و توان مصرفی شبکه دارد.

## 2D-MM<sup>1</sup> - 10-2-2 معماری

معماری 2d-MM [Shafaei\_10]، مبتنی بر هم‌بندی مش دوبعدی می‌باشد. در این معماری به‌جای یک کانال تزریق از دو کانال تزریق (I1 و I2) در مسیرهای نوری استفاده شده است، کانال I1 برای ارسال به نیمی از گره‌های شبکه و کانال I2 برای ارسال به نیم دیگر گره‌ها استفاده می‌شود. بدین ترتیب، با اختصاص تنها  $N/2$  (تعداد گره‌های شبکه) طول موج (یا مجموعه طول موج) به گره‌های شبکه می‌توان مسیریابی سیگنال‌های نوری را انجام داد. تعیین کانال تزریقی که سیگنال نوری از طریق آن باید به شبکه وارد شود، در فرستنده و به‌صورت الکتریکی انجام می‌شود. برای مسیریابی در شبکه از الگوریتم XY استفاده شده است. ابتدا داده در راستای محور x به سمت ستون مقصد، سپس در راستای محور y به طرف گره مقصد حرکت می‌کند. در نتیجه در هر سطر ریزحلقه‌های تشدیدگری نیاز است که سیگنال نوری را در صورت لزوم به سمت ستون بالا یا پایین منتقل کند. از آنجا که ریزحلقه‌های تشدیدگر باید به فرکانس‌های متوالی حساس باشند، تخصیص طول موج‌ها به‌صورت ستونی انجام می‌شود. این معماری به دلیل استفاده از یک شبکه میان ارتباطی به جای crossbar و همچنین داشتن دو کانال تزریق، مقیاس پذیری خوبی نسبت به سایر روش‌های موجود برای پیاده سازی ارتباط چند پخشی دارد. در معماری پیشنهادی برای پیاده سازی قابلیت بازپیکربندی از روش به کار رفته در معماری 2D-MM استفاده می‌کنیم.

---

<sup>1</sup> 2-Dimensional Modified Mesh



می‌شود و به این ترتیب در ارتباطات آتی فاز رزرو مسیر حذف شده و در کاهش زمان پاسخگویی سیستم موثر می‌باشد. این روش نسبت به هم‌بندی فراگیر سربار مساحت و هزینه کمتری دارد، هرچند که در این روش سربار محاسباتی خواهیم داشت.

ایجاد این مسیر به دو صورت ایستا و پویا قابل انجام است. در حالت ایستا، در زمان اجرای سیستم قادر به تغییر مسیر ایجاد شده نیستیم. این حالت برای یک کاربرد مفید و برای یک کاربرد دیگر می‌تواند بدون استفاده باشد، به عبارت دیگر این روش وابسته به کاربرد می‌باشد. در حالت پویا، هم‌زمان با عملکرد سیستم و با توجه به شرایط جاری سیستم مسیر بین گره‌های مختلف ایجاد و در صورت عدم نیاز حذف می‌گردد. این روش به دلیل در نظر گرفتن شرایط جاری سیستم کارایی، انعطاف پذیری و سربار بیشتری نسبت به حالت ایستا دارد.

افزودن مسیر می‌تواند به صورت مجازی و یا فیزیکی انجام شود. در روش مجازی، پس از شناسایی دو گره، تمامی المان‌هایی که در مسیر بین آنها قرار می‌گیرند از پیش برای برقراری ارتباط رزرو می‌شوند و به این ترتیب فاز رزرو مسیر حذف می‌شود. به بیان دیگر یک مسیر مجازی بین دو گره ایجاد می‌شود. در روش فیزیکی، بین دو گره مورد نظر یک مسیر فیزیکی برقرار می‌شود. این مسیر فیزیکی کاهش فاصله، تاخیر، کاهش ازدحام و کاهش توان را در پی خواهد داشت. افزودن مسیر فیزیکی، کاهش انعطاف پذیری را در پی خواهد داشت علاوه بر آن که این روش برای هر کاربرد متفاوت خواهد بود. در ادامه‌ی این بخش به بررسی نحوه پیاده‌سازی قابلیت همه بازپیکربندی در شبکه‌های روی تراشه با اتصالات الکتریکی و نوری پرداخته می‌شود.

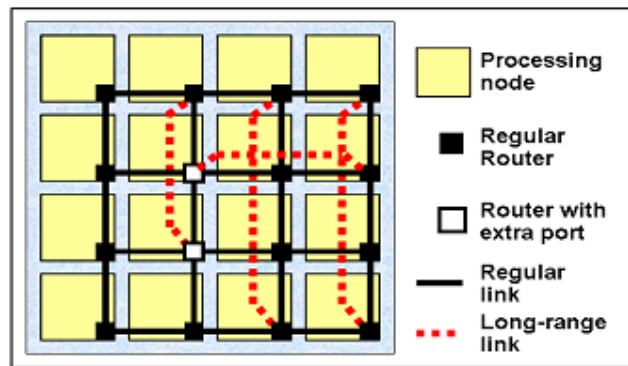
### **3-2- قابلیت بازپیکربندی در شبکه‌های الکتریکی**

در اتصالات الکتریکی بازپیکربندی با هدف کاهش فاصله و برای دستیابی به تأخیر و توان مصرفی کمتر انجام می‌شود. برای افزودن قابلیت بازپیکربندی به چند روش می‌توان اقدام نمود.

### 3-2-1- افزودن مسیر

معماری <sup>1</sup>VIP [Modarresi\_08]، اتصالات نقطه به نقطه مجازی بر روی شبکه راهگزینی بسته، یک معماری با قابلیت بازپیکربندی است. در این معماری هدف کاهش توان مصرفی و تاخیر می باشد. در این روش VIPها، براساس گراف وظیفه یک کاربرد عمل کرده و بین گره های مبدا و مقصد ارتباطات (بال های گراف وظیفه) تشکیل می شوند. در واقع نوعی اتصال اختصاصی لوله ای بین آن گره ها ایجاد می نمایند. مانند شبکه های راهگزینی مدار، VIPها قابل بازپیکربندی بوده و می توانند در زمان اجرای یک کاربرد، بین گره هایی با حجم ارتباطی بالا برپا شوند.

معماری <sup>2</sup>LLI [Ogras\_04]، یک معماری خاص منظوره با قابلیت بازپیکربندی می باشد. در این معماری براساس کاربرد بین گره های یک شبکه مبتنی بر مش اتصالاتی برقرار می شود (شکل 3-1). این اتصالات برای کاهش بار موجود در مدار افزوده می شوند و کاهش تاخیر و افزایش بهره وری سیستم را در پی دارند.



شکل 3-1: افزودن لینک به یک ساختار مبتنی بر مش، [Modarresi\_08]

### 3-2-2- بازپیکربندی با استفاده از گذرگاه

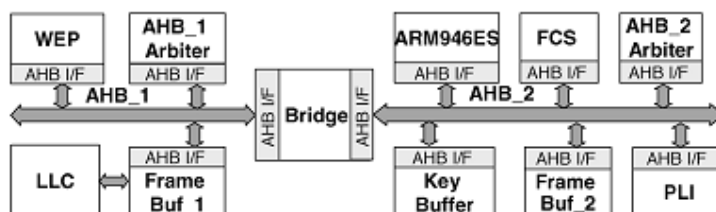
معماری FLEX BUS [Sekar\_08]، یک معماری قابل بازپیکربندی است. در این معماری برای دستیابی به قابلیت بازپیکربندی، همبندی شبکه ارتباطی و بار اختصاص یافته به المانها به صورت پویا

<sup>1</sup> Virtual point to point

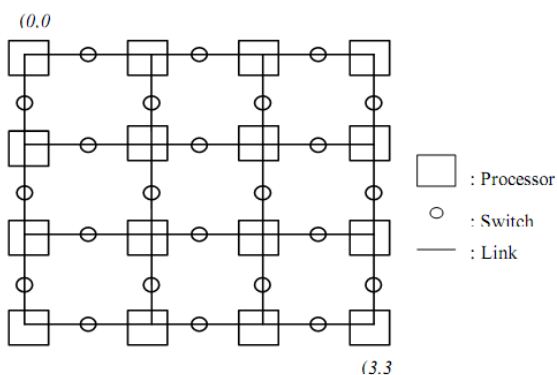
<sup>2</sup> Long-Range Link Insertion

تعیین می‌شوند که به تکنیک‌های دور زدن پویای پل<sup>1</sup> و نگاشت مجدد المان‌ها معروفاند (شکل 3-2). این هم‌بندی از چندین گذرگاه متمایز تشکیل شده است که توسط یک پل به یکدیگر مرتبط شده‌اند. در تکنیک دور زدن پل، بین دو بخش متمایز پل یک مسیر مشخص ایجاد می‌گردد و در واقع این دو قسمت تشکیل یک گذرگاه بزرگتر را می‌دهند. در تکنیک بعدی نگاشت المان‌ها به بخش‌های گذرگاه به صورت دینامیک انجام می‌شود.

معماری RMesh [Jeng\_99]، نیز دارای قابلیت بازپیکربندی می‌باشد که در سال 1999 توسط Jeng ارائه شد. در این معماری از یک گذرگاه بازپیکربندی استفاده می‌شود که برای اتصال تمامی المان‌ها به کار می‌رود در شکل (3-3) این معماری نشان داده شده است. در این معماری در یال اتصال هر گره یک سوئیچ قرار داده می‌شود که با باز کردن این سوئیچ‌ها گذرگاه سراسری تبدیل به چندین گذرگاه کوچکتر می‌شود که تنها بخشی از المان‌ها را به هم وصل می‌کنند.



شکل 3-2: معماری FLEX BUS [Sekar\_08]



شکل 3-3: معماری 4x4 RMesh [Jeng\_99]

<sup>1</sup> Bridge

### 3-3- قابلیت بازپیکربندی در شبکه‌های نوری

در اتصالات نوری برخلاف اتصالات الکتریکی، مسافت بین گره‌ها تأثیر منفی بر پارامترهای چون تأخیر ندارد. در این جا هدف بازپیکربندی، تغییر هم‌بندی براساس کاربرد، کاهش ازدحام و انتقال سیگنال از مسیری با کمترین تعداد ریزحلقه روشن می‌باشد. کاهش تعداد ریزحلقه‌ها منجر به کاهش توان مصرفی می‌شود. در صورتی که میزان داده تبادلی شده از یک موجبر کمتر شود، تعداد طول موج اختصاص داده شده به ریزحلقه‌ها کاهش می‌یابد. کاهش تعداد طول موج در هر ریزحلقه، کاهش قطر ریزحلقه و کاهش مساحت معماری ارائه شده را به همراه دارد. در ادامه به برخی از کارهای تحقیقاتی انجام شده در این رابطه می‌پردازیم.

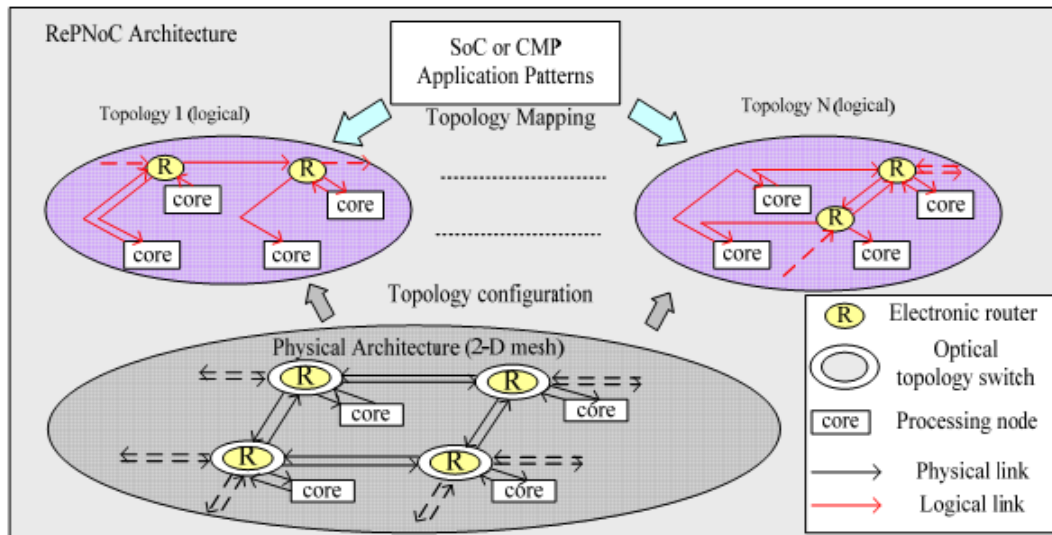
### 3-3-1- همبندی فراگیر - معماری RePNoC

معماری [Gao\_09]RePNoC، این معماری دارای قابلیت بازپیکربندی براساس کاربردهای مختلف می‌باشد. هدف این معماری کاهش تأخیر بر اساس کاربردهای مختلف است. در اینجا یک هم‌بندی فیزیکی براساس مش دو بعدی داریم که شامل تمام گره‌های پردازشی و مسیرهای الکتریکی می‌باشد. سپس بر اساس کاربرد یک همبندی منطقی بر این هم‌بندی فیزیکی بنا می‌شود. این مسیرهای ها توسط سوئیچ‌های هم‌بندی نوری به هم بسته شده‌اند. این سوئیچ‌ها برای اتصال لینک‌ها و مسیرهای در یک هم‌بندی منطقی به کار می‌روند. شکل (3-4) این معماری را نشان می‌دهد.

### 3-3-2- افزودن مسیر - قابلیت بازپیکربندی در شبکه‌های چندپردازنده ای

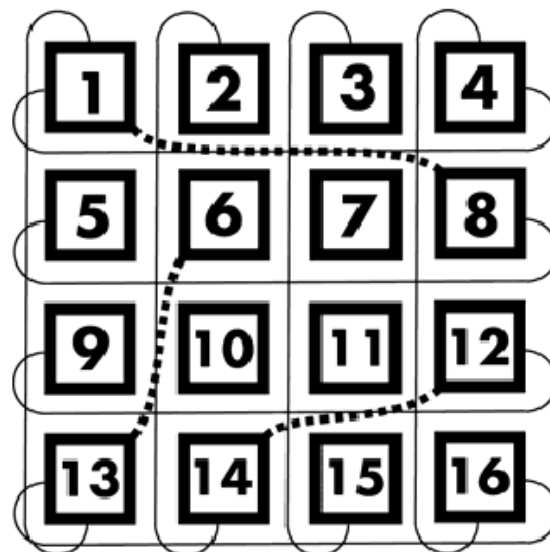
در معماری شبکه چندپردازنده با قابلیت بازپیکربندی [Artundo\_08]، یک معماری با قابلیت بازپیکربندی برای سیستم‌های چند پردازنده‌ای ارائه شده است. از آنجا که یکی از فاکتورهای محدودکننده در ایجاد معماری‌های محاسباتی با کارایی بالا، ارتباط بین پردازنده‌ها و حافظه‌ها می‌باشد، هدف این معماری از بین بردن این محدودیت‌ها است. این معماری از یک شبکه پایه ثابت شامل همه

گره‌ها با هم‌بندی توری و یک تعداد محدودی از لینک‌های نوری با قابلیت بازپیکربندی تشکیل شده است.



شکل 3-4: معماری RePNoC [Gao\_09]

این لینک‌های نوری که elink نامیده می‌شوند، بین دو گره که بار ترافیکی آنها از یک مقدار بیشتر باشد و امکان ایجاد ازدحام وجود داشته باشد، برای یک بازه زمانی مشخص قرار داده می‌شوند و پس از آن به گره‌های دیگر تخصیص داده می‌شوند (شکل 3-5).



شکل 3-5: معماری با قابلیت بازپیکربندی با افزورن لینک، [Artundo\_08]

## فصل چهارم

### معماری پیشنهادی

در مقدمه شبکه‌های روی تراشه به عنوان شبکه ارتباطی کارا و مقیاس‌پذیر برای اتصال هسته‌های مختلف یک تراشه و جایگزینی برای اتصالات سنتی مبتنی بر گذرگاه معرفی شدند. در صورتی که بتوان با توجه به نیازهای ترافیکی و کاربرد مورد نظر شبکه را بازپیکربندی کرد، کارایی و قابلیت شبکه روی تراشه افزایش می‌یابد. در این پروژه یک معماری جدید ارائه می‌گردد که قادر به پشتیبانی از هم-بندی‌های مسطح مانند توری و مش، و هم‌بندی‌های چندسطحی مانند پروانه و هم‌بندی‌های مبتنی بر درخت می‌باشد. طرح ارائه شده امکان داشتن همزمان چندین هم‌بندی پروانه را نیز فراهم می‌آورد. در اینجا دو هم‌بندی توری و پروانه با استفاده از طرح پیشنهادی پیاده‌سازی شده‌اند و با شبکه الکتریکی و نوری مقایسه شده‌اند.

در روند انجام پروژه ابتدا هم‌بندی‌ها و الگوریتم‌های مسیریابی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. هدف از این بررسی تعیین کاربرد هم‌بندی‌های مختلف و الگوریتم‌های مناسب برای مسیریابی در این هم‌بندی‌ها بود. برای افزودن قابلیت بازپیکربندی راه‌های متفاوتی وجود دارد مانند تغییر الگوریتم مسیریابی، افزودن لینک بین دو گره با ترافیک بالا و یا استفاده از یک هم‌بندی که قادر به پشتیبانی و گذر از یک هم‌بندی به هم‌بندی دیگر باشد. در این پروژه هدف گذر از یک هم‌بندی به یک هم‌بندی دیگر می‌باشد و البته با بیان جزئیات بیشتر از طرح نشان می‌دهیم که امکان تغییر الگوریتم مسیریابی و یا پیکربندی طرح با هدف کاهش بار ترافیکی هم وجود دارد.

یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای افزودن ایده بازپیکربندی استفاده از یک هم‌بندی مانند Crossbar می‌باشد که در آن تمام گره‌ها به یکدیگر متصل هستند [Artundo\_08]، با استفاده از چنین هم‌بندی پایه-ای قادر به پیاده‌سازی سایر انواع هم‌بندی‌ها هستیم چرا که امکان برقراری ارتباط بین هر دو گره در نظر

گرفته شده است. در این حالت برای یک همبندی خاص تنها کافیسیت لینک‌های مربوط به آن را انتخاب کنیم. اگر چه این روش ساده و کارآمد است ولی سربار مساحت زیادی را به همراه دارد. از طرفی برای برقراری همه ارتباطات ممکن، هر ریزحلقه تشدیدگر نیاز به یک طیف فرکانسی گسترده دارد که به بزرگ شدن ریز حلقه و افزایش مساحت و هزینه طرح منجر می‌شود.

در این پروژه سعی بر ارائه طرحی با قابلیت گذر بین همبندی‌ها را داریم، به گونه‌ای که سربار کمی در پی داشته باشد. در ادامه به معرفی طرح پیشنهادی می‌پردازیم. در طراحی شبکه نوری همبندی، مسیریابی، تخصیص طول موج‌ها و شبکه کنترلی را باید در نظر گرفته شود. در ادامه به معرفی هریک می‌پردازیم.

#### **1-4- معماری شبکه نوری تراشه پیشنهادی**

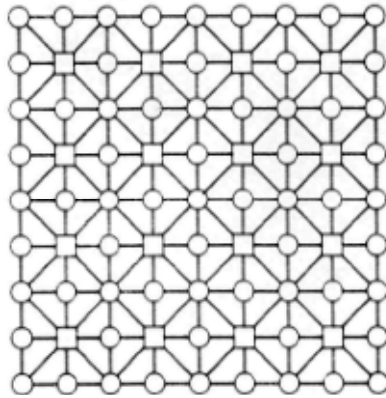
در این بخش، معماری شبکه داده ذکر می‌شود. ابتدا، همبندی، الگوریتم مسیریابی مورد استفاده در شبکه و سپس نحوه طراحی مسیریاب تمام‌نوری با استفاده از عناصر سویچینگ غیر فعال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### **1-1-4- همبندی**

در معماری پیشنهادی یک همبندی با قابلیت بازپیکربندی ارائه شده است که امکان گذر بین همبندی‌های مسطح و چند سطحی را دارد. در اینجا نتایج پیاده‌سازی دو همبندی پروانه و توری بررسی شده اند. در ادامه دلیل این انتخاب ذکر می‌شود.

شبکه های مسطح برای پیاده‌سازی مدارهای الکتریکی بسیار مناسب می‌شوند و به راحتی می‌توان از الگوریتم‌های مسیریابی ساده برای انتقال داده استفاده کرد. از سوی دیگر همبندی‌های چند سطحی و مبتنی بر درخت دارای مزایایی چون قطر کم می‌باشند که باعث افزایش کارایی شبکه می‌گردد. برای داشتن امکان پیاده سازی این دو دسته، اساس همبندی مورد نظر را براساس همبندی توری قرار می‌دهیم. در این حالت برای داشتن امکان پیاده‌سازی همبندی‌های درختی ناچار به اتصال قطری گره‌ها

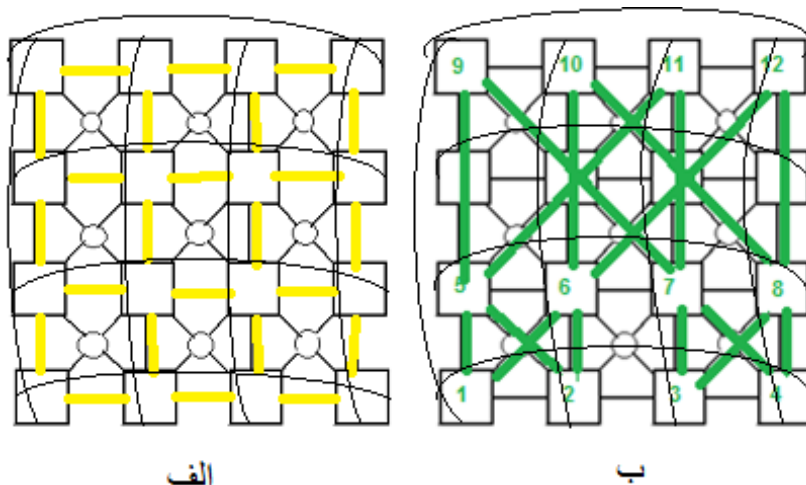
هستیم. برای کم شدن سربار و اینکه طرح ارائه شده در دوبعد قابل پیاده‌سازی باشد، برای اتصال گره‌ها از اتصالات قطری استفاده کردیم. در یافتن این طرح از طرح ارائه شده در کتاب پرهامی [Parhami] که در شکل 1-4 نشان داده شده است الهام گرفته شد.



شکل 1-4: ساختار مش با قابلیت بازپیکربندی، [Parhami\_99]

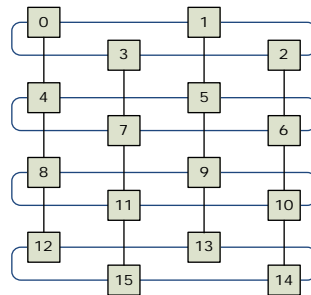
در این همبندی بین هر دو گره یک سوئیچ اضافه شده است (شکل 1-4) که با توجه به قابلیت های همبندی نوری نیاز به افزودن سوئیچ بین هر دو گره احساس نمی‌شود. در نتیجه از همبندی نشان داده شده در شکل 2-4 برای ارائه شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی استفاده شد.

این همبندی  $m \times n$  دارای  $m$  سطر و  $n$  ستون، و  $N = m.n$  گره است. آدرس هر گره در شبکه به صورت  $(x, y)$  نمایش داده می‌شود که  $x$  شماره ستون و  $y$  شماره سطر را تعیین می‌کند.



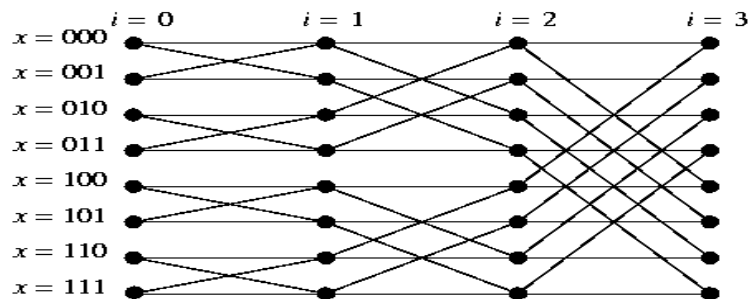
شکل 2-4: همبندی ReTMesh، (الف) نگاشت همبندی توری، (ب) نگاشت همبندی پروانه

شبکه‌های روی تراشه الکتریکی و نوری بسیاری بر پایه هم‌بندی توری دوبعدی طراحی شده‌اند [Hoskote\_07]، [Wentzlaff\_07]، [Gu\_09b]. دلایلی که سبب محبوبیت این هم‌بندی در شبکه‌های روی تراشه الکتریکی شده است، مانند کارایی قابل قبول در کاربردهای متفاوت و جانمایی مناسب در تراشه‌های چند هسته‌ای، در شبکه‌های نوری نیز پابرجاست [Shacham\_08]. ضمن آن که الگوریتم‌های ساده‌ای برای پیاده‌سازی ارتباطات تک‌پخشی و چندپخشی در هم‌بندی توری دوبعدی موجود است [Duato\_03]. برای آن که طول تمام کانال‌های موجود در یک سطر یکسان شوند، از جانمایی شکل (3-4) برای هم‌بندی توری استفاده می‌شود.



شکل 3-4: هم‌بندی مش دو-بعدی اصلاح شده، [Shafaei\_10]  
جانمایی (4x4 2D-MM).

هم‌بندی دیگری که در اینجا بر روی معماری پیشنهادی پیاده‌سازی شده، هم‌بندی پروانه می‌باشد.



شکل 4-4: هم‌بندی پروانه، [Parhami\_99]

همبندی پروانه دارای قطر کم و در نتیجه کارایی بالا می‌باشد. این همبندی در الگوریتم تبدیل فوریه، ساختمان داده‌های سیستم عامل و سخت افزارهای مربوط به هوش مصنوعی کاربرد دارد. این همبندی در شکل 4-4 نشان داده شده است.

در همبندی ارائه شده برای معماری پیشنهادی، توری مدور به عنوان همبندی پایه استفاده شده و برای افزایش قابلیت بازپیکربندی بین هر چهار گره یک سوئیچ افزوده شده است. این سوئیچ‌های میانی امکان برقراری اتصالات قطری را فراهم می‌آورند.

#### 4-1-2- گذر بین همبندی‌ها

پس از تعیین دو همبندی مورد نظر و طراحی همبندی ReTMesh، نکته قابل توجه چگونگی گذر از یک همبندی به همبندی دیگر است. این مسئله را به دو صورت ایستا و پویا و براساس کاربرد و یا ترافیک شبکه می‌توان انجام داد.

**گذر ایستا:** در این روش مبنای گذر کاربرد می‌باشد. برای هر کاربرد همبندی مناسب تعیین و در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب در زمان عملکرد سیستم امکان تغییر همبندی وجود ندارد.

**گذر پویا:** در این شیوه باید امکان تغییر همبندی و پارامترهای مربوط به صورت پویا میسر باشد. با توجه به ترافیک همبندی تغییر می‌کند.

در اینجا به دلیل اهمیت توان مصرفی از عناصر سوئیچینگ نوری غیرفعال استفاده شده است. در نتیجه طول موج اختصاص یافته به هر ریزحلقه از پیش تعیین شده و به این ترتیب گذر به صورت ایستا انجام می‌شود. برای تفکیک دو همبندی یک راه با سربار کم تخصیص طول موج متمایز می‌باشد. در اینجا دو راه حل وجود دارد، یکی تخصیص طول موجهای کاملا متمایز برای هر گره در هر همبندی می‌باشد که در این صورت تعداد طول موجها را افزایش می‌دهد. و راه دیگر استفاده از یک مجموعه طول موج مشترک برای هر دو همبندی می‌باشد. در این حالت هر گره در هر همبندی طول موج متمایز از طول موج

اختصاص یافته در هم‌بندی دیگر دارد. به این ترتیب تعداد طول موج‌ها کاهش می‌یابد ولی در مواردی باعث افزایش مسیر پیموده شده می‌شود.

برای داشتن یک شبکه بدون رقابت و پیمودن کوتاهترین مسیر در هر هم‌بندی، برای تفکیک هم‌بندی‌ها، از روش اول استفاده می‌شود. به این ترتیب طول موج‌ها برابر کل طول موج‌های مورد نیاز برای هر دو هم‌بندی است امکان هر دو سوئیچینگ را برای ما فراهم می‌آورد. این شیوه تعداد طول موج‌ها را افزایش و قابلیت مقیاس‌پذیری را کاهش می‌دهد. برای جبران این مشکل برای تزریق داده به شبکه از دو کانال تزریق استفاده کردیم. به این ترتیب تعداد طول موج‌های مورد نیاز به نصف کاهش می‌یابد. چگونگی تخصیص طول موج در بخش 4-3-1 بیان می‌شود.

در معماری پیشنهادی امکان تغییر الگوریتم‌های مسیریابی هم وجود دارد، تغییر الگوریتم مسیریابی نمونه نه چندان قوی از قابلیت بازپیکربندی می‌باشد.

#### **4-3-1-3- طراحی مسیریاب نوری**

در طراحی مسیریاب نوری ابتدا لازم است نحوه تخصیص طول موج‌ها و الگوریتم مسیریابی مشخص شوند. پس از آن براساس الگوریتم مسیریابی چرخش‌های مورد نیاز محاسبه و سپس براساس همه این موارد مسیریاب مورد نظر طراحی می‌شود.

#### **4-3-1-4- تخصیص طول موج**

در معماری پیشنهادی از مسیریابی طول موج استفاده می‌شود که در آن آدرس مقصد سیگنال ارسالی، توسط طول موج آن تعیین می‌گردد. برای کاهش تعداد طول موج‌ها هر مسیریاب به دو کانال تزریق مجهز شده است. هر کانال تزریق مسئول ارسال داده به نیمی از گره‌های شبکه است. از سوی دیگر هر کانال تزریق، مستقل از موقعیت مسیریابش در هم‌بندی، به مسیری جداگانه برای ارسال داده نیاز دارد تا از تداخل طول موج‌ها در شبکه جلوگیری کرده و به راحتی بتواند نیمی از گره‌های شبکه را پوشش

دهد. به همین جهت، وجود یک کانال wraparound سطری در شبکه برای اتصال مسیریاب‌های هر سطر به صورت یک حلقه، الزامی می‌باشد (شکل 4-5).

بر این اساس، طول موج اختصاص داده شده به گره  $(x, y)$  در هم‌بندی توری دو-بعدی  $m \times n$ ، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

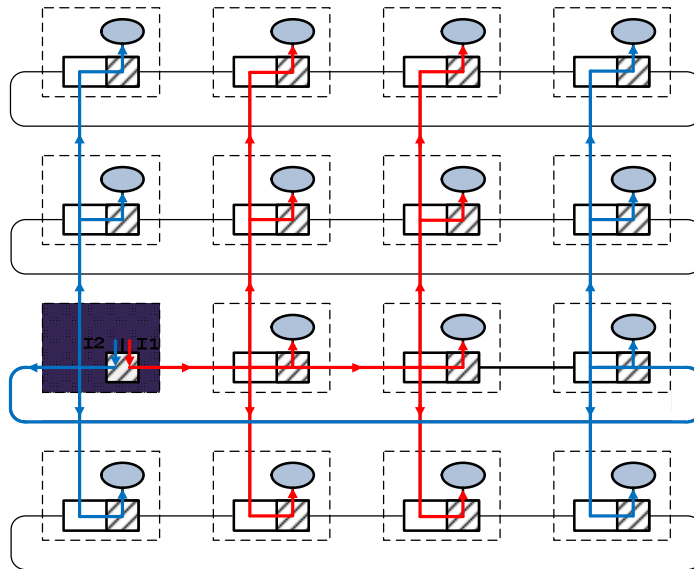
$$\lambda(x, y) = m \cdot (x \bmod [n/2]) + y \quad (1-4)$$

تخصیص طول موج‌ها در شبکه به صورت ستونی انجام می‌شود.

برای هم‌بندی پروانه با قابلیت بازپیکربندی ارائه شده در معماری پیشنهادی با  $N=2^r \times (r+1)$  به تعداد نصف گره‌های سطح اول  $2^{(r-1)}$  طول موج متمایز نیاز خواهیم داشت. تعداد طول موج‌های مورد نیاز در این روش در مقایسه با هم‌بندی پروانه بدون قابلیت بازپیکربندی به میزان نصف کاهش یافته است.

در صورتی که در معماری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی، از عناصر نوری غیرفعال استفاده کنیم تعداد کل طول موج‌های شبکه برابر با جمع طول موج‌های مورد نیاز برای هر هم‌بندی می‌باشد. در صورت استفاده از عناصر نوری فعال این میزان برابر با ماکزیمم تعداد طول موج استفاده شده در هر هم‌بندی می‌باشد، به عبارت دیگر  $N/2$ .

در حالت دوم هنگام گذر بین هم‌بندی‌ها، به یک فاز مشابه فاز رزرو مسیر برای تنظیم کردن طول موج تشدید هر ریزحلقه نیاز خواهیم داشت که سربار زمانی و توان مصرفی به همراه خواهد داشت. در حالت اول هرچند تعداد کل طول موج‌ها و در نتیجه تعداد طول موج‌های هر ریزحلقه افزایش می‌یابد ولی دیگر نیازی به فاز تغییر طول موج نخواهیم داشت. از طرفی تعداد طول موج‌های افزوده شده درصد ناچیزی می‌باشد و در نتیجه تاثیر ناچیزی بر مساحت و قابلیت مقیاس پذیری خواهد داشت. به این ترتیب در معماری پیشنهادی از عناصر نوری غیرفعال استفاده شده است و تعداد کل طول موج‌ها برابر با مجموع طول موج‌ها در حالت توری دوبعدی و پروانه می‌باشد.



شکل 4-5: نحوه پوشش گره‌های شبکه توسط کانال‌های تزریق

#### 4-3-1-2- الگوریتم مسیریابی

برای انتقال داده در یک شبکه، مسیر ارسال داده از گره فرستنده به گره گیرنده به وسیله الگوریتم مسیریابی تعیین می‌شود. در اینجا به منظور کاهش سربار و افزایش کارایی، برای هر هم‌بندی الگوریتم مسیریابی مناسب با آن به کار رفته است. در ادامه الگوریتم مسیریابی به تفکیک هر هم‌بندی بیان می‌شود

ساده‌ترین الگوریتم مسیریابی در هم‌بندی توری دوبعدی، هم در معماری با قابلیت بازپیکربندی و هم در معماری بدون این قابلیت، الگوریتم XY است. مسیریابی در الگوریتم XY به ترتیب بعد<sup>1</sup> انجام می‌شود: ابتدا بسته در راستای محور X به سمت ستون مقصد حرکت می‌کند، سپس به حرکت خود در راستای محور Y به سمت گره مقصد ادامه می‌دهد. این الگوریتم همواره کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو گره را

<sup>1</sup> Dimension

سپری می‌کند. به این ترتیب بسته در طول مسیر خود از عناصر اتلاف توان کم‌تری عبور خواهد کرد که کاهش توان مصرف شده توسط بسته را در پی دارد.

در معماری با قابلیت بازپیکربندی پیشنهادی برای ارسال داده در حالت هم‌بندی پروانه از الگوریتم مسیریابی اولین جد مشترک استفاده شده است. این الگوریتم امکان برقراری ارتباط چند پخشی بدون برخورد را فراهم می‌آورد. در این الگوریتم ابتدا در راستای قطر حرکت کرده تا به ستون مقصد برسیم، پس از آن در راستای محور  $Y$  حرکت می‌کنیم. برای جلوگیری از ازدحام و برقراری ارتباط چند پخشی از دو کانال تزریق بهره می‌بریم. این الگوریتم در هر بخش براساس کانال تزریق به کار رفته کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو گره را انتخاب می‌کند.

در پیاده‌سازی معماری مبتنی بر هم‌بندی پروانه و بدون قابلیت بازپیکربندی - که برای مقایسه پیاده‌سازی شده - از الگوریتم ترتیب بعد<sup>1</sup> استفاده شده است. الگوریتم مسیریابی به کار رفته در این معماری امکان برقراری ارتباط چندپخشی را فراهم نمی‌سازد. پیاده‌سازی الگوریتم اولین جد مشترک سربار محاسباتی و در نتیجه زمانی زیادی را به همراه دارد، به همین دلیل از این الگوریتم استفاده نشده است.

#### **4-3-3-3- مسیریاب نوری**

مسیریاب پیشنهادی باید قادر به برآورده کردن نیازهای مسیریابی هم‌بندی نگاشته شده باشد. به این منظور مسیریاب مورد نیاز برای هر یک را بررسی می‌نماییم. در بیان هم‌بندی معماری پیشنهادی بیان شد که این معماری قابلیت پیاده‌سازی هم‌بندی‌های مسطح و چندپخشی را دارا می‌باشد. از آنجا که در این پایان‌نامه نتایج نگاشت دو هم‌بندی توری مدور و پروانه بیان شده‌اند، ابتدا مسیریاب مورد نیاز برای هر یک را بررسی و سپس مسیریاب نهایی را معرفی می‌کنیم.

---

<sup>1</sup> Dimension Order

مسیریاب مورد استفاده در هم‌بندی توری دوبعدی بدون قابلیت بازیگر بندی دارای پنج درگاه ورودی/خروجی می‌باشد. یک درگاه محلی برای ارتباط با هسته پردازشی (درگاه تزریق/دفع)، و چهار درگاه برای اتصال به چهار گره همسایه در جهت‌های شمال، شرق، جنوب و غرب. بنابراین ساده‌ترین مسیریاب نوری برای استفاده در هم‌بندی توری دوبعدی، یک سوییچ ماتریسی  $5 \times 5$  می‌باشد. در این سوییچ تعداد زیاد ریزحلقه‌ها و تقاطع موج‌برها، موجب مقیاس‌ناپذیری آن می‌شود. برای کاهش تعداد ریزحلقه‌ها، تقاطع موج‌برها و ساده شدن طراحی مسیریاب، گروه طراحان معماری Columbia یک سوییچ  $4 \times 4$  با استفاده از هشت ریزحلقه جهت مسیریابی بسته‌های نوری طراحی کرده‌اند. برای تزریق و دفع پیام به شبکه نیز سوییچ‌های اضافی به معماری Columbia افزوده شده است. این سوییچ‌های اضافه باعث افزایش پیچیدگی طرح شده و سربار توان مصرفی و مساحت را افزایش می‌دهد.

مسیریاب مورد استفاده در هم‌بندی پروانه دارای نه درگاه ورودی/خروجی می‌باشد. یک درگاه محلی برای ارتباط با هسته پردازشی (موسوم به درگاه تزریق/دفع)، و هشت درگاه برای اتصال به هشت گره همسایه احتمالی در جهت‌های شمال، شرق، جنوب و غرب، شمال-شرق، شمال-غرب، جنوب-شرق و جنوب-غرب.

مسیریاب مورد استفاده در معماری پیشنهادی با توجه به در نظر گرفتن هر دو هم‌بندی، دارای نه درگاه ورودی/خروجی می‌باشد. یک درگاه محلی برای ارتباط با هسته پردازشی (موسوم به درگاه تزریق/دفع)، و هشت درگاه برای اتصال به هشت گره همسایه در جهت‌های شمال، شرق، جنوب و غرب، شمال-شرق، شمال-غرب، جنوب-شرق و جنوب-غرب.

برای طراحی مسیریاب نوری در معماری پیشنهادی، همانند معماری Columbia، درگاه تزریق/دفع از عملکرد مسیریابی، جدا در نظر گرفته می‌شود. اما، با این تفاوت که به‌جای طراحی سه سوییچ متفاوت، در اینجا از یک مسیریاب واحد متشکل از دو بخش استفاده می‌کنیم. بخش تزریق (دفع) بسته به (از) شبکه، و بخش مسیریابی بسته در شبکه.

#### 4-3-3-1-1- ریزحلقه‌های تشدیدگر

در فصل 2، ریزحلقه‌های تشدیدگر به عنوان عنصر سویچینگ پایه در طراحی مسیریاب‌های نوری معرفی شدند. در طراحی مسیریاب در معماری پیشنهادی از ریزحلقه‌های تشدیدگر به صورت غیرفعال و با ساختار موازی، برای کاهش توان مصرفی، استفاده شده است. به این ترتیب مسیریاب پیشنهادی دارای سه دسته ریزحلقه متفاوت، متناسب با سه عمل تعریف شده برای بسته در شبکه، خواهد بود:

(1) تزریق بسته به شبکه از طریق مسیریاب مبدأ،

(2) مسیریابی بسته در شبکه توسط مسیریاب‌های میانی،

(3) دفع (دریافت) بسته از شبکه به وسیله مسیریاب مقصد.

بسته پس از تزریق به شبکه، توسط مسیریاب‌های میانی به سمت گره مقصد هدایت می‌شود و در

گره مقصد به وسیله ریزحلقه دفع، از شبکه دریافت و به المان پردازشی تحویل داده می‌شود.

در هم بندی توری دو-بعدی که از الگوریتم مسیریابی XY بهره می‌برد، هشت مسیر مختلف

جهت عبور از یک مسیریاب موجود می‌باشد [Glass\_92]. مسیرهای بدون چرخش و مسیرهای دارای

چرخش به ترتیب در شکل (4-6-الف) و (4-6-ب) نمایش داده شده است. به ازای هر مسیر در شکل

(4-6)، پیکان اول درگاه ورودی به مسیریاب و پیکان دوم درگاه خروجی از مسیریاب را نشان می‌دهد.

در هم بندی پروانه که از الگوریتم مسیریابی اولین جد مشترک بهره می‌برد، شش مسیر مختلف

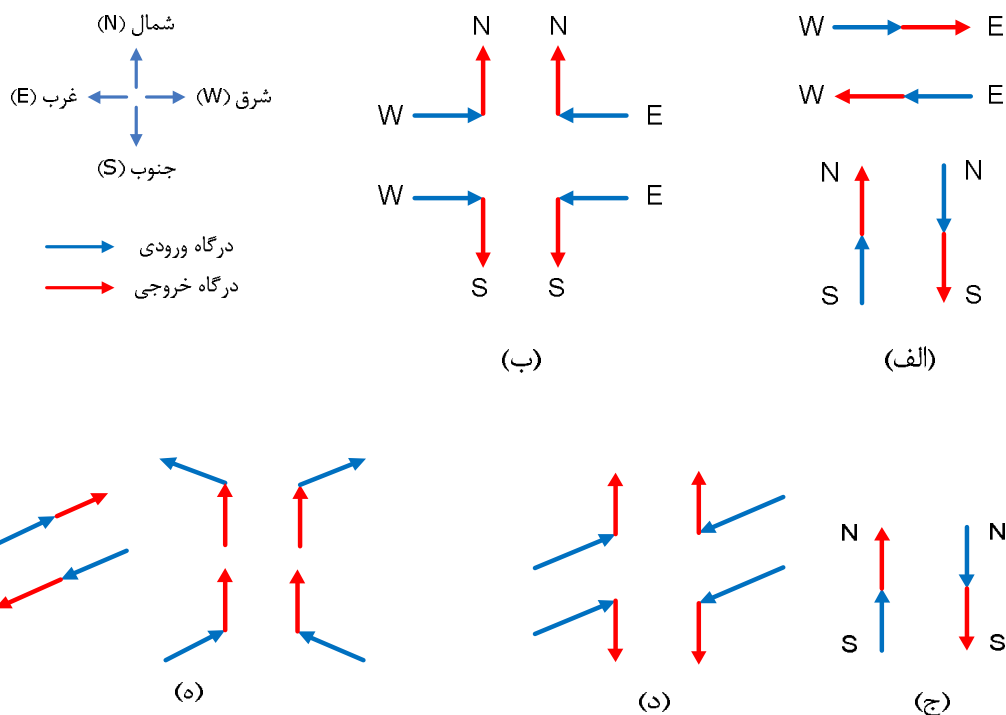
جهت عبور از یک مسیریاب موجود می‌باشد. مسیرهای بدون چرخش و مسیرهای دارای چرخش به

ترتیب در شکل (4-6-ج) و (4-6-د) نمایش داده شده است. در الگوریتم ترتیب بعد که در همبندی

پروانه بدون قابلیت بازیگر بندی استفاده شده است، هشت مسیر مختلف جهت عبور از یک مسیریاب

موجود می‌باشد. مسیرهای بدون چرخش و مسیرهای دارای چرخش به ترتیب در شکل (4-6-ج) و (4-

6-ه) نمایش داده شده است.



شکل 4-6: (الف) مسیرهای موجود در همبندی توری - بدون چرخش، (ب) مسیرهای موجود در همبندی توری - دارای چرخش. (ج) مسیرهای موجود در همبندی پروانه - بدون چرخش، (د) مسیرهای موجود در همبندی پروانه با الگوریتم مسیریابی اولین جد مشترک دارای چرخش، (ه) مسیرهای موجود در همبندی پروانه با الگوریتم ترتیب بعد دارای چرخش

مسیرهای بدون چرخش، بدون نیاز به ریزحلقه قابل انجام هستند و تنها برای مسیرهای دارای چرخش از ریزحلقه تشدیدگر به عنوان عنصر سویچینگ استفاده می شود. چرخش در مسیریاب میانی ای صورت می گیرد که در ستون گره مقصد قرار دارد. به عبارتی، وقتی تعدادی سیگنال نوری با طول موجهای متفاوت وارد یک مسیریاب میانی می شوند، آن دسته از سیگنال های نوری که مقصدشان در ستون مسیریاب میانی قرار دارد، باید توسط ریزحلقه های تشدیدگر به سمت شمال یا جنوب (بسته به سطری که گره مقصد در آن قرار دارد) هدایت شوند. سایر سیگنال های نوری به مسیر خود به سمت

مسیریاب بعدی که در ستون بعد قرار دارد، ادامه می دهند (شکل 4-7). در همبندی پروانه نیز حرکت در راستای قطر به کمک اتصالات قطری قرار داده شده امکان پذیر می گردد و پس از طی مسیر قطری در ستون برابر با ستون گره مقصد بسته به سمت بالا یا پایین هدایت می شود.

بر اساس الگوریتم مسیریابی چهار دسته ریزحلقه تشدیدگر برای مسیریابی مورد نیاز است: ریزحلقه تشدیدگر شمالی ( $^1\text{NMR}$ )، که برای هدایت سیگنال هایی که مقصدشان هم ستون با مسیریاب میانی و در بالای آن قرار دارد، به سمت شمال به کار می رود. ریز حلقه تشدیدگر جنوبی ( $^2\text{SMR}$ )، که سیگنال هایی را که مقصدشان هم ستون و پایین مسیریاب میانی است، به سمت جنوب هدایت می کند. ریزحلقه تشدیدگر شمالی-قطری ( $^3\text{NMRd}$ )، که برای هدایت سیگنال هایی که مقصدشان در شمال-شرق و شمال-غرب قرار دارد، به کار می رود. و ریز حلقه تشدیدگر جنوبی-قطری ( $^4\text{SMRd}$ )، که برای هدایت سیگنال هایی که مقصدشان در جنوب-شرق و جنوب-غرب قرار دارد، به کار می رود.

اگر طول موج گرهایی را که در شمال (بالای) هر گره قرار دارند، با مجموعه  $\lambda_{\text{North}}$ ، طول موج گره های واقع در جنوب (پایین) را با مجموعه  $\lambda_{\text{South}}$ ، طول موج گره های واقع در شمال-شرق و شمال غرب را با مجموعه  $\lambda_{\text{North-d}}$  و طول موج گره های واقع در جنوب (پایین) را با مجموعه  $\lambda_{\text{South-d}}$  نمایش دهیم، در آن صورت ریزحلقه تشدیدگر شمالی به مجموعه طول موج های  $\lambda_{\text{North}}$ ، ریزحلقه تشدیدگر جنوبی به مجموعه طول موج های  $\lambda_{\text{South}}$ ، ریزحلقه تشدیدگر شمالی-قطری به مجموعه طول موج های  $\lambda_{\text{North-d}}$ ، ریزحلقه تشدیدگر جنوبی-قطری به مجموعه طول موج های  $\lambda_{\text{South-d}}$  حساس خواهند بود.

<sup>1</sup> North Microring Resonator

<sup>2</sup> South Microring Resonator

<sup>3</sup> North Microring Resonator-diameter

<sup>4</sup> South Microring Resonator-diameter



ریزحلقه‌های تشدیدگر دفع در هر مسیر یاب باید به طول موج آن مسیر یاب حساس باشند تا سیگنالی را که به سمت مسیر یاب مقصد هدایت شده دریافت کنند. درهم‌بندی های توری دوبعدی و پروانه، دفع بسته با توجه به موقعیت گره‌ها به دو طریق ممکن است (شکل 4-7):

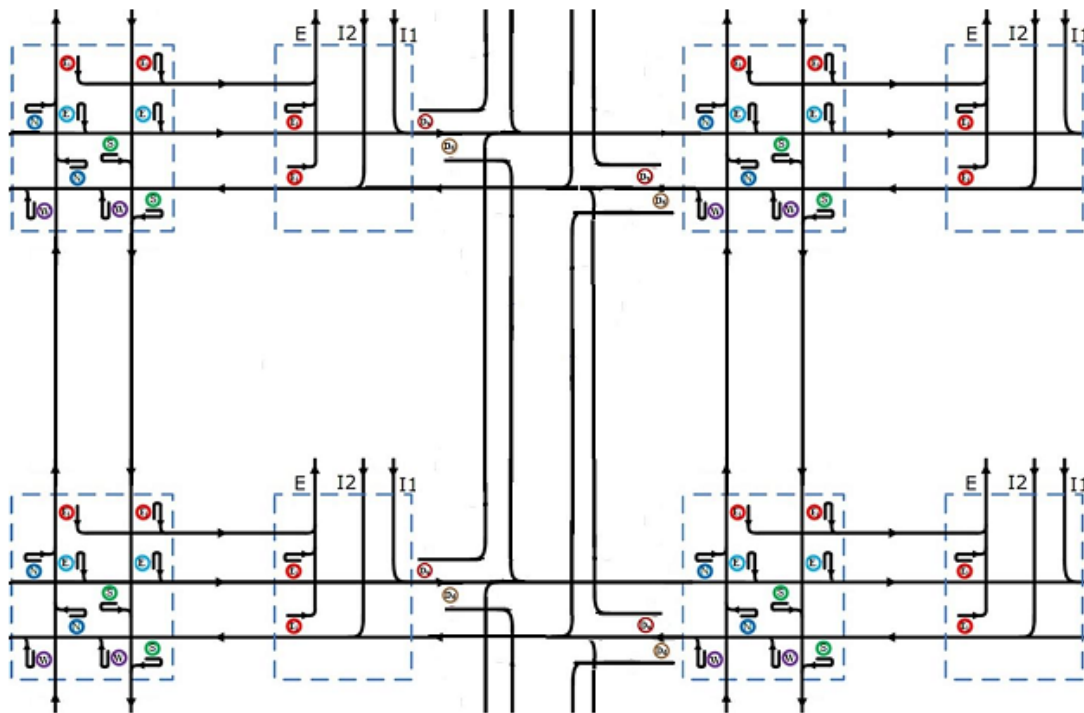
۱. دفع از کانال سطری: گره فرستنده و مقصد در یک سطر قرار دارند. این حالت توسط بخش تزریق/دفع مسیر یاب انجام می‌شود.

۲. دفع از کانال ستونی: گره فرستنده و مقصد در سطریهای متفاوت قرار دارند. بسته هنگام حرکت در کانال ستونی (حرکت از شمال به جنوب یا از جنوب به شمال)، ابتدا وارد بخش مسیریابی در مسیر یاب نوری می‌شود. به همین جهت، برای دریافت سریع‌تر بسته، دفع از کانال ستونی به عملکرد بخش مسیریابی افزوده شده است.

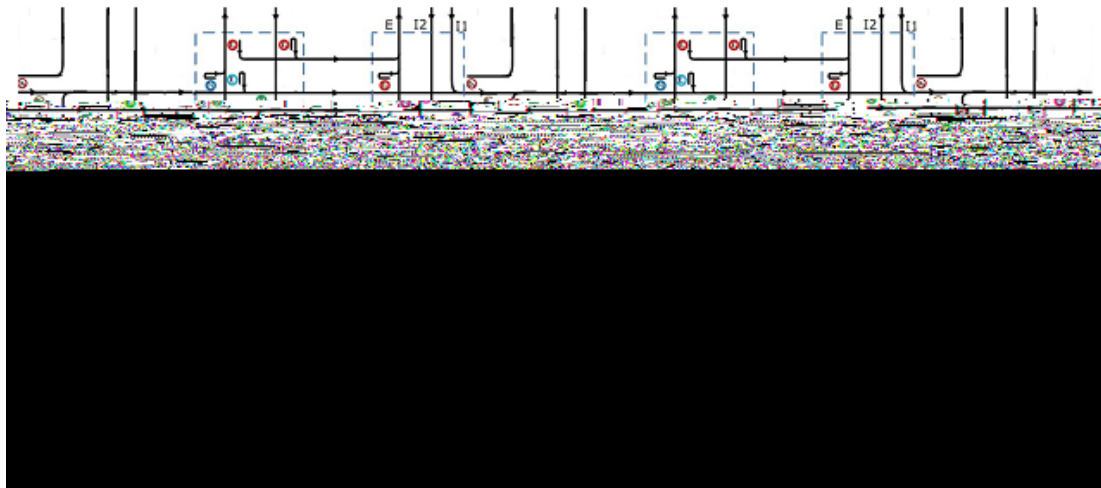
در ادامه، مسیر یاب پیشنهادی را معرفی و پس از آن نحوه‌ی به‌کارگیری ریزحلقه‌های تشدیدگر را در بخش‌های تزریق/دفع و مسیریابی، توضیح داده می‌شوند.

#### **4-3-3-2- مسیر یاب پیشنهادی**

در طراحی مسیر یاب پیشنهادی با توجه به اینکه قصد پیاده‌سازی هم‌بندی‌های مسطح و چندبعدی را داریم باید قادر باشیم کلیه مسیرهایی که به وسیله الگوریتم مسیریابی در هر شبکه لازم است را برقرار سازیم. یک راه این است که کلیه مسیرها بین هر دو گره را در نظر گرفته و براساس آن مسیر یاب را طراحی کنیم. در این حالت مکان پیاده سازی هر الگوریتم مسیریابی وجود دارد ولی سربار زیادی را به همراه دارد. در این روش تعداد ریزحلقه‌ها نسبت به یک مسیر یاب توری سه برابر می‌شود، این موضوع سربار مساحت، تأخیر و توان را به همراه دارد. در شکل (4-8) دو طرح پیشنهادی با این روش نشان داده شده‌اند.



الف

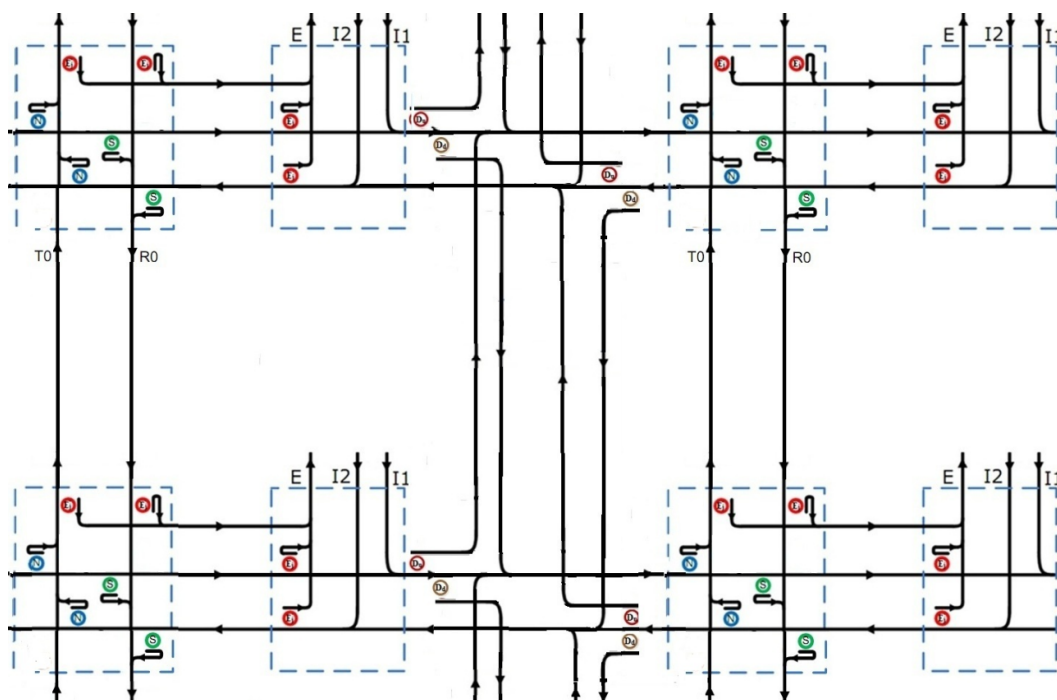


ب

شکل 4-8: دو مسیر یاب پیشنهادی اولیه بر اساس امکان اتصال کلیه گره‌ها

در این دو طرح ارائه شده امکان اتصال بین کلیه گره‌ها در نظر گرفته شده است. این امر امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌های مسیریابی مختلف را فراهم می‌آورد ولی به خاطر تعداد زیاد ریز حلقه‌ها سربار زیادی دارند.

اگر دو طرح ارائه شده را به دقت بررسی کنیم و موارد تخصیص طول موج، الگوریتم‌های مسیریابی، چرخش‌های لازم و اتصالات موجود در هم‌بندی را در نظر بگیریم، به این نتیجه می‌رسیم که برای برقراری امکان ارتباط بین هر دو گره می‌توان از اتصالات موجود در هم‌بندی استفاده کرده و تعداد ریز-حلقه‌ها را کاهش دهیم. به این ترتیب در طرح ارائه شده از مسیریاب نشان داده شده در شکل (4-9) استفاده می‌کنیم.



شکل 4-9: مسیریاب نوری پیشنهادی

این طرح در مقایسه با دو طرح ارائه شده در شکل 4-8 تعداد کمتری ریزحلقه دارد. در ابتدای فصل بیان کردیم که طرح پیشنهادی براساس توری دوبعدی می‌باشد اگر این سه مسیریاب معرفی شده را با مسیریاب به کار رفته در یک هم‌بندی مش دوبعدی اصلاح شده که دارای قابلیت چندپخشی می‌باشد

شکل (10-4) مقایسه کنیم. مشاهده می‌کنیم که طرح نهایی تعداد ریزحلقه کمتری دارد. بیشترین تعداد طول موج عبوری در ریزحلقه‌های اضافه شده در مسیر یاب پیشنهادی، برابر با  $2^{(r-1)}$  می‌باشد. به این ترتیب قطر این ریزحلقه‌ها بسیار کمتر از ریزحلقه‌های به کار رفته در مسیر یاب توری دوبعدی می‌باشد. لازم به ذکر است که در بخش مسیریابی الگوریتم XY برای هم‌بندی توری در معماری پیشنهادی نیز، تعداد طول موج عبوری برابر با  $N/2$  می‌باشد.

در جدول (1-4)، مسیر یاب پیشنهادی با مسیر یاب‌های توری در دو شبکه نوری توری و پروانه بدون قابلیت بازپیکربندی مقایسه شده اند. مسیر یاب‌های توری و پروانه به ترتیب در شکل (10-4) و (4-11) نشان داده شده‌اند. در شکل (11-4)، مسیریابی به کار رفته در شبکه نوری مبتنی بر هم‌بندی پروانه نشان داده شده است. در این مسیر یاب، بخش مسیریابی از هشت ریز حلقه تشکیل شده است و بیشترین تعداد طول موج عبوری از آنها برابر با  $2^{(r-1)}$  می‌باشد.

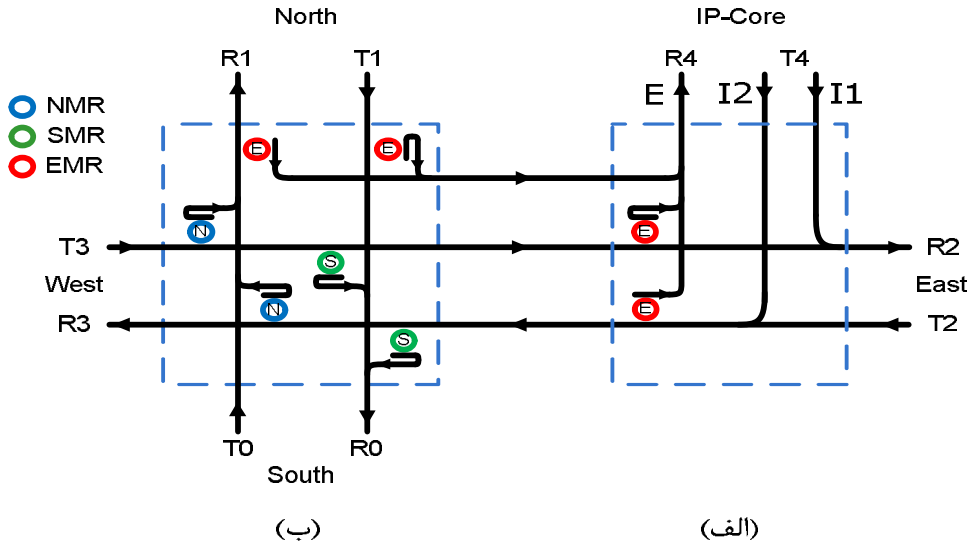
جدول 1-4: مقایسه مسیر یاب پیشنهادی با مسیر یاب نوری دو شبکه نوری توری و پروانه بدون

#### قابلیت بازپیکربندی

پارامترها	تعداد ریز حلقه		فاصله بین دو گره بر حسب mm
	بخش مسیریابی	بخش تزریق و دفع	
مسیر یاب توری-بدون قابلیت بازپیکربندی	4	4	2
مسیر یاب پروانه-بدون قابلیت بازپیکربندی	8	1	2,5
مسیر یاب پیشنهادی	8	4	3

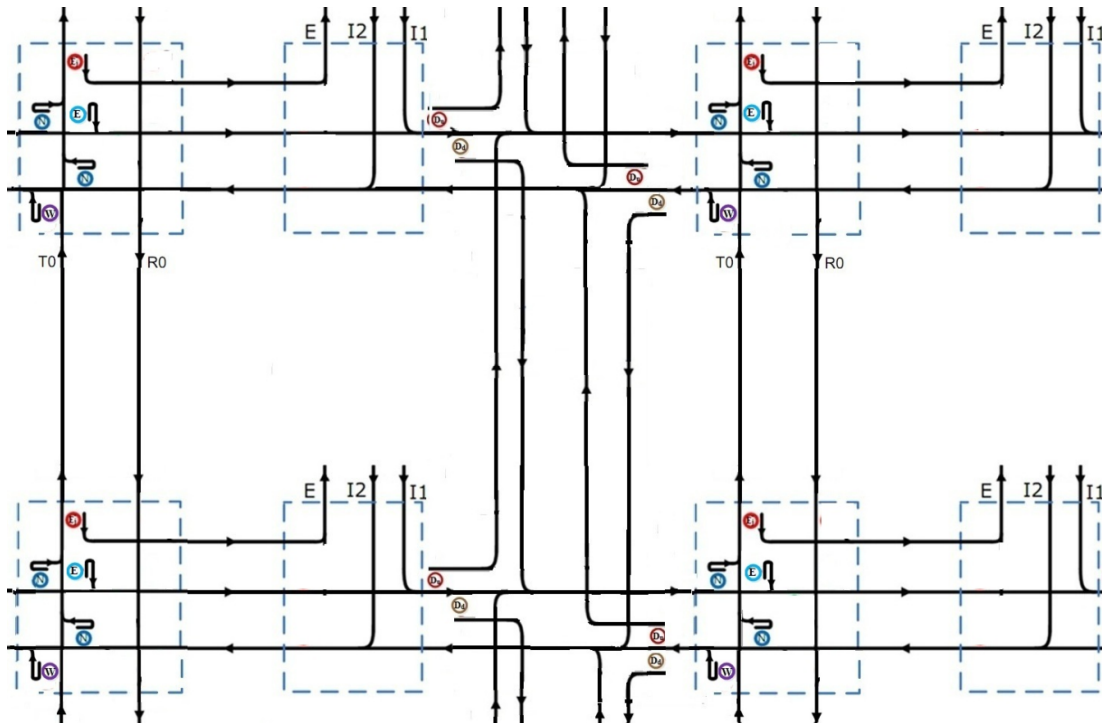
مسیریاب پیشنهادی دارای دو بخش می باشد بخش تزریق/دفع و بخش مسیریابی، در ادامه به

بیان هر یک می پردازیم.



شکل 4-10: مسیریاب نوری به کاررفته در [Shafaei\_10]2D-MM: (الف) بخش تزریق/دفع، (ب)

بخش مسیریابی



شکل 4-11: مسیریاب نوری برای شبکه نوری مبتنی بر همبندی پروانه

#### 4-3-3-1-3-3-1-4- بخش تزریق/دفع

این بخش دارای دو کانال تزریق ( $I_1$  و  $I_2$ ) می‌باشد. هر گره از طریق کانال  $I_1$  داده را به نیمی از گره‌های شبکه که در سمت شرق (راست) آن قرار دارند، ارسال می‌کند. به عبارت دیگر گره  $(x, y)$  از طریق کانال  $I_1$  داده را به گره‌هایی که شماره ستون آنها در بازه‌ی  $\{x+1 \bmod n, \dots, (x + \frac{n}{2}) \bmod n\}$  است، ارسال می‌کند. کانال  $I_2$  برای سایر گره‌ها (از جمله گره‌های هم ستون) استفاده می‌شود. انتخاب کانال تزریق مناسب به صورت الکتریکی و توسط هسته پردازش انجام می‌گردد.

همچنین دو ریزحلقه تشدیدگر دفع، جهت دفع سیگنال‌های نوری از کانال سطری، در بخش تزریق/دفع نیاز است (یکی برای مسیر «شرق-غرب» و دیگری برای مسیر «غرب-شرق»).

#### 4-3-3-1-4- بخش مسیریابی

در مسیریاب پیشنهادی وظیفه‌ی اصلی بخش مسیریابی، تعیین درگاه خروجی مطابق الگوریتم مسیریابی است. بخش مسیریابی از ده ریزحلقه تشکیل شده است: دو ریزحلقه تشدیدگر شمالی و دو ریزحلقه تشدیدگر جنوبی برای مسیریابی بسته در جهت شمال و جنوب، دو ریزحلقه تشدیدگر شمالی-قطری و دو ریزحلقه تشدیدگر جنوبی-قطری برای مسیریابی بسته در جهت قطری در شبکه، و دو ریزحلقه تشدیدگر دفع برای دفع بسته از کانال ستونی و تحویل آن به هسته پردازشی مربوطه. هر کدام از مسیرهای «شمال-جنوب» و «جنوب-شمال»، به یک EMR نیاز دارند. ریزحلقه‌های تشدیدگر به‌گونه‌ای در مسیریاب چیده شده‌اند تا بسته نوری هنگام عبور از مسیریاب، کمترین میزان اتلاف توان را تجربه نماید.

برای رفع مشکل رقابت برای تصاحب یک مسیر به صورت نوری، ریزحلقه‌های تشدیدگر شمالی و جنوبی به صورت فیلترهای نوری اضافه/حذف استفاده شده‌اند. به این ترتیب، می‌توان چندین جریان داده‌ی نوری را روی یک موج‌بر با یکدیگر ترکیب کرد. و در صورت لزوم، با توجه به طول موج‌هایشان از یکدیگر جدا شده و به سمت گره‌های پردازشی مختلف هدایت شوند.

با توجه به این که معماری پیشنهادی امکان ترکیب چند جریان داده‌ی مختلف را روی موج‌برهای نوری فراهم می‌کند، ریزحلقه‌های تشدیدگر باید قابلیت سویچ کردن و فیلتر کردن سیگنال‌های نوری WDM و داده‌های نوری چند طول موجی را داشته باشد.

به بیان دیگر، مسیریاب نوری پیشنهادی باید از ریزحلقه‌هایی استفاده کند که توانایی کار کردن با کارایی بالا روی طیف فرکانس وسیعی را داشته باشند. براساس بررسی صورت گرفته توسط Small et al. [Small\_07]<sup>1</sup>، با افزایش اندازه‌ی ریزحلقه تشدیدگر می‌توان محدوده‌ی طیفی آزاد (FSR)<sup>1</sup> آن را کاهش داد. ریزحلقه‌های تشدیدگر دفع، تنها یک جریان نوری را سویچ و به سمت هسته پردازشی هدایت می‌کنند (جریان نوری که مقصد آن مسیریاب جاری باشد). در نتیجه، FSR ریزحلقه‌های تشدیدگر دفع بیشتر و اندازه‌ی آنها کوچک‌تر از سایر ریزحلقه‌های تشدیدگر معماری است.

مطابق رابطه‌ی (4-2)، حداکثر تعداد جریان نوری که ریزحلقه تشدیدگر شمالی یا جنوبی باید سویچ کند برابر با  $m - 1$  در هم‌بندی توری و  $2^{(r-1)}$  در هم‌بندی پروانه است. در معماری پیشنهادی به خاطر داشتن هر دو هم‌بندی، این مقدار ی برابر با  $2^{(r-1)} + (m-1)$  می‌باشد. هرچند FSR برای این دسته از ریزحلقه‌های تشدیدگر کوچک است که موجب بزرگ شدن اندازه آنها نسبت به ریزحلقه‌های تشدیدگر دفع می‌شود، با این حال این مقدار اندکی بیشتر از مجذور تعداد گره‌های شبکه است. این مسئله به حفظ ویژگی مقیاس‌پذیری معماری کمک می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، در مسیریاب پیشنهادی امکان ترکیب جریان‌های نوری متفاوت بر روی یک موج‌بر وجود دارد. به علاوه، در صورت نیاز می‌توان یک جریان نوری خاصی را بر اساس طول موجش، از سایر جریان‌های نوری جدا کرد تا در مسیری متفاوت به حرکت خود ادامه دهد. نمونه‌های مختلفی از ترکیب و فیلتر شدن جریان‌های نوری در شکل (4-9) قابل مشاهده است. این ویژگی که از ترکیب تکنیک WDM و مسیریابی طول موج حاصل شده است، به عنوان راه‌حلی نوین جهت پیاده‌سازی ارتباطات چندپخش‌ی در معماری پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است.

---

<sup>1</sup> Free Spectral Range

گره فرستنده، به ازای هر مقصد بسته چندپخشی، یک جریان نوری مجزا روی طول موج گره مقصد در شبکه تزریق می‌کند. جریان‌های نوری همانند روش‌های مبتنی بر درخت (بخش 3-1-2)، در یک مسیر مشترک حرکت کرده، در هر ستون جریان‌های نوری که مقصدشان در آن ستون است، از مسیر مشترک خارج و در راستای ستون به طرف مقصد هدایت می‌شوند. به این ترتیب، برای هر مقصد در بسته چندپخشی، همواره کوتاه‌ترین مسیر پیموده خواهد شد.

هنگام استفاده از اتصالات نوری، محدودیتی در حداکثر تعداد طول موج قابل تسهیم بر روی یک موج‌بر نوری وجود دارد. در [Vantrease\_08] پیش‌بینی شده است که در فناوری 22 nm، حداکثر 64 طول موج متمایز را می‌توان روی یک موج‌بر ارسال کرد. در معماری پیشنهادی، با کمک مسیریابی طول موج و تکنیک WDM، جریان‌های نوری متعددی را می‌توان روی یک موج‌بر ترکیب نمود. لذا، باید حداکثر تعداد جریان نوری قابل ترکیب روی یک موج‌بر را بدست آورد تا بر اساس آن بتوان تعداد طول موج اختصاصی به هر جریان نوری را محاسبه کرد. حداکثر تعداد جریان نوری ترکیب شده روی یک موج‌بر را  $MDM^1$  می‌نامیم [Koochi\_09].

الگوریتم مسیریابی به کار رفته در شبکه بر روی مسیر طی شده توسط هر کدام از جریان‌های نوری، و در نتیجه بر روی مقدار MDM مؤثر است. بنابراین، با توجه به همبندی و الگوریتم مسیریابی، مقدار MDM تغییر می‌کند. مقدار MDM برای همبندی  $m \times n$  2D-MM که از الگوریتم XY بهره می‌برد، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

با توجه به الگوریتم XY، جریان‌های نوری ابتدا در راستای محور X (بر روی یک کانال سطری) حرکت می‌کنند. با این فرض که هر گره تنها یک جریان داده در هر زمان ارسال می‌کند، و همچنین با توجه به این‌که گره‌های هر سطر به صورت یک حلقه به هم متصل شده‌اند، به راحتی می‌توان نشان داد که مقدار MDM در کانال‌های سطری برابر با نصف تعداد گره‌های موجود در سطر است.

---

<sup>1</sup> Maximum Degree of Multiplexing

جریان‌های نوری، پس از رسیدن به ستون مقصد، در راستای محور  $Y$  (بر روی یک کانال ستونی) به سمت گره مقصد حرکت می‌کنند. از آنجا که هر گره در هر لحظه می‌تواند تنها یک جریان نوری دریافت کند (یادآوری می‌شود که این محدودیت به دلیل استفاده از مسیریابی طول موج به شبکه تحمیل شده است)، و با توجه به این که گره‌های هر ستون به صورت یک آرایه خطی به یکدیگر متصلند، لذا مقدار MDM برای کانال‌های ستونی برابر با تعداد گره‌های ستون است.

در نتیجه، با ترکیب مقدار MDM برای کانال‌های سطری و ستونی، می‌توان رابطه‌ی (3-4) را

بدست آورد که مقدار MDM را برای یک شبکه مبتنی بر هم‌بندی  $m \times n$  2D-MM محاسبه می‌کند:

$$MDM(m \times n \text{ 2DMM}) = \max\left(\frac{n}{2}, m\right) \quad (3-4)$$

و اگر  $m = n = N$ ، آنگاه:

$$MDM(N \times N \text{ 2DMM}) = N \quad (4-4)$$

رابطه‌ی (4-4) بیان می‌کند که در یک شبکه  $N \times N$  2D-MM، حداکثر تعداد جریان نوری متمایز که ممکن است از روی یک کانال عبور کند، برابر با  $N$  است. با توجه به این که حداکثر تعداد 64 طول موج مختلف را می‌توان روی یک موج‌بر مدوله کرد، لذا در شبکه  $N \times N$  2D-MM به هر جریان نوری می‌توان تعداد  $\frac{64}{N}$  طول موج تخصیص داد. این طول موج‌ها برای افزایش پهنای باند و در نتیجه کاهش تأخیر ارسال جریان‌های نوری استفاده می‌شود (کاربرد دیگر تکنیک WDM در معماری پیشنهادی). به عنوان مثال، در یک شبکه  $8 \times 8$  2D-MM، هر جریان نوری را با هشت طول موج متمایز می‌توان ارسال کرد.

در همبندی پروانه با توجه به داشتن دو کانال تزریق و تعداد کل طول موج‌ها، درجه تسهیم

برابر با  $2^{(r-1)}$  می‌باشد.

#### 4-2- معماری شبکه کنترلی

در بخش گذشته، معماری شبکه داده و مسیریاب نوری مورد استفاده در آن توضیح داده شد. در شبکه داده، با توجه به مسیریابی طول موج، آدرس گره مقصد توسط طول موج سیگنال ارسالی تعیین می‌شود. بنابراین، اگر دو گره (یا بیشتر) به‌طور هم‌زمان به‌سمت یک گره مشترک داده ارسال کنند، داده‌ها در گره مقصد دچار تداخل می‌شود. برای جلوگیری از تداخل داده‌ها، هر گره قبل از ارسال داده باید وضعیت گره مقصد را بررسی کند. در صورتی که گره مقصد آزاد باشد (در حال دریافت داده از گره دیگر نباشد یا برای دریافت داده از گره دیگر رزرو نشده باشد)، آنگاه فرستنده مجاز است بسته داده را از طریق شبکه داده ارسال نماید.

بسته واریسی مقصد توسط شبکه کنترلی برای بررسی وضعیت گره مقصد ارسال می‌شود. در شبکه کنترلی، هر گره باید قادر باشد به‌طور هم‌زمان از بیش از یک گره بسته واریسی مقصد را دریافت کند. به همین جهت، پیاده‌سازی شبکه کنترلی به صورت یک crossbar نوری خواهد بود. تاکنون معماری‌های متفاوتی مبتنی بر crossbar نوری ارائه شده‌اند (فصل 3-2)، که تعداد زیاد منابع نوری مورد نیاز جهت ساخت crossbar سبب مقیاس‌ناپذیری این معماری‌ها شده است. در معماری پیشنهادی با استفاده از طراحی سلسله مراتبی و به اشتراک‌گذاری منابع، یک crossbar مقیاس‌پذیر برای شبکه کنترلی پیاده‌سازی می‌شود. از طرفی معماری‌های اشاره شده در فصل 3-2، برای ارسال بسته‌های داده پیاده‌سازی شده‌اند.

حال آن‌که شبکه کنترلی تنها برای ارسال بسته‌های کوچک واریسی مقصد به‌کار می‌رود که این امر تاثیر مهمی در کاهش توان مصرفی در crossbar خواهد داشت.

#### 4-2-1- واحد کنترل

ساخت crossbar نوری به تعداد زیادی عناصر نوری مانند مدولاتور، موج‌بر و آشکارساز نوری نیاز دارد. برای کاهش عناصر نوری مورد نیاز، از یک ساختار سلسله مراتبی برای ساخت شبکه کنترلی

استفاده می‌شود. به این معنی که هسته‌های پردازشی به گروه‌های چهارتایی تقسیم می‌شوند. به هر گروه یک "واحد کنترل" اختصاص می‌یابد. هسته‌های پردازشی از طریق یک اتصال محلی الکتریکی، به واحد کنترل خود متصل می‌شوند. اما واحدهای کنترلی توسط crossbar نوری با یکدیگر در ارتباط هستند. وظیفه واحد کنترل آن است که وضعیت چهار هسته پردازشی متصل به خود را کنترل نماید. به عبارتی، واحد کنترل باید بداند که آیا هر یک از چهار هسته پردازشی، در حال حاضر آماده دریافت داده است (وضعیت آزاد) یا در حال حاضر نمی‌توند داده دریافت کند (وضعیت مشغول). به این ترتیب، فرستنده بسته واریسی مقصد را ابتدا برای واحد کنترل خود ارسال می‌کند. اگر مقصد در همان گروه باشد، واحد کنترل پاسخ را برای فرستنده مهیا می‌کند. در غیر این صورت، بسته واریسی مقصد از طریق شبکه کنترلی (crossbar نوری) به واحد کنترل مقصد فرستاده می‌شود. بنابراین، crossbar نوری تنها برای اتصال واحدهای کنترلی به کار می‌رود. از آنجا که تعداد واحدهای کنترلی یک چهارم تعداد گره‌های شبکه است، این مسئله موجب کوچک شدن crossbar نوری و کاهش عناصر نوری موردنیاز خواهد شد.

#### 4-2-2- پیاده‌سازی Crossbar نوری مقیاس پذیر

برای پیاده‌سازی یک crossbar نوری، روش‌های متفاوتی ارائه شده اند که در اینجا سه نمونه را بررسی می‌کنیم.

در معماری Cornell [Kirman\_06]، crossbar نوری شامل یک گذرگاه نوری به صورت چند نویسنده-چند خواننده (MWMR) است. از آنجا که تمام گره‌های شبکه به این گذرگاه متصل هستند و هر کدام یک طول موج اختصاصی برای ارسال داده دارد، همه گره‌ها هم‌زمان می‌توانند داده ارسال کنند. داده‌های بر روی گذرگاه توسط همه گره‌ها دریافت می‌شود. در نتیجه، آدرس گره مقصد در سرآیند بسته‌های ارسال مشخص می‌شود.

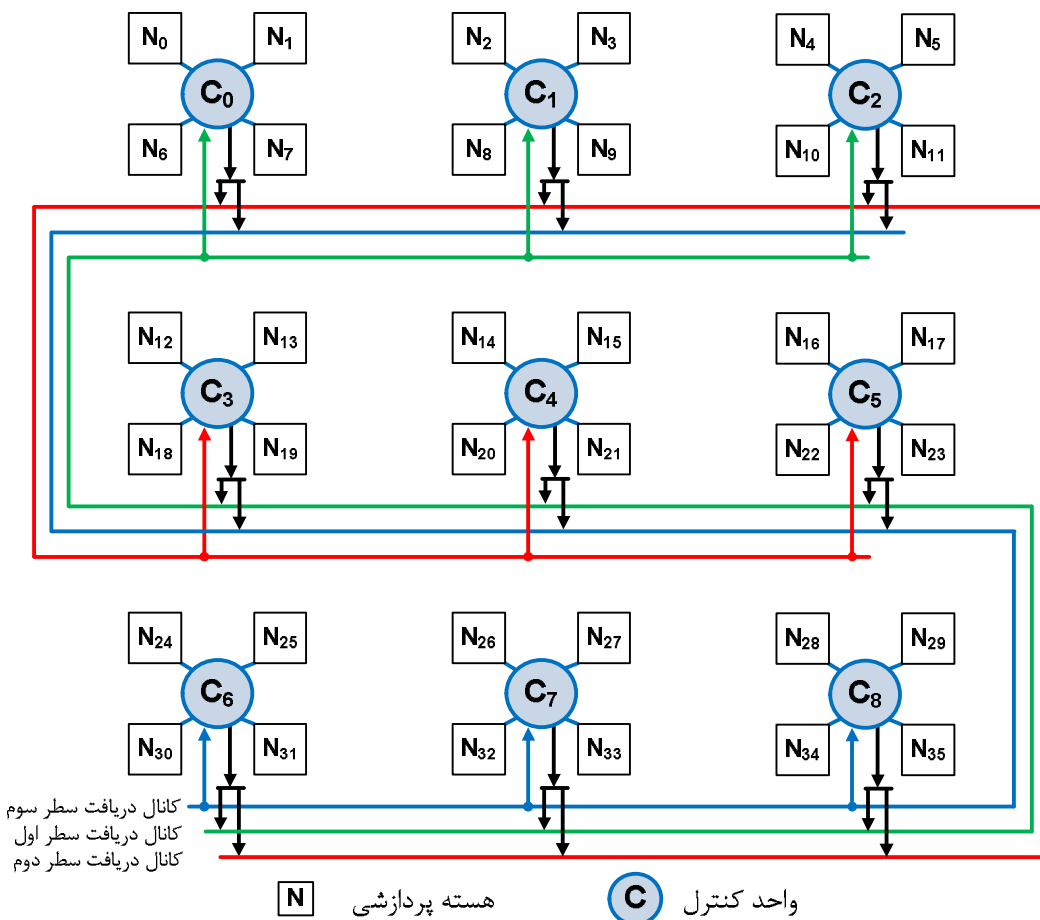
در معماری Corona [Vantrease\_08]، هر گره یک کانال اختصاصی برای دریافت داده از گره‌های دیگر دارد. بنابراین، تعداد گذرگاه‌های نوری مورد نیاز برابر با تعداد گره‌های شبکه است.

در معماری [Shafaei\_10]2d-mm، گره‌های شبکه گروه‌بندی شده و برای هر گروه، یک کانال اختصاصی برای دریافت داده از گره‌های دیگر در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، برای گره‌های موجود در یک سطر، یک کانال دریافت اختصاص داده می‌شود. برای ارسال داده به گره مقصد، فرستنده سیگنال نوری را بر روی کانال دریافت سطر مقصد قرار می‌دهد. از آنجا که سیگنال نوری توسط تمام گره‌های سطر دریافت می‌شود، آدرس گره مقصد نیز بایستی در سرآیند بسته ارسالی تعیین شود. (برای مشخص کردن یک گره در یک سطر، ذکر شماره ستون آن کافی می‌باشد).

اگر فرض کنیم که گره‌های شبکه به صورت یک آرایه دو-بعدی  $N \times N$  در تراشه چیده شده‌اند، در آن صورت هزینه سخت‌افزاری (تعداد موج‌برهای نوری موردنیاز برای ساخت crossbar نوری)، در روش اول  $O(1)$ ، روش دوم  $O(N^2)$  و روش سوم  $O(N/2)$  خواهد بود. هر چند هزینه سخت‌افزاری روش اول بسیار پایین می‌باشد، اما چون ارسال داده همواره به صورت همه‌پخشی انجام می‌شود، توان مصرفی بالایی دارد.

توان مصرفی بالا در روش اول و هزینه سخت‌افزاری فراوان در روش دوم، به مقیاس‌پذیری این دو روش آسیب می‌رساند. به همین جهت، برای ساخت شبکه کنترلی در معماری پیشنهادی، از روش سوم استفاده می‌شود. طبق روش سوم، واحدهای کنترل موجود در یک سطر دارای یک کانال اختصاصی برای دریافت بسته‌های واریسی مقصد از واحدهای کنترل دیگر خواهند بود.

به این ترتیب، با استفاده از به اشتراک‌گذاری منابع، و با ارائه یک ساختار سلسله‌مراتبی، یک crossbar نوری مقیاس‌پذیر برای ارسال بسته‌های واریسی مقصد پیشنهاد می‌گردد. شکل (4-12)، crossbar نوری ایجاد شده برای اتصال واحدهای کنترل در معماری پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این شکل، کانال دریافت هر سطر به‌گونه‌ای در سطح تراشه طراحی می‌شود تا واحدهای کنترل گیرنده (یعنی واحدهای کنترل در سطر متناظر) در انتهای کانال قرار بگیرند.



شکل 4-12: معماری شبکه کنترلی، [Shafaei\_10]

#### 3-2-4- بسته واریسی مقصد

هدف از طراحی شبکه کنترلی، آگاهی یافتن از وضعیت گره مقصد پیش از ارسال داده می‌باشد. از این رو در شبکه کنترلی، تنها بسته‌های واریسی مقصد جابجا می‌شوند. دو نوع بسته واریسی مقصد در شبکه کنترلی وجود دارد: بسته درخواست و بسته پاسخ. فرستنده، پیش از ارسال داده برای آگاهی از وضعیت گره مقصد بسته درخواست را از طریق شبکه کنترلی ارسال می‌کند. این بسته توسط واحد کنترل گره مقصد دریافت می‌شود. واحد کنترل در پاسخ، یک بسته پاسخ به واحد کنترل گره آغازگر می‌فرستد. در این بسته وضعیت گره مقصد مشخص می‌شود که مقصد در حال حاضر آزاد (آماده دریافت داده است) یا مشغول (قادر به دریافت داده نیست) می‌باشد.

از طرفی، بسته واری مقصد می‌تواند برای یک ارتباط تک‌پخشی (ارسال به یک گره) یا ارتباط چندپخشی (ارسال به چندین گره) فرستاده شود. بسته واری مقصد برای ارتباط تک‌پخشی، وضعیت فقط یک گره مقصد را بررسی می‌کند. و برای ارتباط چندپخشی، وضعیت بیش از یک گره (حداقل دو و حداکثر به تعداد گره‌های شبکه) باید بررسی شود. در این حالت، بسته واری مقصد برای گره‌های مقصد مختلف، جداگانه ارسال می‌گردد. البته، برای گره‌های متصل به یک واحد کنترل، یک درخواست مشترک ارسال می‌شود.

آدرس هسته پردازی و آدرس واحد کنترلی که درخواست را فرستاده‌اند، درون بسته درخواست گنجانده می‌شود، به این ترتیب گیرنده می‌تواند پاسخ را به گره درخواست‌کننده ارسال کند. گیرنده با توجه به طول موج دریافتی نیز می‌تواند آدرس گره درخواست‌کننده را شناسایی نماید. در این حالت هر واحد کنترل باید جدولی شامل طول موج تمام هسته‌های پردازی را نزد خود نگه دارد که به افزایش مساحت و توان مصرفی در واحد کنترل منجر خواهد شد.

#### **4-2-4- تخصیص طول موج به واحدهای کنترل**

در شبکه کنترلی، هر واحد کنترل با چهار هسته پردازی به صورت محلی در ارتباط است. هر واحد کنترل مسئول ارسال بسته‌های واری مقصد برای چهار هسته پردازی متصل به خود می‌باشد. در هر واحد کنترل، برای هر هسته پردازی یک طول موج در نظر گرفته شده است. به این ترتیب واحد کنترل قادر است بسته‌های واری مقصد چهار هسته پردازی را به‌طور هم‌زمان ارسال کند. و هر هسته پردازی نیز به کمک طول موج اختصاصی خود می‌تواند مستقل از هسته‌های دیگر، بسته واری مقصد را ارسال کند. از سوی دیگر هر هسته پردازی، با همان تک طول موج اختصاصی قادر است چندین بسته واری مقصد را هم‌زمان روی تعدادی از (یا تمام) کانال‌های دریافت سطری ارسال نماید. اما نمی‌تواند برای دو گره که در یک سطر قرار دارند، هم‌زمان بسته واری مقصد را بفرستد.

در معماری پیشنهادی بسته‌های تک‌پخشی و چندپخشی به صورت هم‌زمان ارسال می‌شوند و از سوی دیگر، بسته واریسی مقصد در ارتباط چندپخشی برای واحدهای کنترل مقصد به صورت جداگانه ارسال می‌گردد، به این ترتیب امکان ارسال هم‌زمان دو بسته واریسی مقصد مختلف برای دو گره در یک سطر وجود دارد. به همین جهت، برای جلوگیری از کاهش کارایی شبکه کنترلی در چنین مواردی، ارسال بسته‌های واریسی مقصد به صورت پایلاین انجام خواهد شد. بدین معنی که هسته پس از ارسال اولین بسته، منتظر پاسخ آن نمی‌ماند تا بسته بعدی را ارسال کند. بلکه، در پالس ساعت بعدی، دومین بسته واریسی مقصد را ارسال می‌نماید.

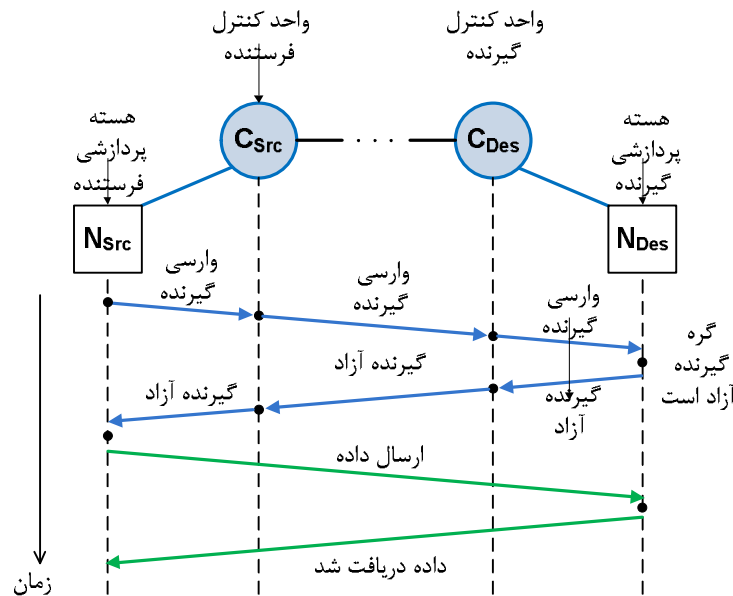
#### 4-3- ارسال داده

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، به ازای هر چهار هسته پردازشی، یک واحد کنترل در نظر گرفته شد. شبکه کنترلی برای ارسال بسته‌های واریسی مقصد به کار می‌رود. در این شبکه واحدهای کنترل از طریق crossbar نوری مقیاس‌پذیر با یکدیگر در ارتباط هستند. همچنین هر هسته پردازشی به یک مسیر یاب نوری متصل است. مسیر یاب‌های نوری نیز بر اساس هم‌بندی RCNoC به یکدیگر متصل هستند و به این ترتیب، شبکه داده را برای ارسال بسته‌های داده تشکیل می‌دهند.

فرستنده برای ارسال داده، ابتدا بسته واریسی مقصد را به وسیله شبکه کنترلی ارسال کرده و منتظر پاسخ آن می‌ماند. در صورتی که گره مقصد در وضعیت آزاد باشد، آنگاه داده بر روی طول موج گره مقصد مدوله و از طریق شبکه داده ارسال می‌شود (شکل 4-13). آزاد بودن گره به این معناست که گره در حال حاضر داده‌ای از گره‌های دیگر دریافت نمی‌کند و فرستنده می‌تواند برای آن داده ارسال کند. اما، اگر مقصد در حال دریافت داده از فرستنده دیگری باشد، در این صورت مقصد در وضعیت مشغول قرار دارد (نمی‌تواند از گره‌های دیگر داده دریافت کند).

در صورتی که گره مقصد در وضعیت مشغول باشد، به دو شیوه می‌توان برای ارسال دوباره داده اقدام کرد. روش اول، ارسال مجدد بسته واریسی مقصد توسط فرستنده است. فرستنده در یک بازه‌ی

زمانی صبر کرده، سپس مجدداً بسته واریسی مقصد را ارسال می‌کند. طول بازه‌ی زمانی انتظار روی تأخیر ارسال داده و در نتیجه کارایی کل شبکه تأثیرگذار است. اندازه‌ی بسیار کوچک بازه‌ی زمانی انتظار باعث افزایش تعداد بسته‌های واریسی مقصد می‌شود و از سوی دیگر اندازه‌ی بسیار بزرگ آن باعث کاهش کارایی شبکه و اتلاف منابع نوری آزاد شده می‌شود. بنابراین، بهینه‌سازی طول این بازه نقش مهمی در کاهش تأخیر ارسال داده بر عهده دارد. روش دوم، ذخیره موقت آدرس گره درخواست کننده توسط گره مقصد می‌باشد. گره مقصد، پس از دریافت بسته واریسی مقصد و در صورتی که در وضعیت مشغولی قرار داشته باشد، پاسخی مبنی بر مشغول بودن به فرستنده ارسال نمی‌کند. در این روش آدرس گره فرستنده را در یک صف FIFO<sup>1</sup>، نزد خود ذخیره می‌کند. پس از اتمام دریافت داده قبلی و آزاد شدن گره مقصد، پاسخ بسته واریسی مقصد، به آدرس اولین گره موجود در صف FIFO ارسال می‌شود. شکل‌های (4-14-الف) و (4-14-ب)، نحوه مقابله با وضعیت مشغولی گره مقصد را به ترتیب در روش‌های ارسال مجدد و ذخیره موقت نشان می‌دهند.



شکل 4-13: ارسال داده در وضعیت آزاد

<sup>1</sup> First In, First Out

در روش ارسال مجدد (روش اول)، اگر گره مقصد در بازه‌ی زمانی انتظار فرستنده آزاد شود با وجود اینکه گره مقصد آماده دریافت داده است فرستنده از این موضوع آگاه نمی‌شود و نمی‌تواند برای ارسال داده اقدام کند (چون در بازه‌ی انتظار است). در نتیجه، فرستنده دیرتر از زمان مقرر، داده را ارسال می‌کند. همچنین ارسال پی‌درپی بسته‌های وارسی مقصد منجر به افزایش توان مصرف شده در شبکه کنترل می‌شود.

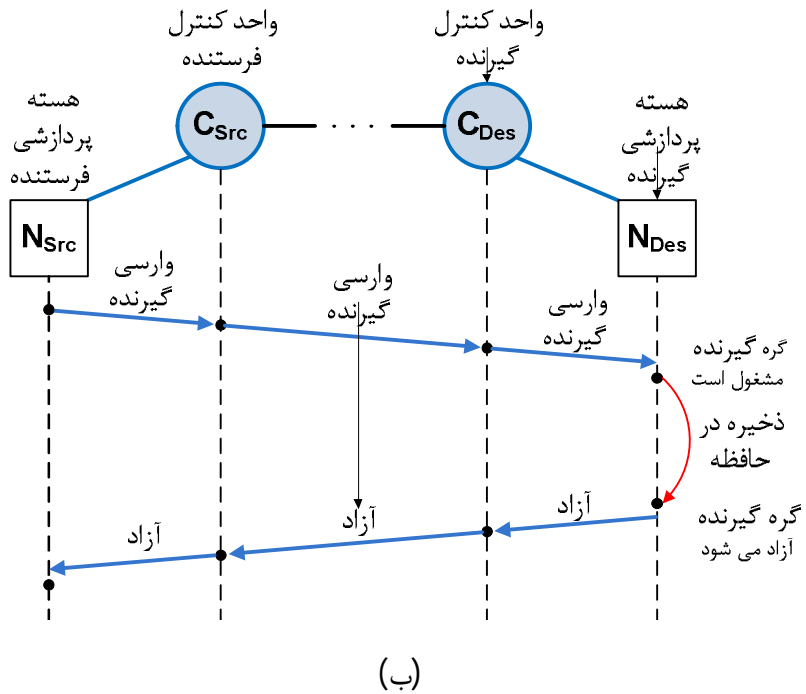
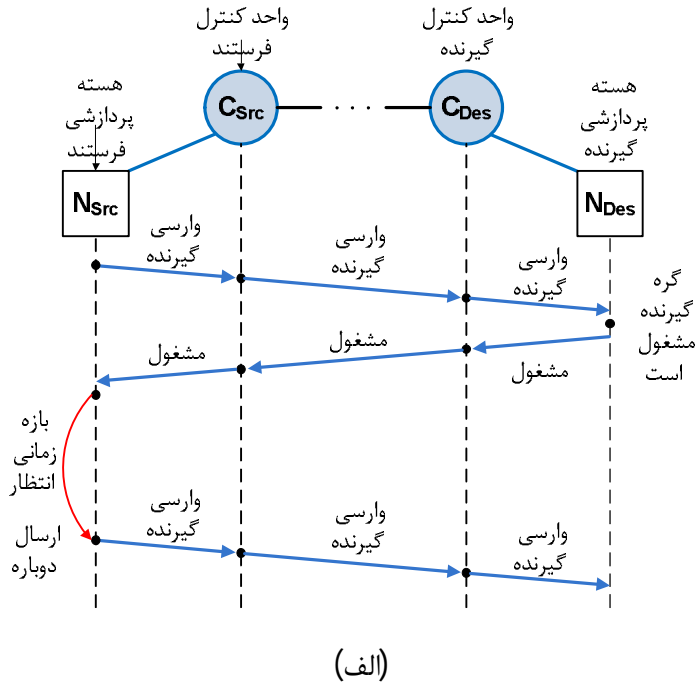
در روش ذخیره موقت (روش دوم)، فرستنده در اولین زمان ممکن، داده را به‌سوی گیرنده ارسال می‌کند. ضمن آن‌که تنها یک مرتبه بسته وارسی مقصد ارسال می‌شود. برای پیاده‌سازی روش دوم نیاز به ساخت حافظه میانگیر (برای طراحی صف FIFO) در هر گره می‌باشد.

از آنجا که هر گره در هر لحظه، قصد ارسال تنها یک داده را دارد و تا زمانی که داده جاری ارسال نشود، داده جدیدی از هسته پردازشی نمی‌خواند در نتیجه، هر گره امکان دریافت یک بسته وارسی مقصد از دیگر گره‌های شبکه را دارد.

به این ترتیب، حداکثر تعداد خانه‌های حافظه میانگیر در هر گره برابر با  $N - 1$  است ( $N$ : تعداد گره‌های شبکه). همچنین هر خانه از حافظه برای ذخیره آدرس یک گره می‌باشد. در یک شبکه با  $N$  گره، هر خانه از حافظه به  $\log_2(N)$  بیت نیاز خواهد داشت. بنابراین اندازه حافظه میانگیر در هر گره برابر با  $(N - 1) \cdot \log_2(N)$  بیت است. شکل (4-15) ساختار حافظه میانگیر را نشان می‌دهد.

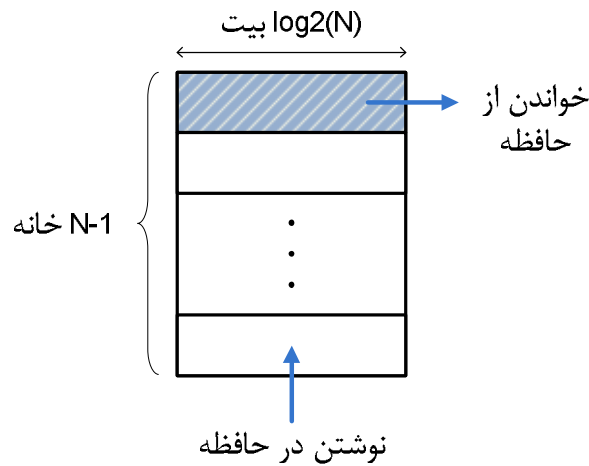
روش ذخیره موقت، در مجموع به  $(N - 1) \cdot \log_2(N)$  بیت برای ساخت حافظه در گره‌های شبکه نیاز دارد. در روش ذخیره موقت، با ارسال به‌موقع داده‌ها، کارایی شبکه بهبود می‌یابد. با این حال، به دلیل نیاز به این حجم از حافظه، مساحت و توان مصرفی تراشه را افزایش می‌دهد.

در معماری پیشنهادی از ترکیب هر دو روش ارسال مجدد و ذخیره موقت استفاده خواهد شد. برای کنترل کردن سربار مساحت و توان مصرفی ناشی از حافظه، محدودیتی در اندازه حافظه میانگیر در نظر گرفته می‌شود.



شکل 4-14: الف- نحوه برخورد با وضعیت مشغول در روش ارسال مجدد، ب- نحوه برخورد با وضعیت مشغول در روش ذخیره موقت

به این ترتیب هر گره دارای  $K$ ،  $(0 \leq K \leq N - 1)$  خانه است. به ازای  $K = 0$ ، روش ارسال مجدد، و به ازای  $K = N - 1$ ، روش ذخیره موقت حاصل خواهد شد. در روش ترکیبی اگر گره مقصد در حال دریافت داده (وضعیت مشغول) باشد، یک بسته واریسی مقصد از طریق شبکه کنترلی دریافت می‌کند. اگر حافظه میانگیر خالی داشته باشد، آدرس گره درخواست‌کننده را ذخیره می‌کند. در غیر این صورت، پاسخی مبنی بر پر بودن حافظه میانگیر برای گره درخواست‌کننده



شکل 4-15: ساختار حافظه میانگیر در هر گره، [Shafaei\_10]

ارسال می‌کند تا گره درخواست‌کننده، پس از مدت زمانی، مجدداً بسته واریسی مقصد را ارسال نماید. با توجه به نتایج  $8 \times 8$  2D-MM [Shafaei\_10]، کم‌ترین تأخیر (یا به عبارتی، بهترین کارایی)، در روش ترکیبی با مقدار 63 (روش ذخیره موقت) دیده می‌شود. با این حال، تسریع روش ذخیره موقت نسبت به روش ترکیبی با مقدار 1، در ترافیک یکنواخت حدود  $1/05$  می‌باشد که این مقدار تسریع اندک، به قیمت 63 برابر کردن تعداد خانه‌های حافظه در هر گره حاصل می‌شود. به همین جهت، از روش ترکیبی با مقدار 1 که از کارایی و توان مصرفی مطلوبی برخوردار است، استفاده خواهد شد. در این فصل، معماری تمام-نوری پیشنهادی برای پیاده‌سازی قابلیت بازپیکربندی توضیح داده شد. برای ارزیابی دقیق‌تر، در فصل بعد به شبیه‌سازی شبکه نوری پیشنهادی و مقایسه آن با بهترین

NoC الکتریکی متناظر، شبکه نوری مبتنی بر هم‌بندی توری-دو بعدی و شبکه نوری مبتنی بر هم‌بندی پروانه خواهیم پرداخت.

#### 4-4- ویژگی‌های معماری پیشنهادی

در معماری پیشنهادی از تکنیک WDM و مسیریابی طول موج استفاده شده است. این تکنیک در شبکه‌های نوری امکان ارسال هم‌زمان چندین سیگنال نوری با طول موج‌های مختلف بر روی یک موج‌بر نوری فراهم می‌آورد. این تکنیک پهنای باند را افزایش و تاخیر را کاهش می‌دهد. در این روش فرستنده داده را بر روی طول موج‌های مختلف مدوله و به سمت گره مقصد ارسال می‌کند. در این حالت، مقصد تمام طول موج‌ها، می‌تواند یک گره مشخص باشد. و یا به کمک مسیریابی طول موج، می‌توان سیگنال‌های نوری با طول موج‌های مختلف را به سوی گره‌های مقصد متفاوت ارسال کرد. به این ترتیب با ترکیب تکنیک WDM و مسیریابی طول موج امکان پیاده‌سازی ارتباطات چندپخشی فراهم می‌شود. از سوی دیگر در این شبکه مشکل رقابت به صورت نوری برطرف می‌شود. همچنین مسیریابی طول موج می‌تواند زمینه استفاده از عناصر سویچینگ نوری به صورت غیر فعال را فراهم کند که نقش بسزایی در کاهش توان مصرفی شبکه دارد.

**مقیاس‌پذیری:** یکی از مهمترین مسائل در زمینه شبکه‌های نوری میزان مقیاس‌پذیری آنها می‌باشد. پیش از این بیان شد که برای ارسال داده در شبکه نوری پیشنهادی از ترکیب شیوه WDM و مسیریابی طول موج استفاده شده است. در این شیوه مسیریابی در ساده‌ترین حالت، به هر گره یک دسته طول موج اختصاص داده می‌شود. این طول موج‌ها، آدرس هرگره را تعیین می‌کنند. این مسئله مقیاس‌پذیری طرح را به دلیل استفاده از تعداد فراوانی طول موج محدود می‌کند (به تعداد گره‌های شبکه، طول موج مجزا نیاز داریم). از سوی دیگر به دلیل محدودیت تعداد طول موج‌ها در شبکه، تعداد طول موج‌های اختصاصی به هر گره کاهش می‌یابد. به این ترتیب هر گره سیگنال نوری را بر روی تعداد کمتری طول موج مدوله خواهد کرد که سبب کاهش پهنای باند آرسالی می‌شود.

در یک شبکه نوری کانال تزریق مسئول ارسال داده به تمام گره‌های شبکه است. در صورتی که در هر گره تنها یک کانال تزریق وجود داشته باشد، برای تفکیک جریان‌های نوری از یکدیگر، هرکدام را باید با یک دسته طول موج مجزا مدوله کرد. این امر باعث کاهش قابلیت بازپیکربندی در شبکه می‌شود. اگر به جای یک کانال تزریق، از دو کانال تزریق ( $I_1$  و  $I_2$ ) در مسیرهای نوری استفاده شود، در آن صورت می‌توان از کانال  $I_1$  برای ارسال به نیمی از گره‌های شبکه و از کانال  $I_2$  برای ارسال به نیم دیگر گره‌ها استفاده کرد. بدین ترتیب، با اختصاص تنها  $N/2$  (تعداد گره‌ها) طول موج به گره‌های شبکه می‌توان مسیریابی سیگنال‌های نوری را انجام داد. تعیین کانال تزریق برای ورود سیگنال نوری به شبکه، در فرستنده و به صورت الکتریکی انجام می‌شود. از سوی دیگر طراحی معماری پیشنهادی مبتنی بر یک شبکه میان ارتباطی می‌باشد که به حفظ ویژگی مقیاس‌پذیری شبکه کمک شایانی می‌نماید.

#### **مسیر یابی تمام-نوری:** با توجه به داشتن دو کانال تزریق در معماری پیشنهادی، در مسیریابی

طول موج، به  $N/2$  دسته طول موج مجزا نیاز است که هر دسته، آدرس دو گره متفاوت در شبکه را تعیین می‌کند. استفاده از مسیریابی طول موج، امکان استفاده از عناصر سویچینگ نوری به صورت غیر فعال و کاهش تعداد طول موج‌های اختصاصی به هر گره را به همراه دارد.

برای استفاده از عناصر سویچینگ نوری غیر فعال بایستی در زمان طراحی شبکه، الگوی مسیریابی تعیین شود و سپس بر اساس آن، طول موج‌های ریزحلقه‌های تشدیدگر در هر مسیر یاب تعیین می‌شوند. هر ریز حلقه در این روش به طول موج‌های ثابتی حساس خواهد بود و دیگر نیازی به مدار الکتریکی برای تغییر طول موج تشدید ریز حلقه (برای تغییر وضعیت آن) نخواهد بود. با این شیوه مسیریابی سیگنال نوری به صورت نوری انجام می‌شود و پردازش الکتریکی در مسیر یاب برای تعیین مقصد حذف می‌گردد. حذف مدار و پردازش الکتریکی در مسیر یاب به بهینه شدن مساحت و توان مصرفی معماری کمک شایانی می‌کند.

**قابلیت بازپیکربندی:** طرح پیشنهادی قادر به پشتیبانی از چندین هم‌بندی می‌باشد. این امر باعث استفاده از هم‌بندی مناسب برای یک کاربرد می‌شود. در معماری پیشنهادی یک هم‌بندی با قابلیت

بازپیکربندی ارائه شده است که امکان گذر بین همبندی‌های توری و پروانه را فراهم می‌آورد. در ابتدا دلیل انتخاب این دو همبندی را بیان می‌کنیم.

توری مدور یک همبندی مسطح و متقارن با قابلیت اتصال بالا می‌باشد و برای پیاده‌سازی فناوری VLSI مناسب است [Hoskote\_07]، [Wentzlaff\_07]، [Gu\_09b]، [Shacham\_08]. افزون بر این، سادگی و متقارن بودن این همبندی، امکان به کارگیری الگوریتم‌های مسیریابی ساده و کارایی چون XY را میسر می‌سازد. پیاده‌سازی الگوریتم‌های مسیریابی نیز در این همبندی به راحتی امکان‌پذیر است. همبندی‌های چند سطحی و درختی هم به خاطر داشتن قطر کم و با توجه به کاربردهای آنها در نظر گرفته شده‌اند. در بخش بعدی طرح پیشنهادی به تفصیل بیان می‌گردد.

**ارتباطات چندپخشی:** در شبکه‌های نوری برای داشتن ارتباطات چندپخشی از ترکیب شیوه WDM و مسیریابی طول موج استفاده شده است. در این شیوه در یک بسته چندپخشی به ازای هر گره مقصد، یک سیگنال نوری با طول موج آن گره (مقصد) ارسال می‌شود. برای داشتن حداقل تأخیر در ارتباطات چندپخشی، لازم است تمام سیگنال‌های نوری به صورت هم‌زمان به شبکه تزریق شوند. به این ترتیب هر گره به  $N-1$  فرستنده‌ی نوری نیاز دارد. به بیان دقیق‌تر، تعداد  $N/2$  و  $(N/2) - 1$  فرستنده‌ی نوری به ترتیب برای کانال تزریق  $I_1$  و  $I_2$  نیاز است (حداکثر تعداد مقصد یک بسته چندپخشی  $N-1$  است). مورد دیگری که باید در نظر گرفت داشتن امکان ارسال هم‌زمان بسته‌های نوری تک‌پخشی و چندپخشی در شبکه می‌باشد. برای این امر می‌توان از دو روش اختصاص بازه‌های زمانی مجزا (تکنیک TDM)، و یا اختصاص مجموعه طول موج‌های متمایز (تکنیک WDM)، به هر کدام از ترافیک‌های تک‌پخشی و چندپخشی، استفاده کرد. در روش مبتنی بر تکنیک TDM، بازه‌های زمانی به کمک یک واحد همگام‌سازی سراسری مشخص می‌شوند. همچنین جهت ارسال بسته‌های تک‌پخشی یا چندپخشی در بازه زمانی بعد میانگیر<sup>1</sup> الکتریکی نیاز می‌باشد. به همین دلیل در معماری پیشنهادی از تکنیک

---

<sup>1</sup>Buffer

WDM استفاده می‌شود. که در آن هر گره به حداقل دو طول موج متفاوت، یکی برای ارسال بسته‌های تک‌پخشی و دیگری برای بسته‌های چندپخشی، نیاز دارد.

### **معماری تمام-نوری:** در معماری پیشنهادی به کمک عناصر سویچینگ غیر فعال و بدون نیاز

به پردازش الکتریکی، مسیریابی بسته‌های نوری به صورت تمام-نوری انجام می‌شود. در این مسیریابی، دریافت همزمان داده از چندین گره با تداخل داده‌های آنها در مسیر یا گره مقصد همراه خواهد بود. برای جلوگیری از تداخل، وضعیت گره مقصد قبل از ارسال داده باید بررسی شود. برای آگاهی از وضعیت گره مقصد، گره فرستنده ابتدا یک بسته "وارسی مقصد" - ارسال می‌کند. اگر گره مقصد در حال دریافت داده از گره دیگری باشد، قادر به دریافت داده از گره درخواست کننده نمی‌باشد و در وضعیت "مشغول" به سر می‌برد. در غیر این صورت، در وضعیت "آزاد" است، و آماده دریافت داده می‌باشد.

برای ارسال بسته واری مقصد به یک شبکه نیاز داریم که محدود به دریافت داده تنها از یک گره نباشد. در ساده‌ترین حالت، می‌توان از یک شبکه الکتریکی استفاده کرد. اتصالات الکتریکی از نظر توان مصرفی و پهنای باند محدودیت دارند. از این رو در معماری پیشنهادی، از یک شبکه نوری مبتنی بر crossbar برای ارسال بسته‌های واری مقصد استفاده می‌شود که در کاهش توان مصرفی نقش چشمگیری خواهد داشت.

به این ترتیب در معماری پیشنهادی، برای ارسال بسته‌های تک‌پخشی و چندپخشی با پهنای باند بالا و توان مصرفی کم، از دو شبکه نوری در ساختار ارتباطی استفاده شده است، یکی شبکه کنترلی مبتنی بر یک crossbar نوری مقیاس‌پذیر برای ارسال بسته‌های واری مقصد، و دیگری شبکه داده مبتنی بر یک شبکه میان‌ارتباطی، این شبکه برای ارسال بسته‌های داده به کار می‌رود.

در ادامه به بیان کامل معماری و روش انتقال داده می‌پردازیم.

### نتایج شبیه‌سازی

یک شبکه نوری از دو سطح تشکیل شده است [Gaffiot\_99]: سطح ارتباطات، در این سطح پروتکل‌های ارتباطی تعریف می‌شوند. و سطح فیزیکی، این سطح شامل عناصر نوری و الکتریکی بوده و امکان ارسال و دریافت داده‌ها را بین گره‌های مختلف فراهم می‌کند.

با توجه به مستقل نبودن این دو سطح از یکدیگر و برای در نظر گرفتن پیوند بین آنها، از مدل

سازی رفتاری<sup>1</sup> استفاده می‌کنیم. در زیر به برخی ویژگی‌های این شبیه‌سازی اشاره شده است:

- امکان شبیه‌سازی همزمان<sup>2</sup> پروتکل-سخت‌افزار
- امکان بررسی همزمان پدیده‌های نوری و الکتریکی
- اندازه‌گیری تأثیر عناصر فیزیکی روی کارایی کل سیستم،
- بهینه‌سازی پارامترهای عناصر فیزیکی و بهینه‌سازی سراسری کل سیستم،
- بررسی درستی کارکرد معماری پیشنهادی و ارزیابی کارایی آن
- تخمین مقادیر توان مصرفی، تأخیر انتقال داده و انرژی اتلافی در شبکه.

در ادامه، مشخصات شبیه‌سازی و همچنین نتایج و تحلیل‌های مربوط به توان مصرفی، انرژی و

تأخیر شبکه‌ی نوری پیشنهادی بیان می‌شود. هدف نهایی، مقایسه‌ی شبکه نوری روی تراشه‌ی پیشنهادی

با بهترین شبکه روی تراشه نوری مبتنی بر همبندی‌های توری دو-بعدی و پروانه بدون قابلیت

بازپیکربندی می‌باشد. درکنار این مقایسه، هر یک از شبکه‌ها نیز با بهترین شبکه الکتریکی متناظر در

فناوری 22 nm، از لحاظ تأخیر انتقال، توان مصرفی و انرژی اتلافی مقایسه می‌شوند.

---

<sup>1</sup> Behavioral Modeling  
<sup>2</sup> Co-simulation

## 5-1- محیط شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی معماری‌های پیشنهادی از شبیه‌ساز OMNeT++ [Varga] استفاده شده است. این شبیه‌ساز توسط گروه طراحان معماری Columbia نیز مورد استفاده قرار گرفته است [Chan\_10]. شبیه‌ساز OMNeT++، یک محیط شبیه‌سازی شبکه در سطح بالا مبتنی بر رویدادهای گسسته می‌باشد. این شبیه‌ساز قادر به مدل‌سازی دقیق از بعضی پارامترهای لایه فیزیکی مانند تأخیر، پهنای باند و نرخ خطا<sup>1</sup> می‌باشد. مدل رفتاری معماری و پارامترهای فیزیکی عناصر نوری و الکتریکی به عنوان ورودی به شبیه‌ساز OMNeT++ داده می‌شود و پس از اتمام شبیه‌سازی مقادیر تخمینی توان مصرفی و تأخیر انتقال داده در شبکه توسط شبیه‌ساز محاسبه می‌شود.

در اینجا نتایج یک هم‌بندی  $8 \times 8$  ReTMesh (متشکل از 64 گره) برای هم‌بندی توری دوبعدی و پروانه نشان داده شده است. برای ارزیابی شبکه‌های نوری و الکتریکی، فناوری ساخت 22nm CMOS در نظر گرفته شده است. با فرض آن که ابعاد تراشه حدود  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$  [Zhang\_10] است، طول اتصالات الکتریکی و نوری بین گره‌های مجاور حدود 3mm بدست می‌آید (برای شبکه میتنی بر هم‌بندی توری و پروانه بدون قابلیت بازپیکربندی طول اتصالات به ترتیب برابر با 2mm و 2.5 mm می‌باشد). فرض می‌کنیم که سرعت انتشار سیگنال‌های نوری در یک موج‌بر سیلیکونی  $15.4\text{ ps/mm}$  [Hsieh\_06]، و حرکت سیگنال‌های الکتریکی در طول یک سیم الکتریکی با فرض طراحی بهینه‌ی تکرارکننده‌ها<sup>2</sup> در فناوری 22nm برابر با  $131\text{ ps/mm}$  [Ho\_06] باشد. بر این اساس، مقادیر تأخیرهای نوری و الکتریکی بین مسیریاب‌های مجاور در معماری پیشنهادی، به ترتیب 30.8 ps و 262 ps بدست می‌آید.

طول اتصالات محلی بین هسته پردازشی و مسیریاب در هر گره کم‌تر از طول اتصالات بین مسیریاب‌های مجاور است، در این شبیه‌سازی طول اتصالات محلی 1 mm فرض شده است. در نتیجه، مقادیر تأخیرهای نوری و الکتریکی بین هر مسیریاب و هسته پردازشی متصل به آن، به ترتیب 15.4 ps و 161 ps بدست می‌آید.

---

<sup>1</sup> Error rate  
<sup>2</sup> Repeater

## 5-1-1- نحوه تولید ترافیک

در این بخش به بیان چگونگی پیاده‌سازی ترافیک‌های مصنوعی<sup>1</sup> در محیط شبیه‌سازی برای تولید بسته‌های تک‌پخشی و چندپخشی پرداخته می‌شود. در ادامه پارامترهایی که در تعیین الگوی ترافیکی در یک شبکه روی تراشه نقش دارند را بیان می‌کنیم. با تغییر هر کدام از این توابع می‌توان به الگوی ترافیکی جدیدی دست پیدا کرد.

(1) تابع زمانی تزریق بسته به شبکه،

تزریق بسته به شبکه، تأثیر فراوانی بر روی بار ترافیکی شبکه دارد. فاصله‌ی زمانی بین تزریق بسته‌ها به شبکه از تابع پواسون با پارامتر  $\mu$  تبعیت می‌کند. مقادیر بزرگ  $\mu$  موجب تزریق ترافیک سبک به شبکه، و کاهش آن باعث افزایش ترافیک و کاهش کارایی شبکه می‌شود. برای شبیه‌سازی از سه مقدار متفاوت  $\mu$  استفاده خواهد شد: مقدار  $\mu = 10 \text{ us}$  برای تولید ترافیک با بار سبک، مقدار  $\mu = 1 \text{ us}$  برای تولید ترافیک با بار متوسط، و مقدار  $\mu = 0.05 \text{ us}$  برای تولید ترافیک با بار سنگین.

(2) تابع توزیع اندازه‌ی بسته،

اندازه‌ی بسته‌ها، توسط تابع توزیعی یکنواخت از یک بازه‌ی از پیش تعریف شده انتخاب می‌شود. اگر چه شبکه‌های روی تراشه الکتریکی قادر به انتقال بهینه‌ی بلوک‌های کوچک داده هستند، ولی توانایی انتقال حجم بالای اطلاعات با پهنای باند زیاد را بین واحدهای پردازشی ندارند. برای انتقال سریع این حجم از اطلاعات می‌توان از شبکه‌های روی تراشه نوری استفاده کرد [Shacham\_08]. بنابراین اندازه‌ی بهینه‌ی داده‌ها در این بررسی به صورت تصادفی در محدوده‌ی [1 KB, 4 KB] انتخاب می‌شود. برای ارزیابی کارایی معماری پیشنهادی در ارسال بسته‌های چندپخشی، اندازه این بسته‌ها به صورت تصادفی (توزیع یکنواخت) در محدوده‌ی [10B, 15 B] انتخاب می‌گردد. اندازه بسته‌های چندپخشی به طور معمول کوچک‌تر از اندازه بسته‌های تک‌پخشی است. در غالب مطالعات مربوط به ارتباطات چندپخشی،

---

<sup>1</sup> Synthetic traffic

اندازه بسته چندپخشی برابر با یک بلوک از حافظه نهان، یعنی 64B یا 128B فرض شده است [Lin\_94]، [Malumbres\_96].

### (3) تابع توزیع آدرس مقصد،

سومین عامل مؤثر بر روی الگوی ترافیکی شبکه روی تراشه، نحوه‌ی توزیع آدرس مقصد داده‌های ارسال شده می‌باشد. در جدول (1-5) توابع توزیع آدرس مقصد متفاوتی برای بسته‌های تک‌پخشی بیان شده است. این توابع همگی از محک‌های<sup>1</sup> استاندارد برای تولید ترافیک مصنوعی در شبکه روی تراشه به‌شمار می‌آیند [Dally\_04]. احتمال ارسال داده از یک گره به هر کدام از گره‌های موجود در شبکه در ترافیک تصادفی (یکنواخت)، ثابت و برابر با  $1/(N-1)$  (تعداد گره‌های شبکه) می‌باشد. ترافیک‌های همسایه<sup>2</sup> و Tornado، به عنوان ترافیک‌های محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ترافیک همسایه، هر گره تنها به گره‌های همسایه خود داده ارسال می‌کند، در ترافیک Tornado، هر گره به همسایه‌ی همسایه خود داده می‌فرستد. ترافیک‌های Bit-Complement، Matrix Transpose، Bit-Reversal و Perfect Shuffle ترافیک‌های مبتنی بر جایگشت<sup>3</sup> محسوب می‌شوند که در آنها هر گره طبق الگوی از پیش تعیین شده تنها به یک گره مشخص داده ارسال می‌کند. هر کدام از ترافیک‌های جدول (1-5)، شبکه را برای یک کاربرد خاص یا در یک شرایط ویژه ارزیابی می‌کنند [Hendry\_09].

برای تولید بسته‌های چندپخشی، آدرس گره‌های مقصد به صورت تصادفی (توزیع یکنواخت) تعیین می‌شوند. تعداد گره‌های مقصد نیز بر اساس یک تابع توزیع نمایی با یک مقدار متوسط مشخص، محاسبه می‌گردد. در [Jerger\_08]، حداکثر سهم ارتباطات چندپخشی در کاربردهای متفاوت شبکه‌های روی تراشه، 12/4% گزارش شده است. بر این اساس، همانند [Wang\_09]، در صد ترافیک چندپخشی برابر با 10% و متوسط تعداد مقصدهای هر بسته چندپخشی برابر با 8 فرض می‌شود.

---

<sup>1</sup> Benchmark

<sup>2</sup> Neighbor

<sup>3</sup> Permutation-based traffics

جدول 5-1: ترافیک‌های مصنوعی برای تولید بسته‌های تک‌پخشی

نسبت	گره مقصد	نام ترافیک
100%	یکی از گره‌های شبکه (به صورت تصادفی)	یکنواخت
80%	یکی از گره‌های همسایه (به صورت تصادفی)	همسایه
80%	همسایه‌ی همسایه (به صورت تصادفی)	Tornado
100%	$a_{n-1}a_{n-2} \cdots a_1a_0 \Rightarrow \overline{a_{n-1}a_{n-2} \cdots a_1a_0}$	Bit-Complement
100%		Matrix Transpose
100%		Bit-Reversal
100%		Perfect Shuffle

برای ارسال هم‌زمان بسته‌های تک‌پخشی و چندپخشی در معماری پیشنهادی، دسته طول موج متمایزی به هر کدام از آن‌ها اختصاص داده می‌شود. تعداد طول موج‌های اختصاصی به هر یک از بسته‌های تک‌پخشی و چندپخشی، به درصد ترافیک چندپخشی، متوسط تعداد مقصدهای هر بسته چندپخشی و متوسط اندازه هر کدام از بسته‌های تک‌پخشی و چندپخشی بستگی دارد. با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده برای این پارامترها، یک‌چهارم طول موج‌ها به بسته‌های چندپخشی و سه‌چهارم نیز به بسته‌های تک‌پخشی اختصاص داده می‌شود.

## 5-2- روش محاسبه تأخیر در شبکه

تأخیر انتقال داده‌ها از طریق اتصالات نوری روی تراشه از چهار جزء تشکیل شده است:

- (1) تأخیر مدولاتور،
- (2) تأخیر انتشار سیگنال در موج‌بر نوری،
- (3) تأخیر آشکارساز نوری،
- (4) تأخیر تقویت‌کننده‌ی ترانس امپدانس (TIA)<sup>۱</sup>.

<sup>۱</sup> Trans-Impedance Amplifier

جدول (2-5)، اجزاء اصلی تأخیر انتقال داده در یک شبکه نوری را نشان می‌دهد. همچنین در این جدول، اجزاء اصلی تأخیر در یک شبکه الکتریکی نیز ذکر شده است (پارامترهای الکتریکی برای محاسبه تأخیر در شبکه روی تراشه الکتریکی استفاده خواهد شد).

جدول 2-5: اجزاء اصلی تأخیر انتقال در شبکه نوری و الکتریکی

مقدار (ps)	پارامتر	
9,5	مدار راه‌انداز مدولاتور	نوری
14,3	مدولاتور	
0,2	آشکارساز نوری	
4	TIA	
30,8	تأخیر موج‌بر نوری	الکتریکی
200	پردازش مسیریاب	
262	تأخیر سیم الکتریکی	

زمان مورد نیاز برای پردازش الکتریکی در هر مسیریاب در یک شبکه روی تراشه الکتریکی، یک پالس ساعت در نظر گرفته شده [Shacham\_08] که با فرض فرکانس 5 GHz برای سیگنال ساعت، این زمان برابر با 200 ps خواهد بود. مقدار تأخیر موج‌بر نوری و سیم الکتریکی به‌ازای یک hop نیز از بخش 1-5 گرفته شده است. سایر پارامترهای جدول (2-5)، در [Chen\_07] برای یک مسیر نوری با طول 1 cm، در فرایند ساخت 22nm CMOS پیش‌بینی شده است.

در صورت مشغول بودن گره مقصد، فرستنده باید منتظر آزاد شدن آن بماند تا بتواند داده خود را ارسال کند. این بازه‌ی زمانی انتظار نیز یکی از عوامل ایجاد تأخیر در معماری پیشنهادی به‌شمار می‌رود. به این ترتیب، با استفاده از پارامترهای جدول (2-5)، شبیه‌ساز رفتاری پیاده‌سازی شده در محیط OMNeT++، قادر به استخراج مقادیر مختلف تأخیر (تأخیرهای نوری، تأخیر بازه‌ی زمانی انتظار، ...) می‌باشد.

### 5-3- روش محاسبه توان در شبکه

توان تلف شده در یک اتصال نوری از مجموع توان اتلافی در تمامی عناصر نوری واقع بر این

اتصال (بر حسب دسی بل (dB)) بدست می‌آید [O'Connor\_04]:

$$P_{Link} = P_{CV} + P_W + P_B + P_Y + P_{CR} \quad (1-5)$$

که در آن،  $P_{CV}$  ضریب تزویج<sup>1</sup> بین منبع نوری و موج‌بر سیلیکونی،  $P_W$  توان تلف شده در واحد طول برای انتشار در موج‌بر نوری،  $P_B$  اتلاف توان سیگنال نوری به دلیل خم شدن موج‌بر،  $P_Y$  اتلاف توان سیگنال در عبور از عنصر Y-جفت‌گر<sup>2</sup>، و  $P_{CR}$  نیز توان تلف شده در انتقال سیگنال از موج‌بر به گیرنده‌ی نوری می‌باشد. از آنجایی که از منابع نوری خارج تراشه‌ای استفاده شده است، مقدار  $P_{CV}$  در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته برابر با صفر قرار داده شده است. مقدار  $P_Y$  برابر با 3 dB و توان اتلافی برای انتشار سیگنال در موج‌برهای نوری ( $P_W$ ) [Zhou\_06] 0,51dB/cm فرض شده است. در [Manolatu\_99]، پژوهشگران موفق به ساخت یک انحنای 90° با ابعاد زیرمیکرومتر<sup>3</sup> شده و نشان داده‌اند که اتلاف توان سیگنال نوری روی هر کدام از این انحناها کمتر از 1% توان کل سیگنال خواهد بود و بر این اساس نتیجه گرفته‌اند که می‌توان از توان تلف شده ناشی از خم شدگی موج‌برها صرف‌نظر کرد ( $P_B=0$ ). همچنین با استفاده از پارامترهای بیان شده در [Schultz\_00]، اتلاف توان ناشی از تزویج بین موج‌بر و گیرنده‌ی نوری ( $P_{CR}$ ) 0,6 dB فرض شده است.

---

<sup>1</sup> Coupling  
<sup>2</sup> Coupler  
<sup>3</sup> Submicrometer

علاوه بر توان نوری تلف شده در موج‌برها، المان‌های سویچینگ نوری نیز نقش مهمی در میزان توان تلف شده در شبکه ایفا می‌نمایند. مقدار متوسط اتلاف تعبیه (IL<sup>1</sup>) در درگاه دفع<sup>2</sup> از یک ریزحلقه

جدول 3-5: اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده‌ی توان مصرفی در شبکه نوری و الکتریکی

واحد	مقدار	پارامتر	
dB/cm	0,51	$P_W$	نوری
dB	0,6	$P_{CR}$	
dB	3	$P_Y$	
dB	0,01	$P_{MR, \text{through-port IL}}$	
dB	0,5	$P_{MR, \text{drop-port IL}}$	
mW	5	$P_{Transmitter}$	
mW	0,3	$P_{Receiver}$	
mW/mm	1	$P_{Link}$	الکتریکی
mW/bit	0,6	$P_{Buffer}$	
mW/bit	1,8	$P_{Crossbar}$	
mW/bit	1,75	$P_{Static}$	

تشدیدگر غیر فعال در حدود 0,5 dB، و برای درگاه سراسری<sup>3</sup> در حدود 0,01 dB می‌باشد [Kirman\_10] (سیگنال نوری از درگاه ورودی، وارد ریزحلقه می‌شود. در صورتی که ریزحلقه خاموش باشد، از درگاه سراسری و اگر روشن باشد، از درگاه دفع خارج می‌گردد. منظور از روشن بودن ریزحلقه آن است که طول موج تشدید ریزحلقه و سیگنال عبوری یکسان باشند. در غیر این صورت، ریزحلقه در وضعیت خاموش قرار خواهد گرفت).

در کنار توان تلف شده در موج‌برها و عناصر سویچینگ در شبکه، مبدل‌های الکتریکی به نوری (و یا بالعکس) نیز توان الکتریکی مصرف می‌کنند. پیش‌بینی انجام گرفته در [Chen\_07] نشان می‌دهد که توان مصرفی در مدارهای فرستنده ( $P_{Transmitter}$ ) و گیرنده ( $P_{Receiver}$ ) که در مسیر نوری به طول 1cm قرار گرفته‌اند، در فناوری 22nm، به ترتیب 5 mW و 0,3 mW خواهد بود.

<sup>1</sup> Insertion Loss

<sup>2</sup> Drop-Port

<sup>3</sup> Through-Port

با توجه به توضیحات بالا، اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده‌ی توان مصرفی برای انتقال نوری در جدول (3-5) آورده شده‌اند. با استفاده از این مقادیر، توان تلف شده برای انتقال یک داده‌ی نوری از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Optical,Data}} = & P_{\text{MR,drop}} \times N_{\text{ON}} + P_{\text{MR,through}} \times N_{\text{OFF}} \\
 & + P_{\text{MR,drop}} \times (L \times \text{HopCount}) \\
 & + P_{\text{CW+WDM}} \times (P_{\text{Transmitter}} + P_{\text{Receiver}})
 \end{aligned}
 \tag{2-5}$$

که در آن،  $N_{\text{ON}}$  تعداد ریزحلقه‌های تشدیدگری است که برای هدایت داده‌ی نوری روشن شده‌اند، و  $N_{\text{OFF}}$  تعداد ریزحلقه‌های تشدیدگر خاموشی است که داده‌ی نوری از کنار آنها عبور کرده است.  $L$  طول اتصال بین گره‌های مجاور در شبکه است که مقدار آن در این بررسی 2mm فرض شده است. متغیر  $\text{HopCount}$  بیان‌کننده‌ی تعداد hop هایی است که توسط داده‌ی نوری برای رسیدن به مقصد طی می‌شود.  $\text{WDM}$  نیز تعداد طول موج‌هایی را نشان می‌دهد که داده‌ی نوری بر روی آنها مدوله شده است. به‌ازای BER مساوی با  $10^{-15}$ ، حداقل توان دریافتی توسط گیرنده باید 22.3 dBm- باشد [O'Connor\_04]. بنابراین، توان مورد نیاز برای انتقال داده‌ی نوری برابر است با:

$$P_{\text{Packet}} = (-22\text{dBm} \times P_{\text{Optical}})
 \tag{3-5}$$

لازم به ذکر است که برای محاسبه‌ی توان تلف شده‌ی نوری، در نظر گرفتن واحدهای توان و تبدیل مناسب آنها ضروری می‌باشد.

کل توان مصرفی برای انتقال یک داده در معماری پیشنهادی از سه قسمت تشکیل شده است:

- (1) توان تلف شده توسط بسته واری مقصد در شبکه کنترلی ( $P_{\text{Destination-Checking}}$ )، (2) توان تلف شده در حافظه میانگیر ( $P_{\text{Buffering}}$ )، و (3) توان تلف شده توسط بسته داده در شبکه داده ( $P_{\text{Data}}$ )، به دلیل آن‌که شبکه کنترلی و داده از اتصالات نوری ساخته شده‌اند، مقدار  $P_{\text{Destination-Checking}}$  و  $P_{\text{Data}}$ ، توسط رابطه‌ی (2-5) محاسبه می‌شود.

برای محاسبه مقدار  $P_{Buffering}$  نیز از پارامتر  $P_{Buffer}$  در جدول (3-5) استفاده می‌کنیم.  $P_{Buffer}$  مقدار توان مصرف شده به‌ازای یک بار خواندن و نوشتن در یک بیت از حافظه را نشان می‌دهد [Shacham\_08]. بنابراین با ضرب  $P_{Buffer}$  در تعداد بیت‌های یک خانه از حافظه میانگیر، می‌توان  $P_{Buffer}$  را محاسبه کرد. البته چون حافظه میانگیر به صورت یک صف FIFO پیاده‌سازی شده است، لذا پس از خواندن داده از ابتدای صف، داده‌های دیگر به سمت ابتدای صف تغییر مکان می‌یابند. به این ترتیب مقدار  $P_{Buffering}$  برای شبکه‌ای با  $N$  گره، با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{Buffering} = P_{Buffer} \times \log_2(N) \times (Index - 1) \quad (4-5)$$

که در آن،  $Index$  معرف شماره خانه‌ای از حافظه میانگیر است که داده در آن نوشته شده است. داده مذکور باید  $Index - 1$  مرتبه در حافظه میانگیر به سمت بالا جابجا شود تا نهایتاً خوانده و از حافظه خارج گردد.

توان مصرفی در شبکه روی تراشه الکتریکی نیز با توجه به روش اشاره شده در [Shacham\_08] محاسبه می‌شود. توان مصرفی در واحد طول برای انتقال سیگنال در اتصالات الکتریکی (با فرض بهینه‌سازی اتصالات توسط اضافه کردن تکرارکننده‌های مناسب) در حدود  $1 \text{ mW/mm}$  تخمین زده شده است [Haurylau\_06]. در بررسی انجام گرفته در [Shacham\_08]، مقادیر انرژی مصرفی برای پردازش فلیت‌ها در هر مسیریاب گزارش شده است. البته در این بررسی از انرژی مصرفی توسط واحد داوری صرف‌نظر شده است. با در نظر گرفتن فرکانس  $5 \text{ GHz}$  برای سیگنال ساعت، اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده‌ی توان مصرفی برای انتقال الکتریکی در جدول (3-5) بیان شده است. با استفاده از این مقادیر، توان تلف شده در یک شبکه روی تراشه الکتریکی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{Electrical} = (P_{Link} \times L + P_{Buffer} + P_{Crossbar} + P_{Static}) \times BusWidth \times HopCount \quad (5-5)$$

که در آن،  $BusWidth$  عرض اتصالات الکتریکی بین مسیریاب‌های مجاور می‌باشد.

## 5-4- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

با توجه به مطالب بخش‌های گذشته، در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی معماری پیشنهادی می‌پردازیم. ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی اندازه بهینه تعداد خانه‌های حافظه میانگیر محاسبه می‌شود. سپس، معماری پیشنهادی با بهترین شبکه روی تراشه الکتریکی، از لحاظ تأخیر، توان مصرفی و انرژی اتلافی مقایسه می‌گردد. در نهایت، کارایی معماری پیشنهادی برای پیاده‌سازی ارتباطات چندپخشی در شرایط متفاوت بررسی می‌شود.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده 10% از کل ترافیک شبکه مربوط به بسته‌های چندپخشی با متوسط هشت مقصد است. توزیع آدرس در بسته‌های چندپخشی به صورت یکنواخت است. اما برای بسته‌های تک‌پخشی از توابع یکنواخت، همسایه، Tornado و Bit-Complement (یکی از روش‌های مبتنی بر جایگشت) برای تولید آدرس مقصد استفاده می‌شود.

در این بخش به ارزیابی کارایی و عملکرد معماری پیشنهادی برای شبکه نوری روی تراشه می‌پردازیم. برای بررسی مزایای شبکه‌های نوری در مقایسه با شبکه‌های الکتریکی، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی معماری پیشنهادی را با نتایج بهترین NoC الکتریکی که در فناوری 22nm قابل پیاده‌سازی است، مقایسه می‌کنیم. همچنین برای بررسی قابلیت پیکربندی و تأثیرات آن، معماری پیشنهادی را با شبکه‌های نوری مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی و پروانه مقایسه می‌کنیم. بر اساس پیش‌بینی صورت گرفته در [Shacham\_08]، در آینده اتصالات موازی 168 بیتی برای انتقال اطلاعات بین مسیرهای مجاور در NoC الکتریکی استفاده خواهد شد. فرکانس سیگنال ساعت در این نوع از NoC، در فناوری 22nm برابر 5 GHz فرض شده و تأخیر پردازش و مسیریابی بسته‌ها در هر گره، سه پالس ساعت (معادل 600 ps) در نظر گرفته شده است [Shacham\_08]. همچنین سرعت انتشار سیگنال الکتریکی در اتصالات یک NoC الکتریکی با تکرارکننده‌های بهینه در فناوری 22nm، برابر با 131 ps/mm فرض شده است [Ho\_06]. در ادامه نتایج بررسی به تفکیک هم‌بندی بیان می‌شوند.

#### 5-4-1- هم‌بندی توری دوبعدی

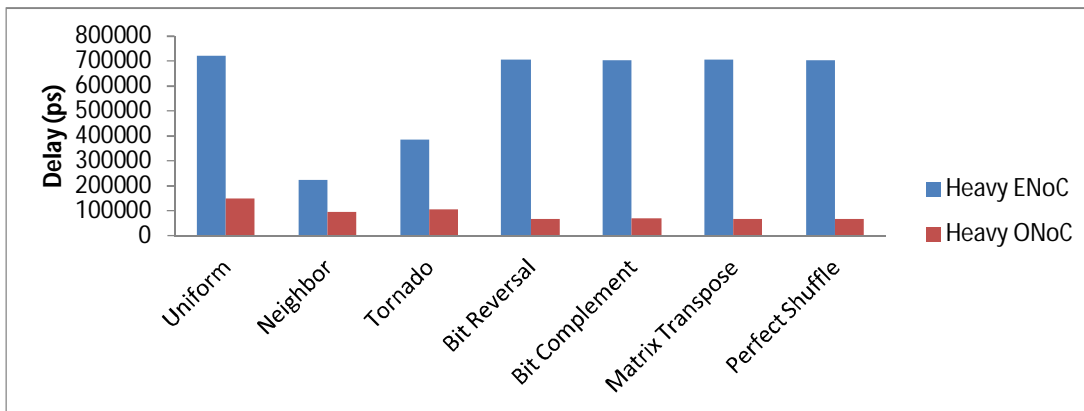
در این بخش معماری پیشنهادی مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی با شبکه الکتریکی و نوری، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی از نظر تاخیر، توان و انرژی مصرفی مقایسه می‌شوند.

#### 5-1-4-1- تحلیل تأخیر

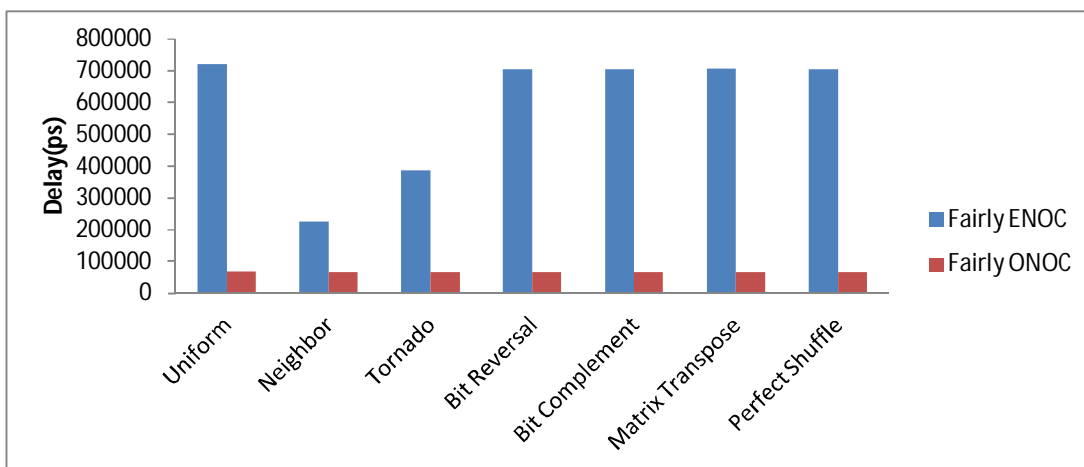
در این بخش به تحلیل تأخیر در معماری پیشنهادی می‌پردازیم. تأخیر معماری نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی با شبکه الکتریکی متناظر مقایسه شده است. معماری پیشنهادی با دو معماری نوری بدون قابلیت بازپیکربندی، یکی مبتنی بر هم‌بندی توری مدور و دیگری مبتنی بر هم‌بندی پروانه نیز مقایسه شده است.

شکل‌های (1-5)، (2-5) و (3-5)، متوسط تأخیر انتقال داده در شبکه نوری پیشنهادی و بهترین شبکه الکتریکی را برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و کل، در ترافیک‌های با بار سبک، متوسط و سنگین برای توابع توزیع آدرس مقصد متفاوت نشان می‌دهند. میزان تسریع حاصل در شبکه نوری نسبت به شبکه الکتریکی نیز در شکل (4-5) نمایش داده شده است. به طور متوسط، تأخیر متوسط شبکه نوری پیشنهادی در مقایسه با بهترین شبکه الکتریکی، به ترتیب برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع،  $9/43$ ،  $4/83$  و  $8/54$  برابر کم‌تر شده است (در هر مورد، میانگین تسریع در ترافیک‌های سبک، متوسط و سنگین محاسبه شده است).

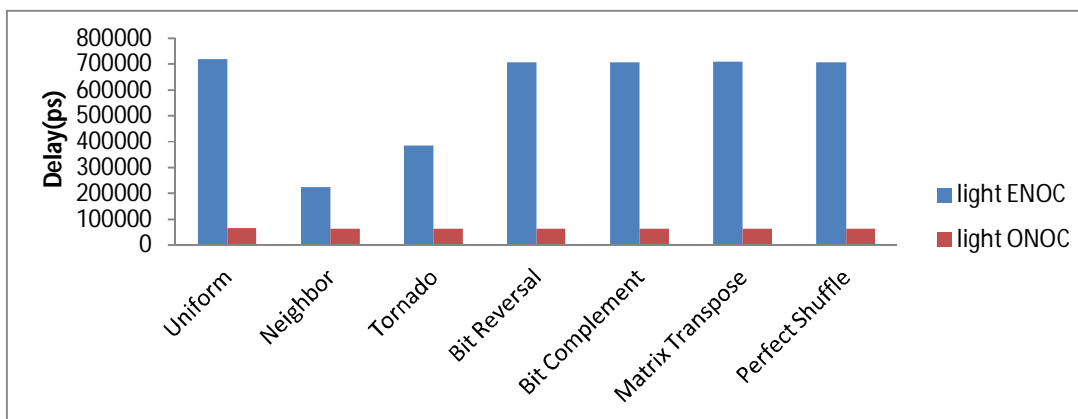
در شکل (5-5)، شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی با یک شبکه نوری بدون این ویژگی مقایسه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تأخیر در حالت بازپیکربندی بیشتر شده است. به ترتیب برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع،  $1/004$ ،  $1/008$  و  $1/005$  برابر بیشتر شده که بسیار ناچیز است.



(الف)

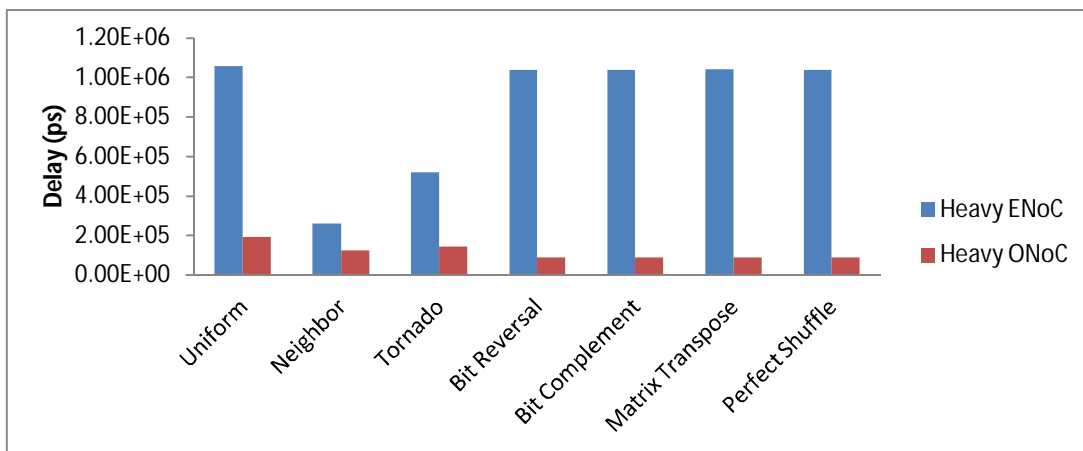


(ب)

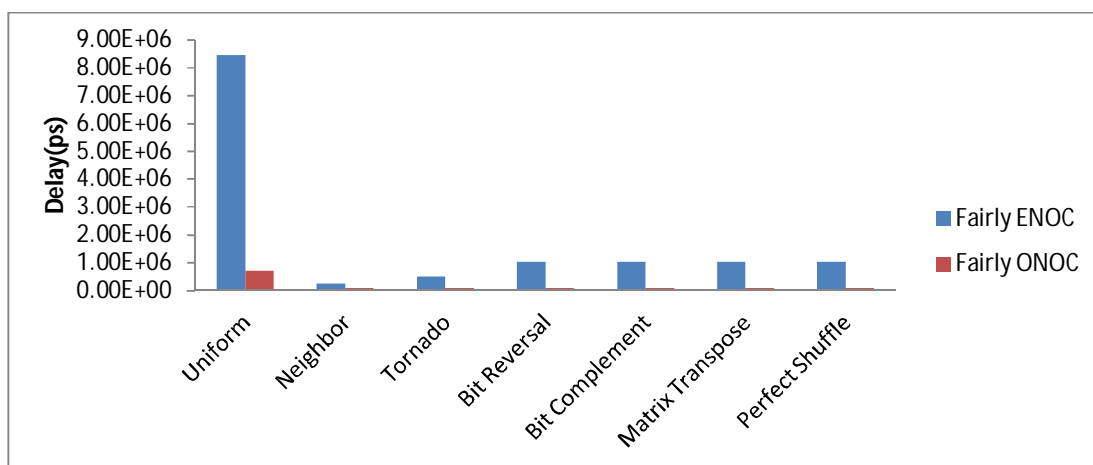


(ج)

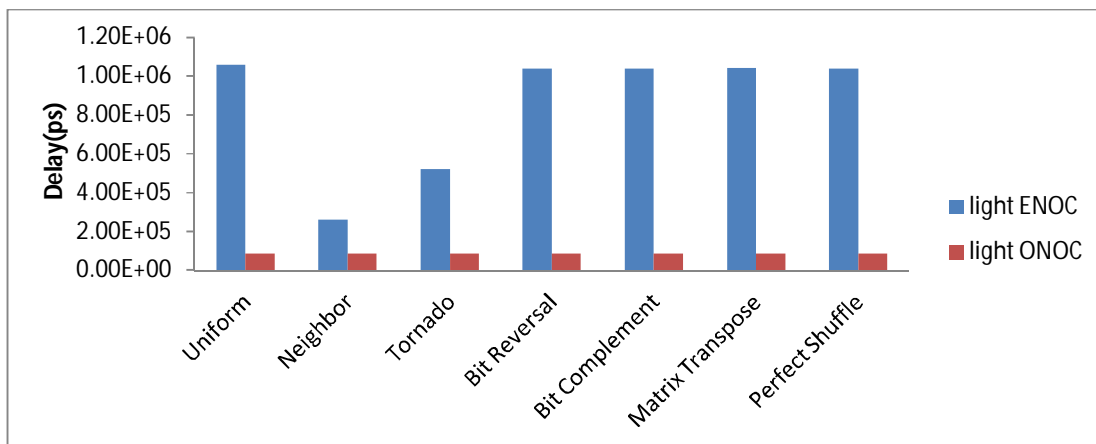
شکل 5-1: متوسط تأخیر کل (ps) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهمبندی توری دوبعدی، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

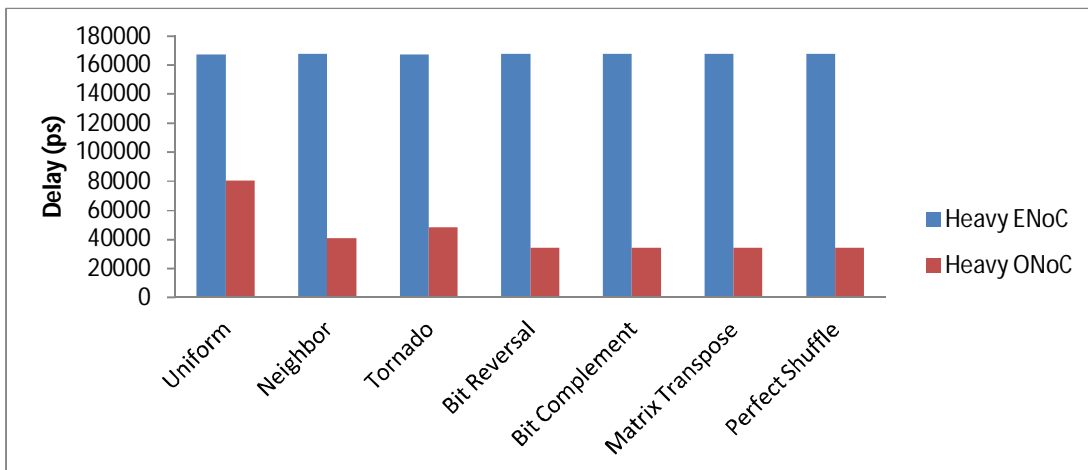


(ب)

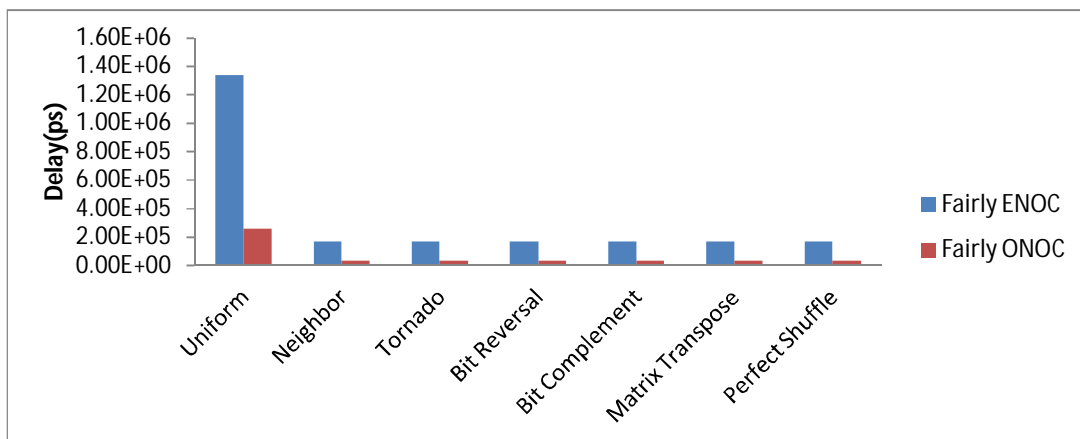


(ج)

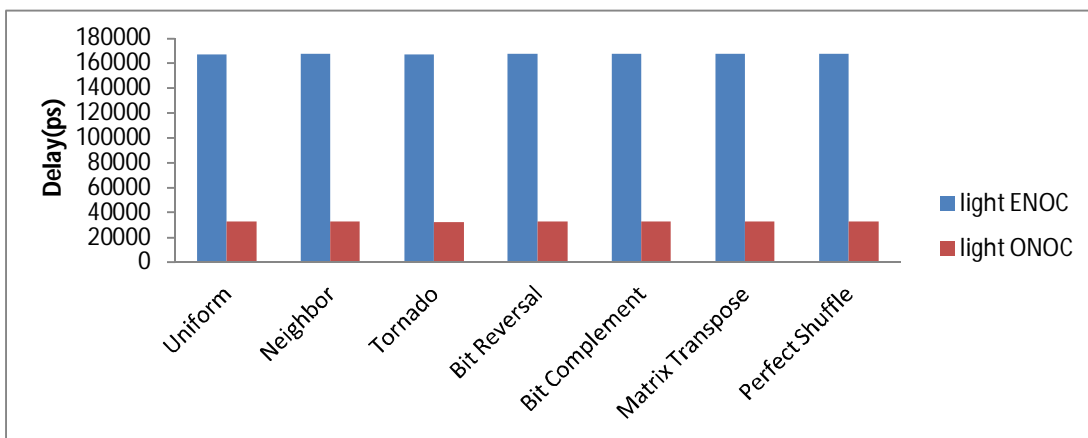
شکل 5-2: متوسط تأخیر تک‌پخشی (ps) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

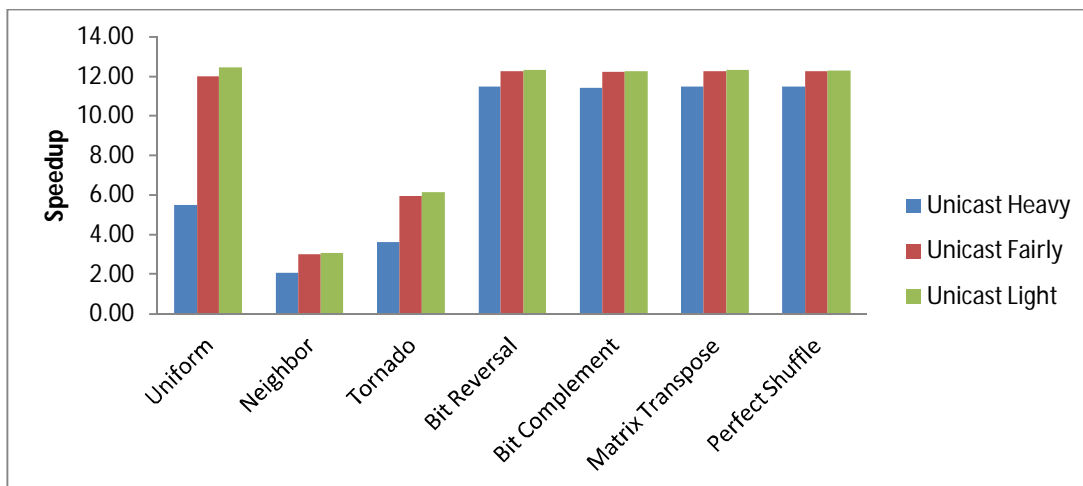


(ب)

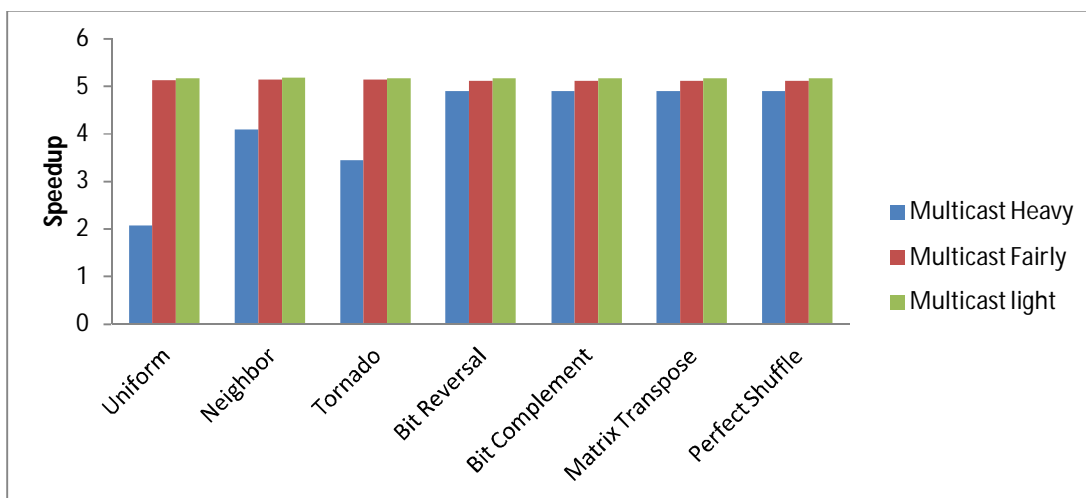


(ج)

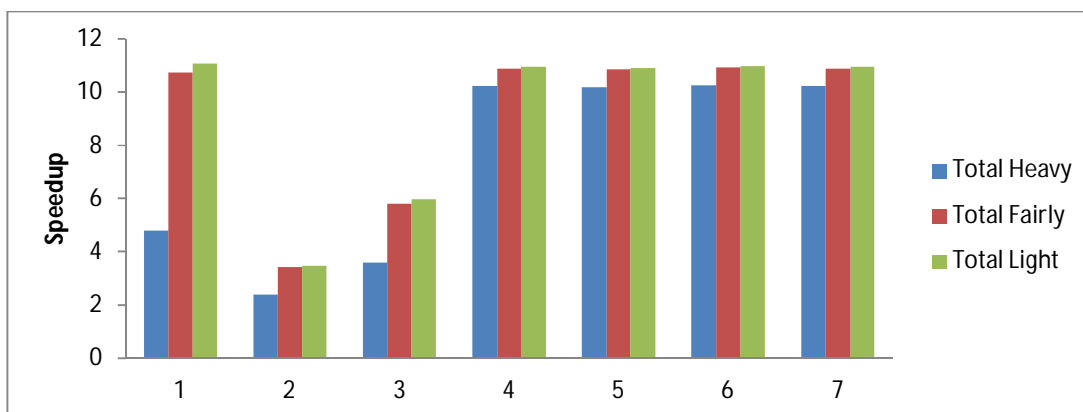
شکل 3-5: متوسط تأخیر چندپخشی (ps) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی توری دوبعدی، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

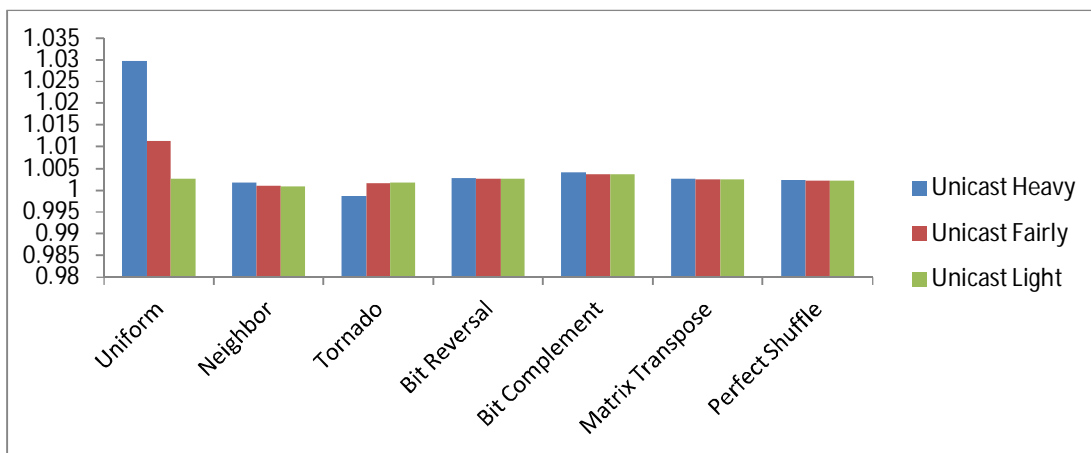


(ب)

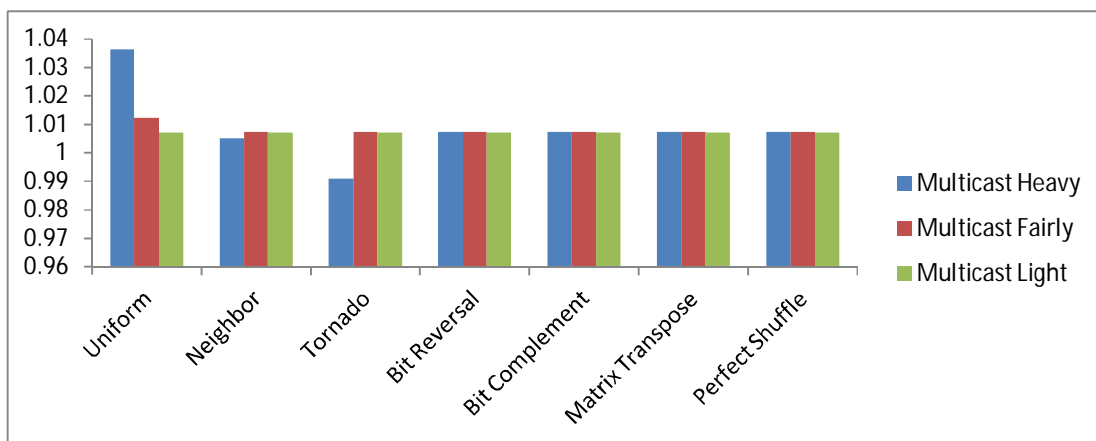


(ج)

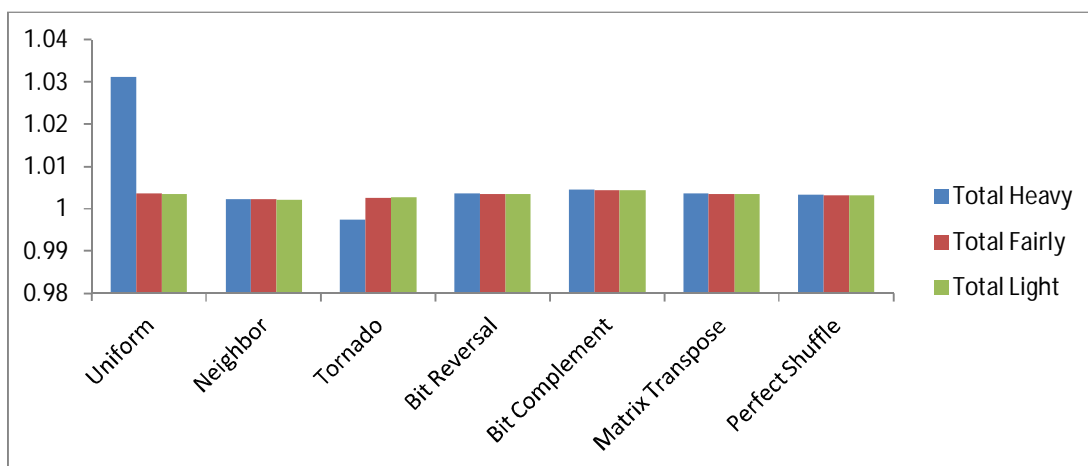
شکل 4-5: تسريع شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی توری دوبعدی، (الف) ارسال تک پخشی، (ب) ارسال چند پخشی، (ج) کلی



(الف)



(ب)



(ج)

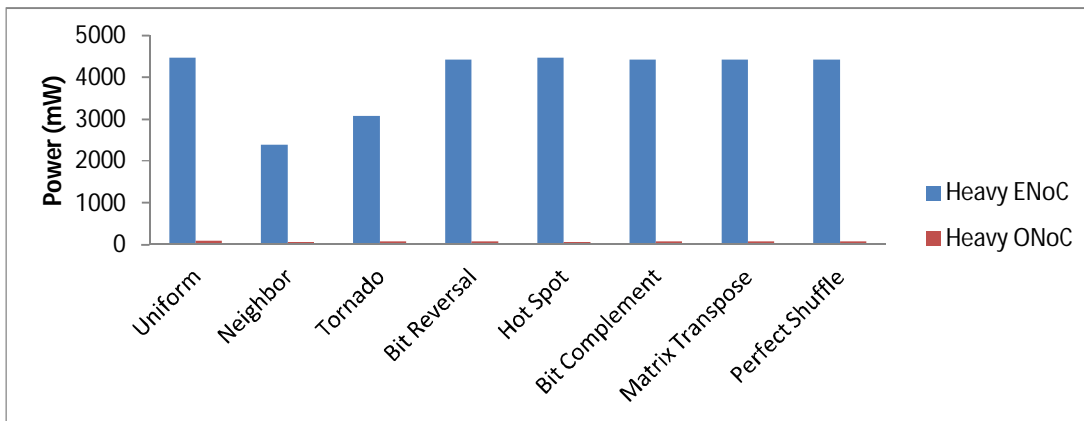
شکل 5-5: میزان افزایش تاخیر شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازیگر بندی نسبت به شبکه نوری، هر دو شبکه مبتنی بر هم بندی توری دوبعدی، (الف) ارسال تک پخششی، (ب) ارسال چند پخششی، (ج) کلی

## 5-4-1-2- تحلیل توان

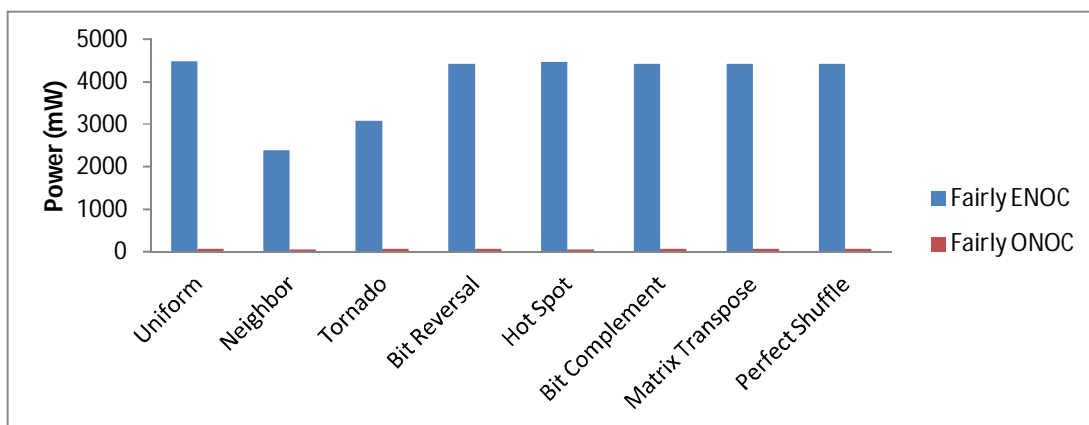
در این بخش به تحلیل توان در معماری پیشنهادی می‌پردازیم. توان معماری نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی با شبکه الکتریکی متناظر مقایسه شده است. معماری پیشنهادی با دو معماری نوری بدون قابلیت بازپیکربندی، یکی مبتنی بر هم‌بندی توری مدور و دیگری مبتنی بر هم‌بندی پروانه نیز مقایسه شده است. در این قسمت نتایج در حالت انتخاب هم‌بندی توری نشان داده شده است.

شکل‌های (5-6)، (5-7) و (5-8)، متوسط توان مصرفی انتقال داده در شبکه نوری پیشنهادی را برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع در حالت ترافیک‌های با بار سبک، متوسط و سنگین به‌ازای توابع توزیع آدرس مقصد متفاوت نشان می‌دهند. میزان کاهش توان مصرفی در شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه الکتریکی نیز در شکل (5-9) نمایش داده شده است. متوسط توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی در مقایسه با بهترین شبکه الکتریکی، به ترتیب در بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع،  $37/77$ ،  $93/00$  و  $58/92$  برابر کم‌تر شده است.

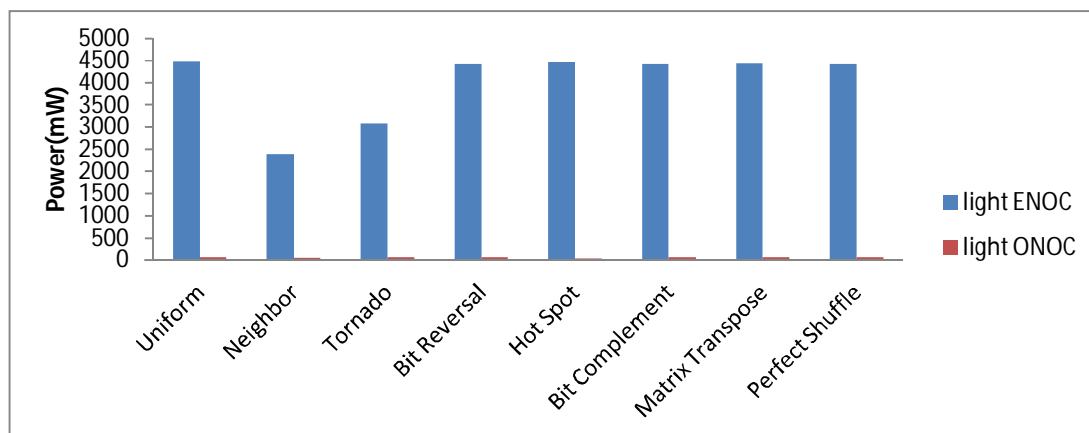
در شکل (5-10)، شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی با یک شبکه نوری بدون این ویژگی مقایسه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت توان در حالت بازپیکربندی بیشتر شده است. به ترتیب برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع،  $1/088$ ،  $1/023$  و  $1/062$  برابر بیشتر شده است.



(الف)

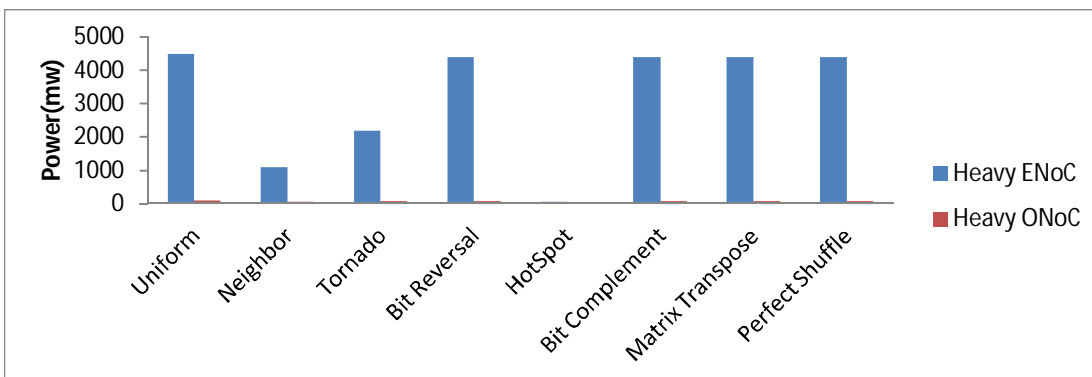


(ب)

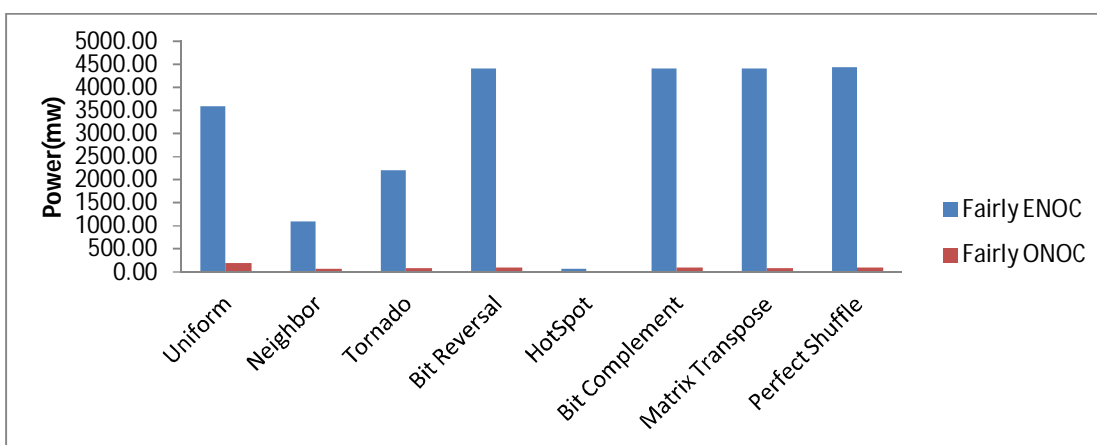


(ج)

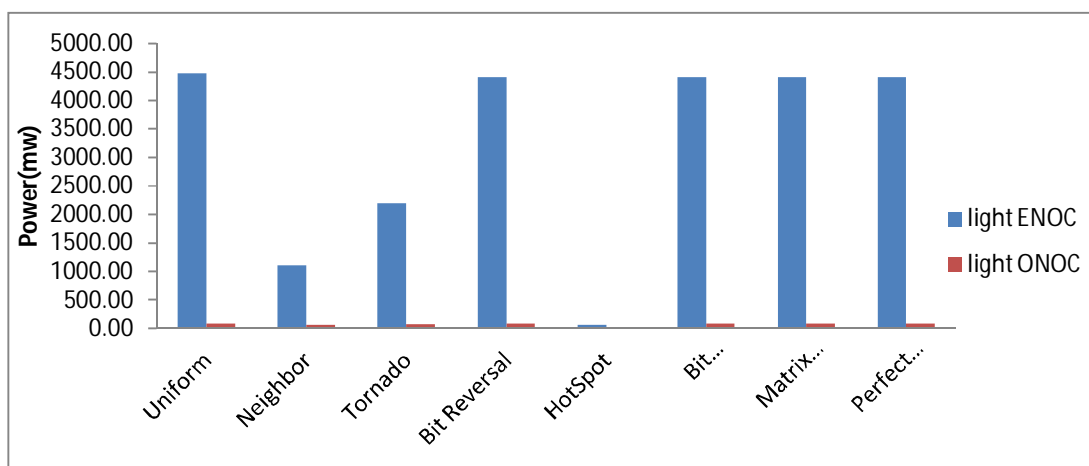
شکل 5-6: متوسط توان مصرفی کل (mw) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی توری دوبعدی با قابلیت بازپیکربندی، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.



(الف)



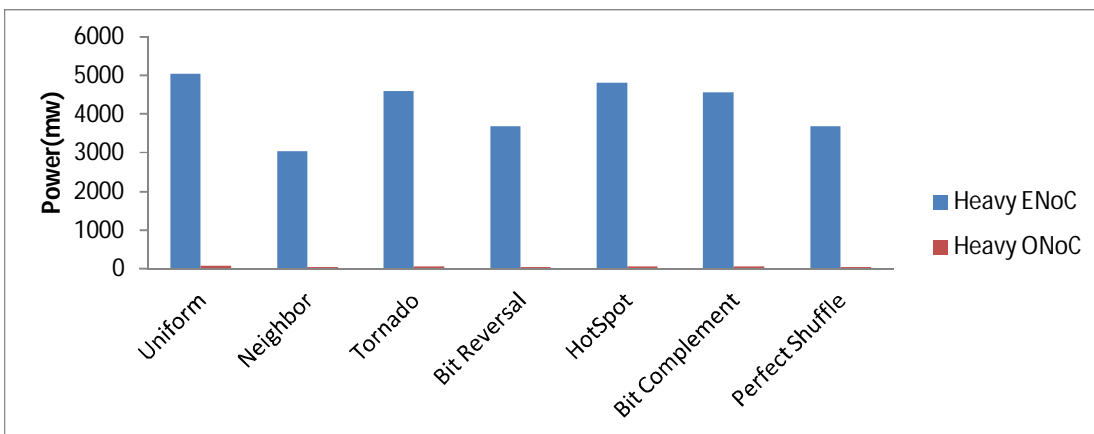
(ب)



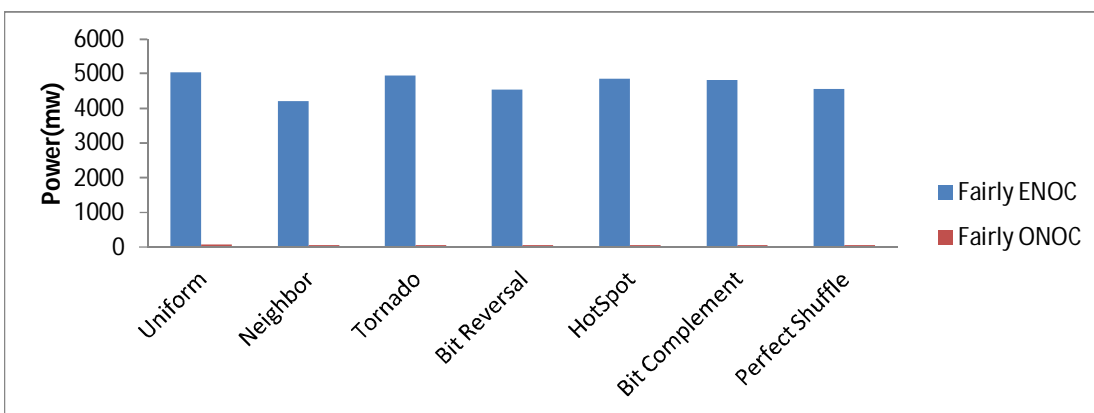
(ج)

شکل 5-7: متوسط توان مصرفی تک پخششی (mw) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکترونیکی،

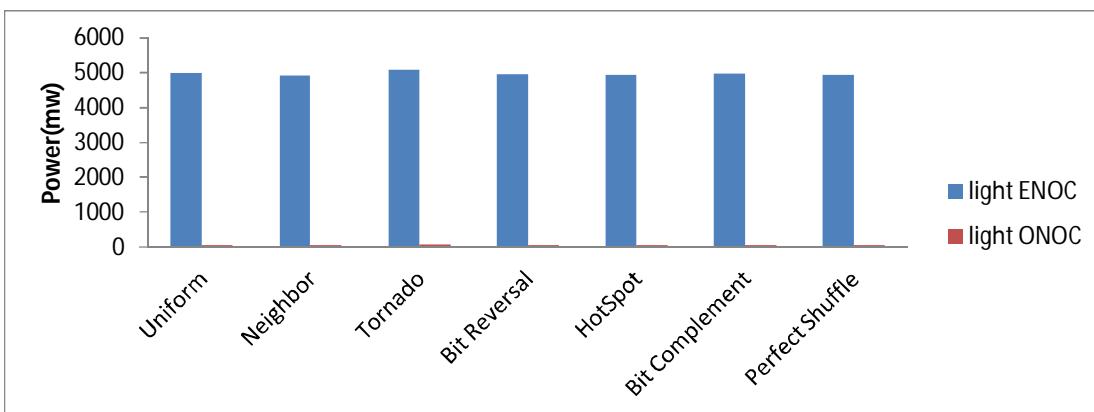
مبتنی بر همبندی توری دوبعدی، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.



(الف)

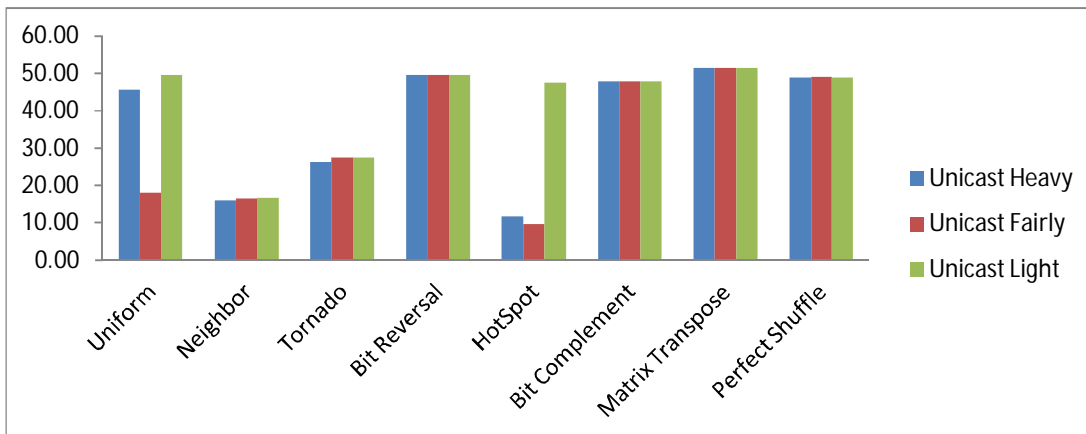


(ب)

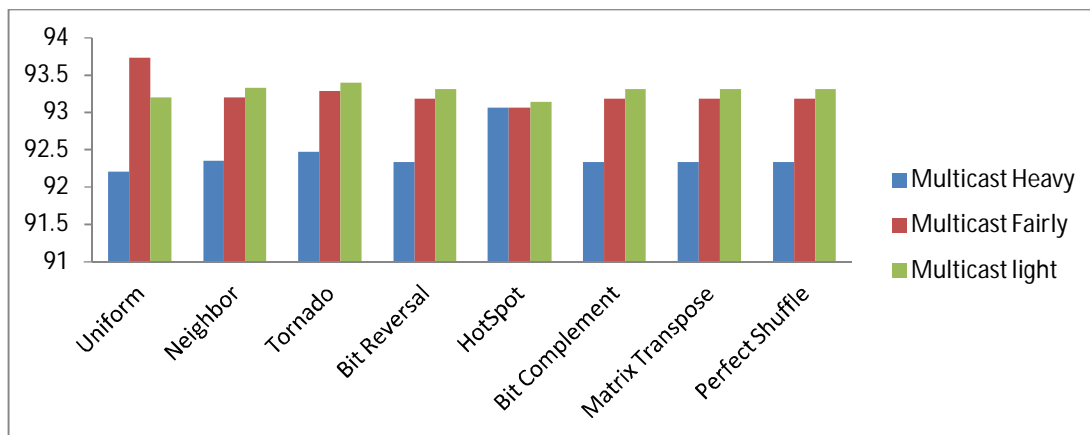


(ج)

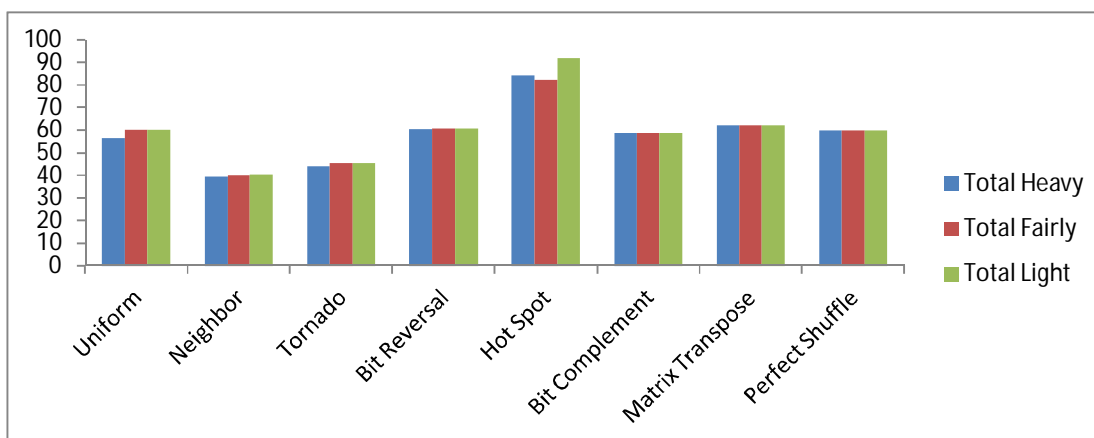
شکل 5-8: متوسط توان مصرفی چندپخشی (mw) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی توری دوبعدی، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.



(الف)

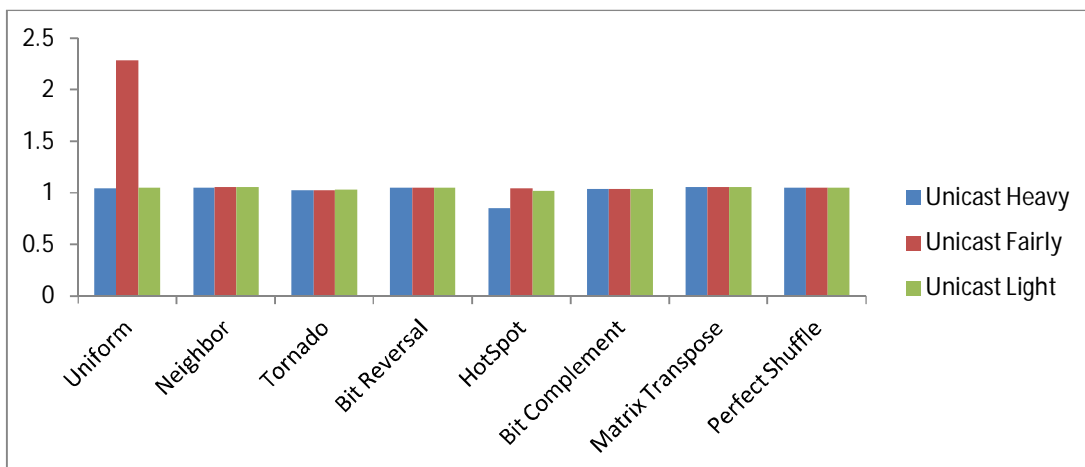


(ب)

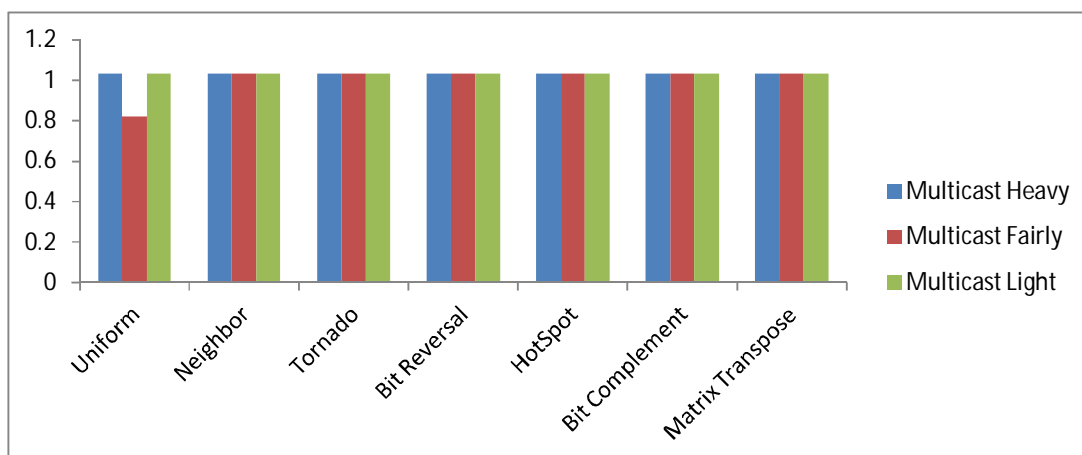


(ج)

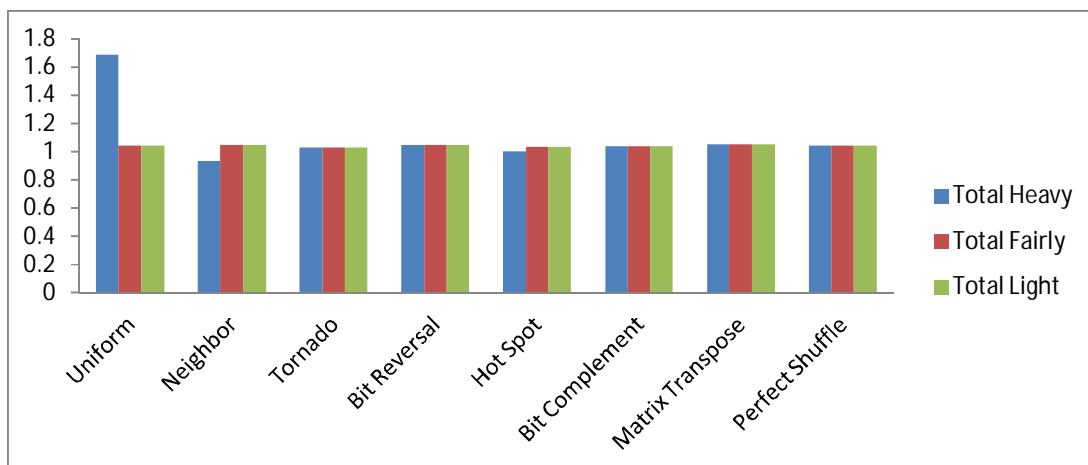
شکل 5-9: میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی برهمبندی توری دوبعدی، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.



(الف)



(ب)



(ج)

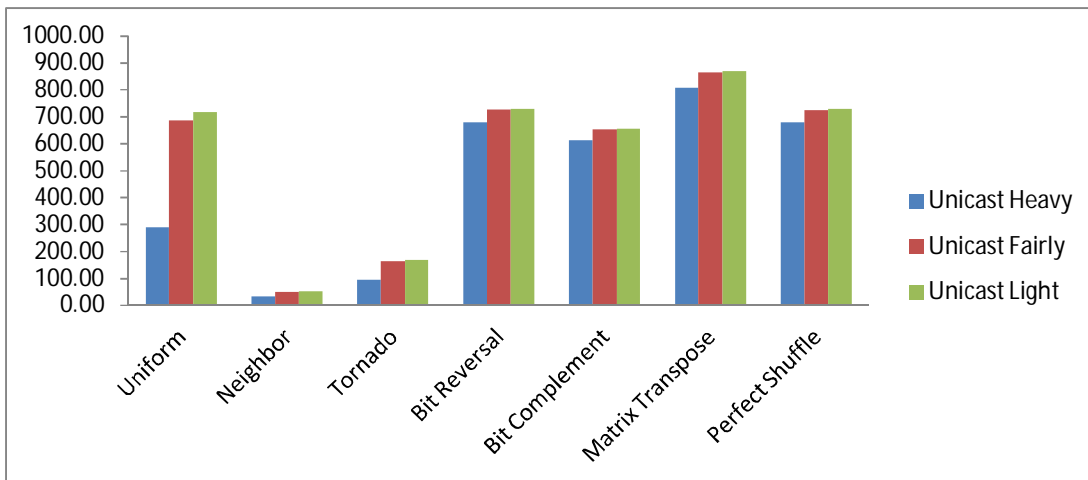
شکل 5-10: میزان افزایش توان شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازیگر بندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی بر همبندی توری دوبعدی، (الف) ارسال تک پخششی، (ب) ارسال چند پخششی، (ج) کلی

### 5-4-1-3- تحلیل انرژی

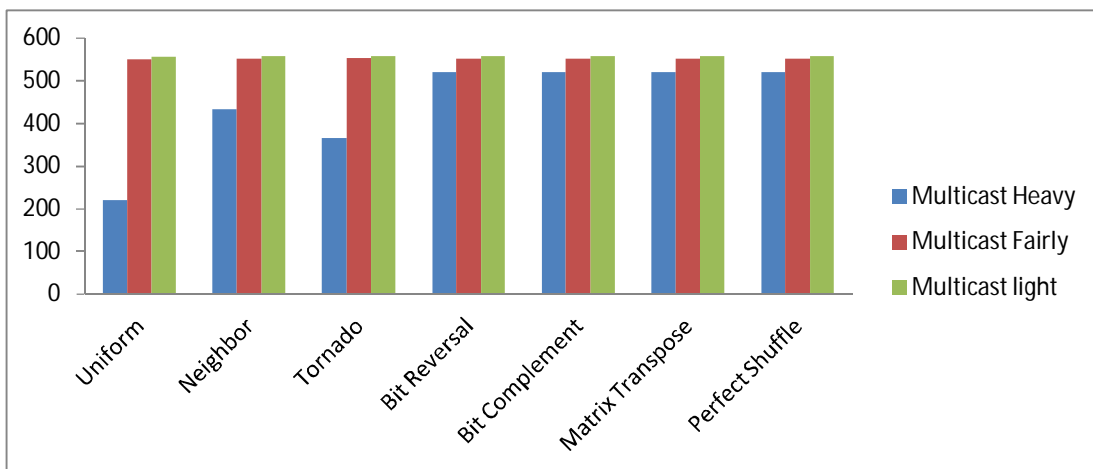
میزان کاهش انرژی مصرفی در شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه الکتریکی در شکل (5-)-  
(11) نمایش داده شده است. به طور میانگین، انرژی مصرفی متوسط شبکه نوری پیشنهادی در مقایسه با  
بهترین شبکه الکتریکی، به ترتیب در بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع، 523/32، 517/89 و  
524/76 برابر کم‌تر شده است.

براساس شکل (5-12)، به طور میانگین، انرژی مصرفی متوسط شبکه نوری با قابلیت  
بازپیکربندی با یک شبکه نوری بدون این ویژگی، به ترتیب در بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و  
مجموع، 1/04، 1/03 و 1/04 برابر بیشتر شده است.

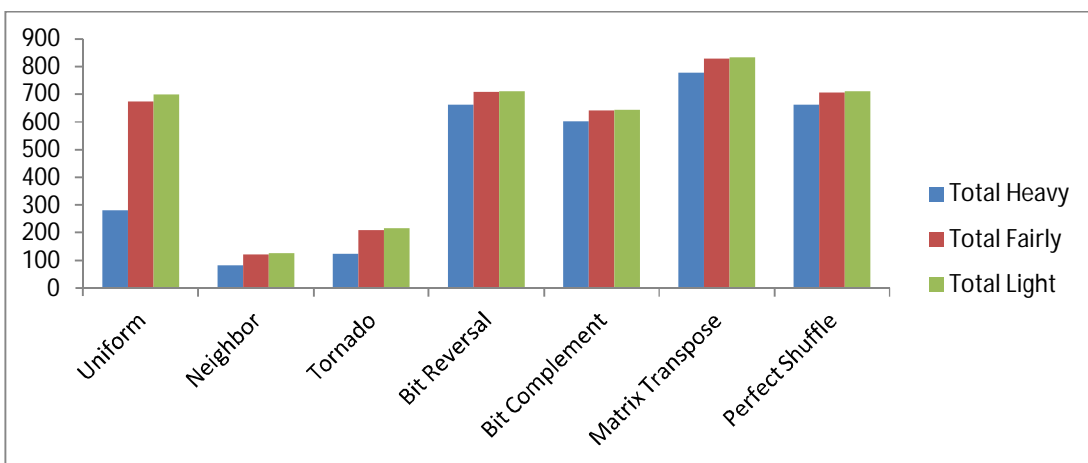
در حالت بازپیکربندی، تعداد ریزحلقه‌های خاموش و همچنین فاصله بین سوئیچ‌ها افزایش یافته  
است. این افزایش باعث بیشتر شدن توان و تاخیر شده است. افزایش مساحت یکی دیگر از نتایج افزودن  
بازپیکربندی در شبکه است. در طراحی شبکه سعی شد که افزایش تعداد ریزحلقه‌های خاموش، افزایش  
طول سیم و مساحت کمینه باشد. در نتیجه همانطور که مشاهده شد میزان افزایش تاخیر و توان در اینجا  
چندان چشمگیر نیست، به ویژه تاخیر.



(الف)

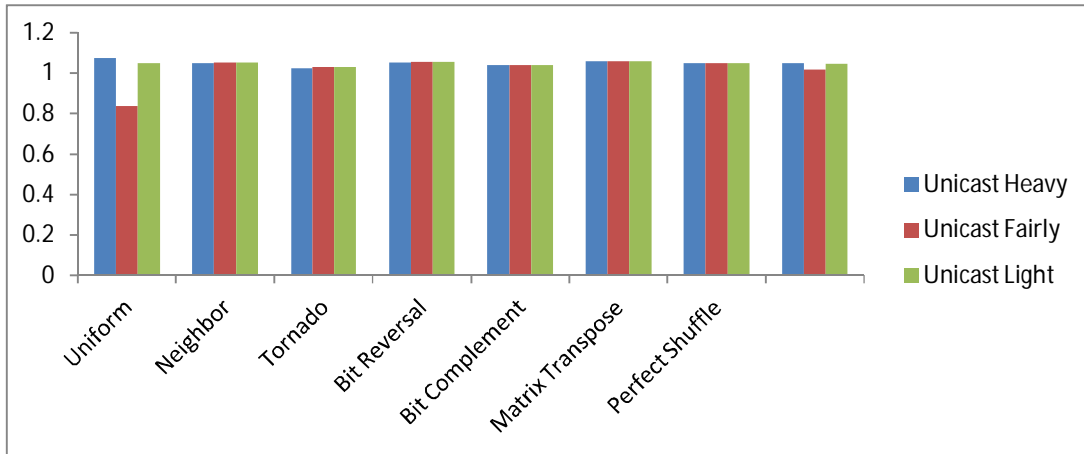


(ب)

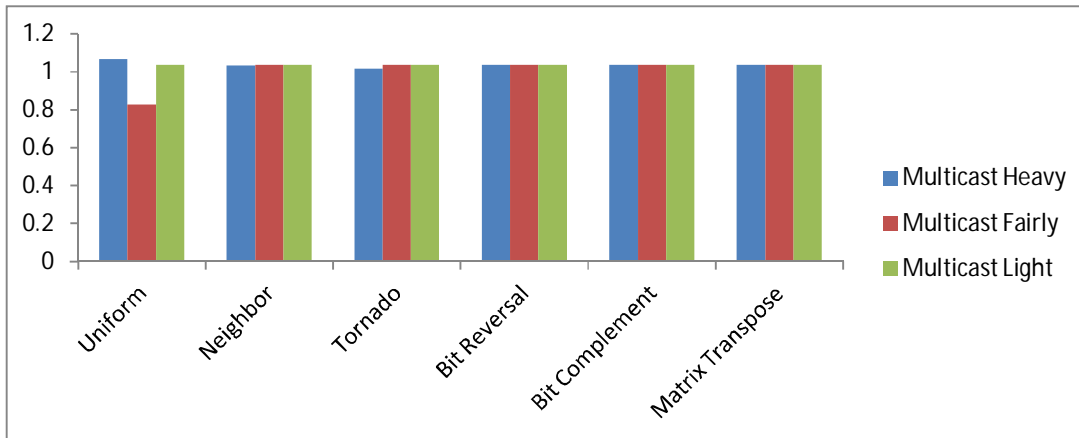


(ج)

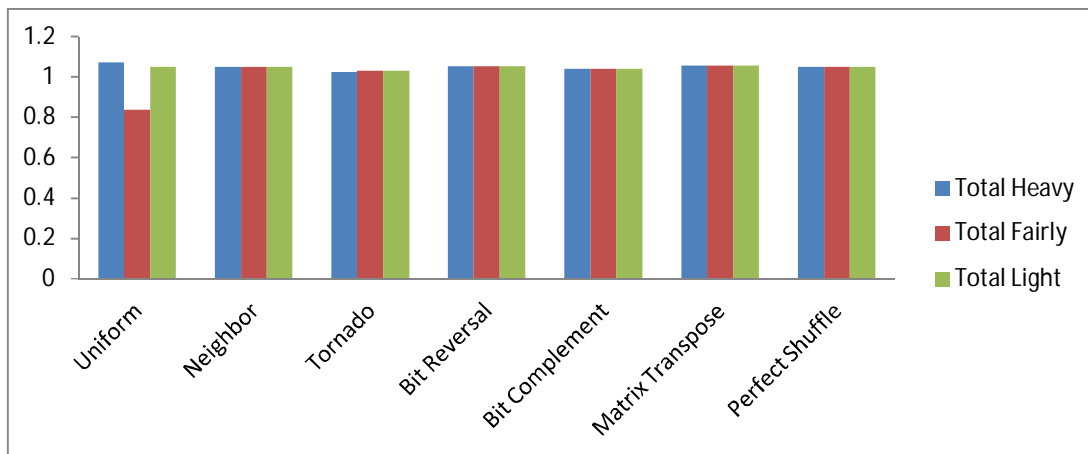
شکل 5-11: میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی توری دوبعدی، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 5-12: میزان کاهش انرژی شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، مبتنی بر هم-بندی توری دوبعدی، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.

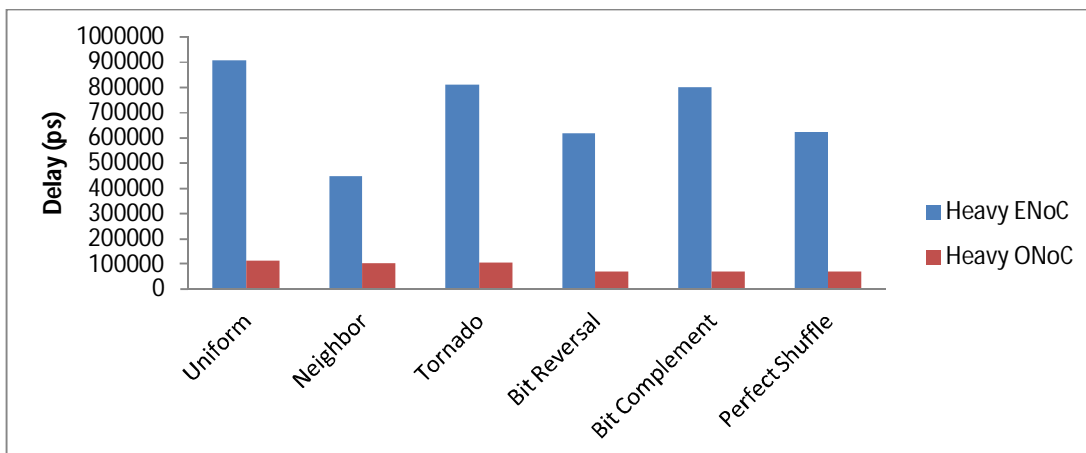
## 5-4-2- هم‌بندی پروانه

در این بخش معماری پیشنهادی مبتنی بر هم‌بندی توری دوبعدی با شبکه الکتریکی و نوری، مبتنی بر هم‌بندی پروانه از نظر تاخیر، توان مصرفی و انرژی مصرفی بررسی و مقایسه می‌شوند.

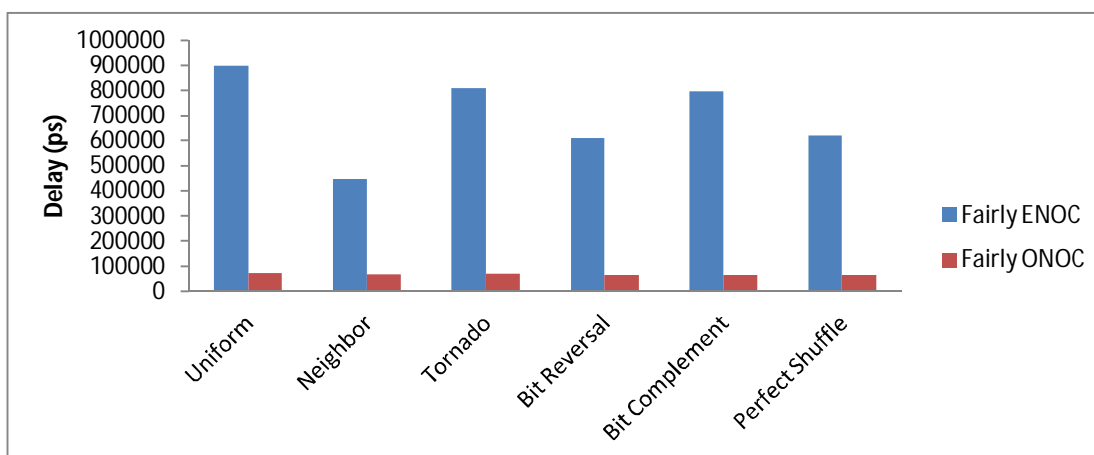
## 5-4-2-1- تحلیل تاخیر

شکل‌های (5-13)، (5-14) و (5-15)، متوسط تأخیر انتقال داده در شبکه نوری پیشنهادی و بهترین شبکه الکتریکی را برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و کل، در ترافیک‌های با بار سبک، متوسط و سنگین برای توابع توزیع آدرس مقصد متفاوت نشان می‌دهند. میزان تسریع حاصل در شبکه نوری نسبت به شبکه الکتریکی نیز در شکل (5-16) نمایش داده شده است. به طور متوسط، تأخیر متوسط شبکه نوری پیشنهادی در مقایسه با بهترین شبکه الکتریکی، به ترتیب برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع، 5/18، 2/64 و 9/85 برابر کم‌تر شده است.

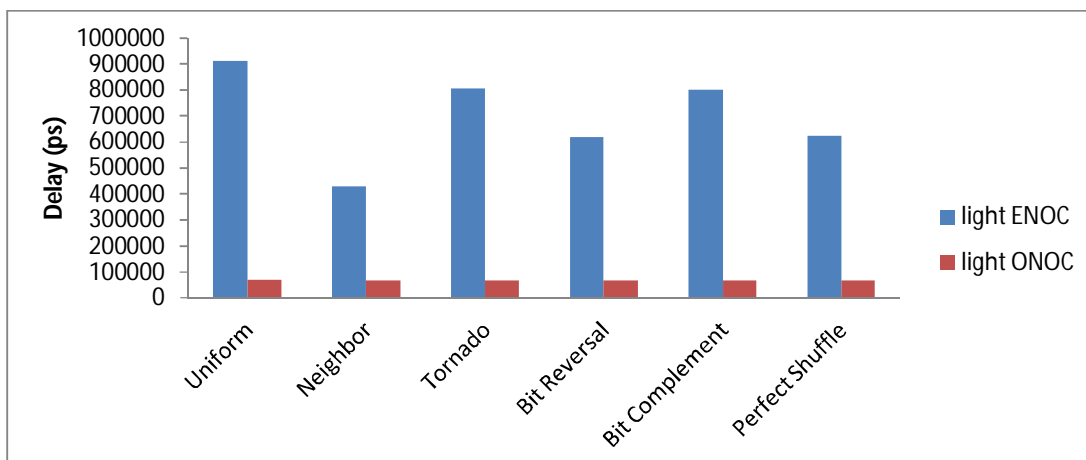
در شکل (5-17)، شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی با یک شبکه نوری بدون این ویژگی مقایسه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تاخیر در حالت بازپیکربندی بیشتر شده است. به ترتیب برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع، 1/08، 1/07 و 1/10 برابر بیشتر شده است.



(الف)

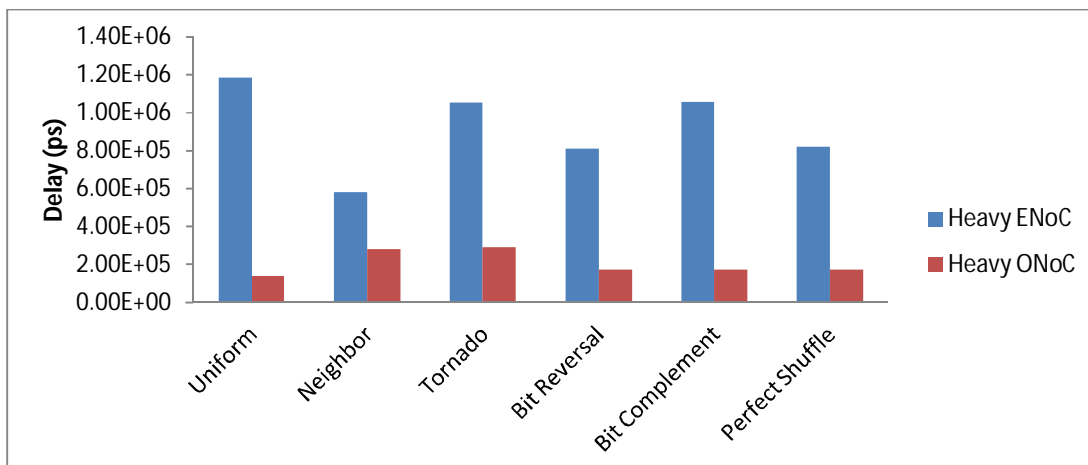


(ب)

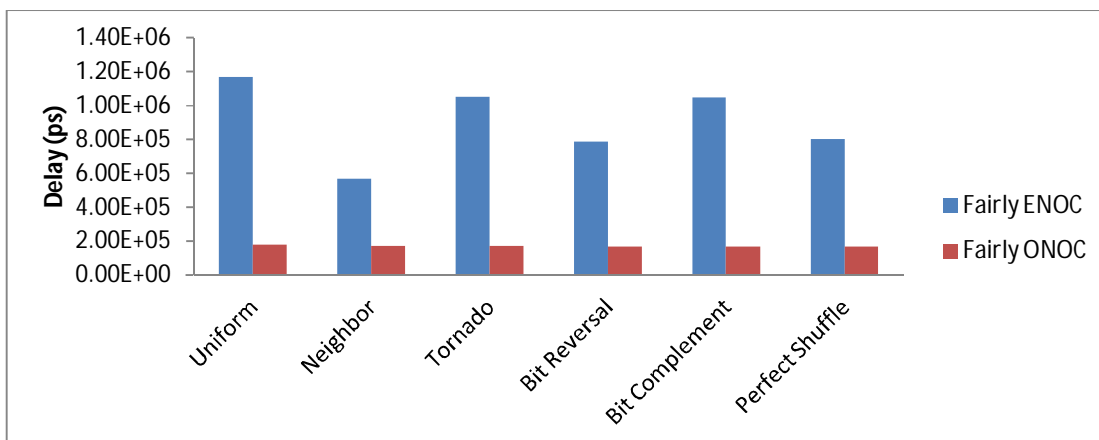


(ج)

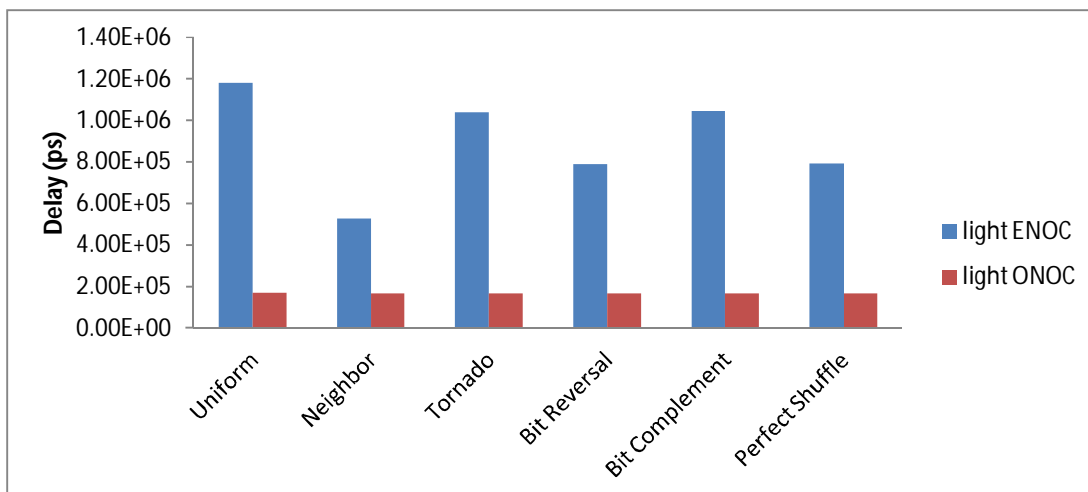
شکل 5-13: متوسط تأخیر کل (ps) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه نوری روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی پروانه، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

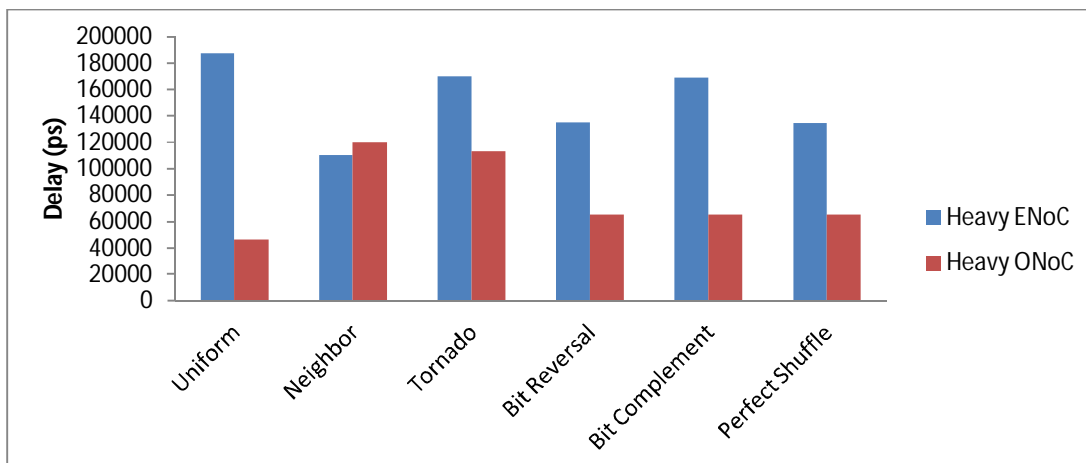


(ب)

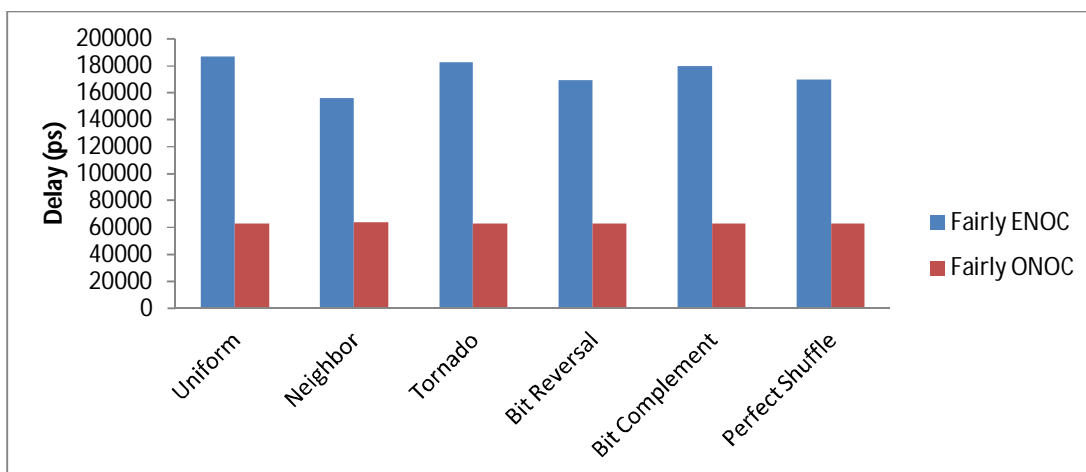


(ج)

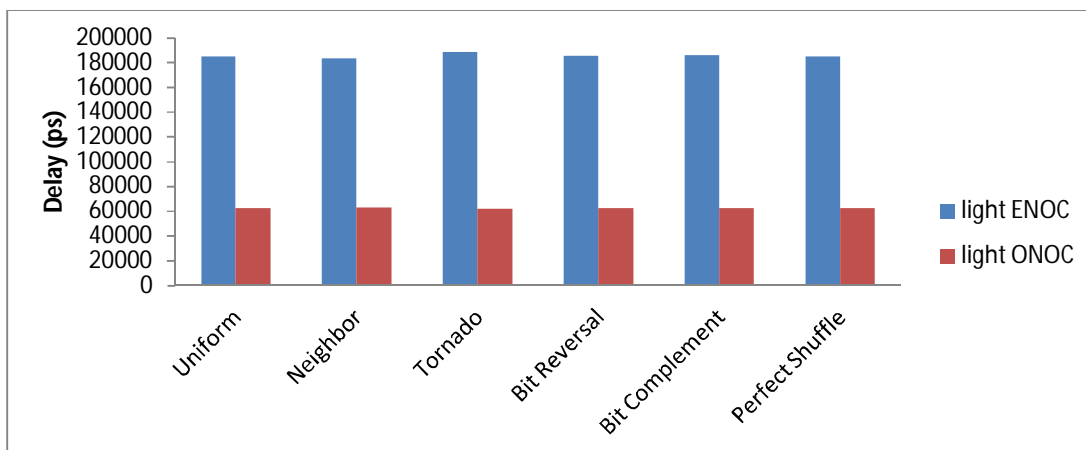
شکل 5-14: متوسط تأخیر تک‌پخشی (ps) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه نوری روی تراشه الکترونیکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

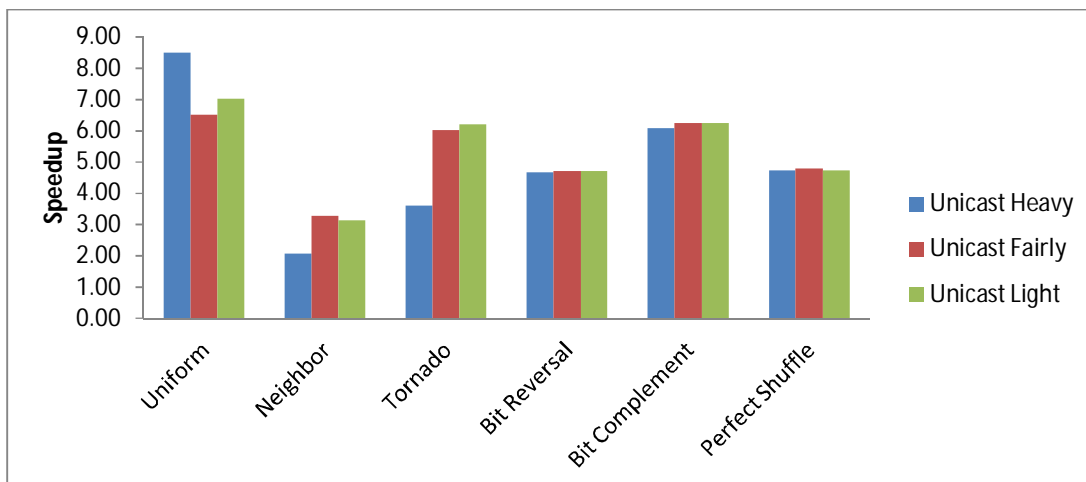


(ب)

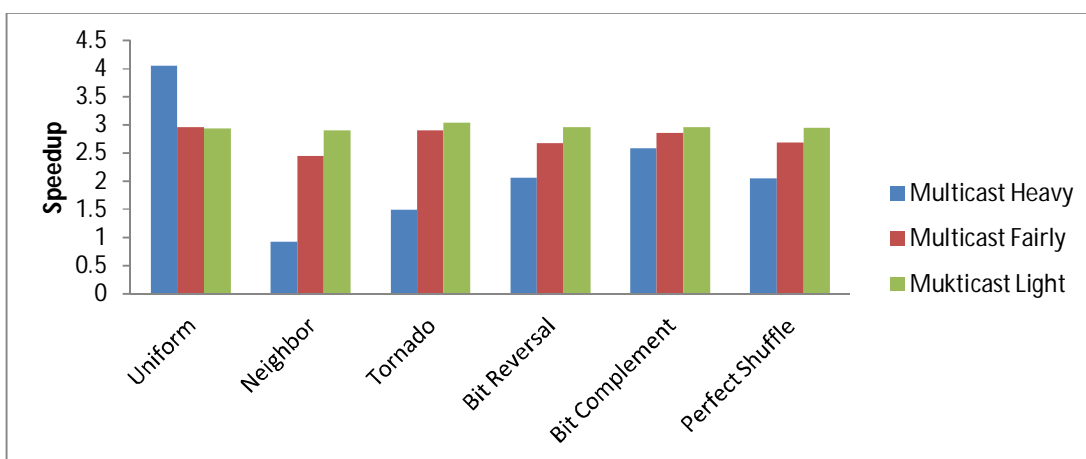


(ج)

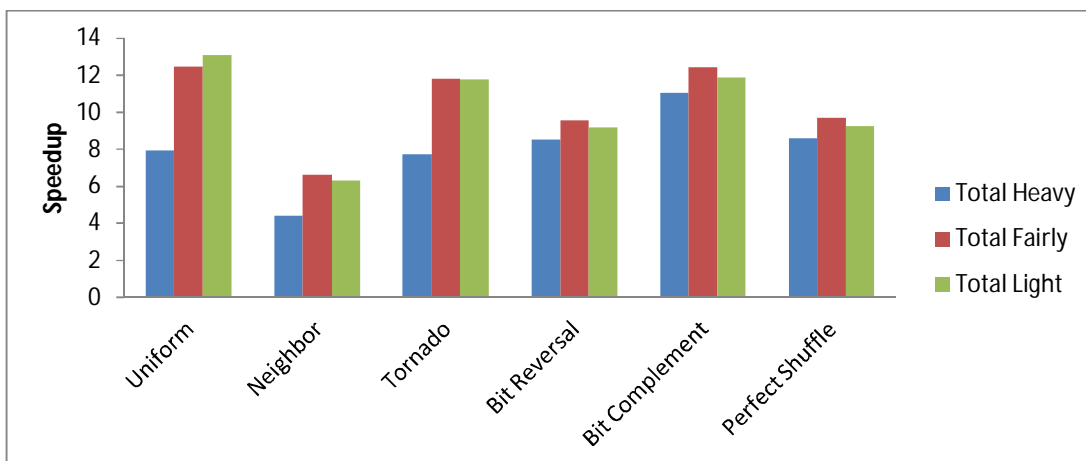
شکل 5-15: متوسط تأخیر چندپخشی (ps) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه نوری روی تراشه الکترونیکی، مبتنی بر همبندی پروانه، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

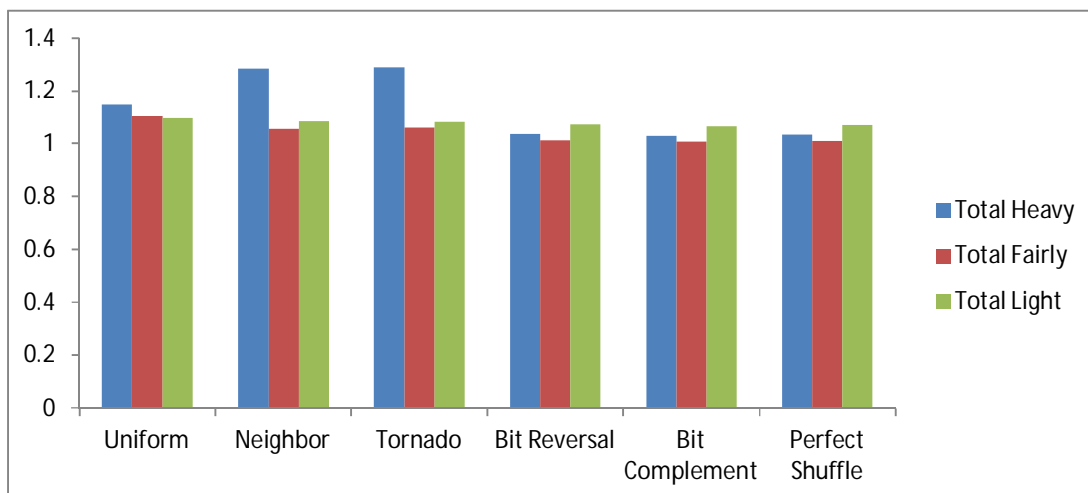


(ب)



(ج)

شکل 5-16: تسريع شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازیگر بندی نسبت به شبکه نوری روی تراشه الکتریکی، هر دو مبتنی بر هم بندی پروانه،



شکل 5-17: میزان افزایش تاخیر شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازپیکربندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی برهم‌بندی پروانه،

شبکه مبتنی بر پروانه در حالت بازپیکربندی، توانایی ارسال داده چندپخشی را دارد. این توانایی به خاطر اتصالات بیشتر و همچنین الگوریتم مسیریابی به کار رفته می‌باشد. شبکه نوری مبتنی بر پروانه دارای توانایی ارسال چندپخشی نمی‌باشد. به‌کارگیری الگوریتم مسیریابی اولین جد مشترک در حالت پروانه نیاز به محاسبات بیشتری نسبت به الگوریتم ترتیب بعد دارد، به همین دلیل در اینجا از الگوریتم ترتیب بعد برای مسیریابی استفاده شده است.

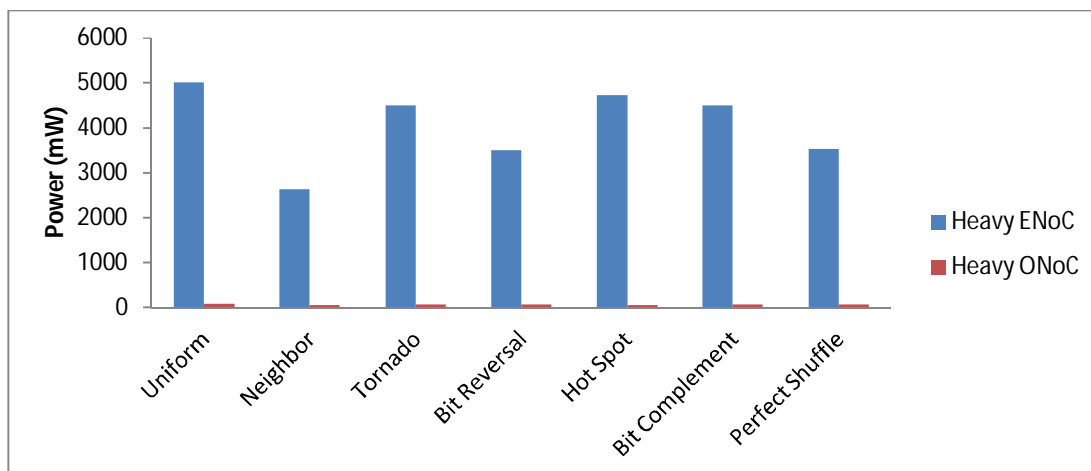
تفاوت در الگوریتم مسیریابی باعث کاهش توان و افزایش تاخیر در حالت بازپیکربندی شده است. هر چند پیاده‌سازی هر دو الگوریتم مسیریابی در حالت بازپیکربندی سربار کمی دارد، ولی استفاده از الگوریتم اولین جد امکان ارسال داده چندپخشی را فراهم می‌آورد.

#### 5-2-2-4-2- تحلیل توان

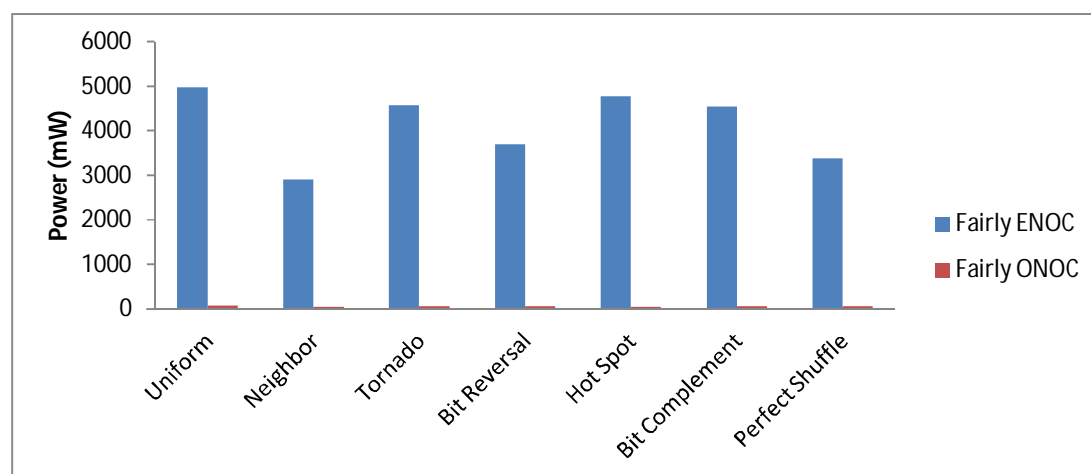
شکل‌های (5-18)، (5-19) و (5-20)، متوسط توان مصرفی انتقال داده در شبکه نوری پیشنهادی را برای بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع درحالت ترافیک‌های با بار سبک، متوسط و سنگین به‌ازای توابع توزیع آدرس مقصد متفاوت نشان می‌دهند. میزان کاهش توان مصرفی در شبکه

نوری پیشنهادی نسبت به شبکه الکتریکی نیز در شکل (5-21) نمایش داده شده است. متوسط توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی در مقایسه با بهترین شبکه الکتریکی، به ترتیب در بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع، 49/15، 86/95 و 58/92 برابر کم‌تر شده است.

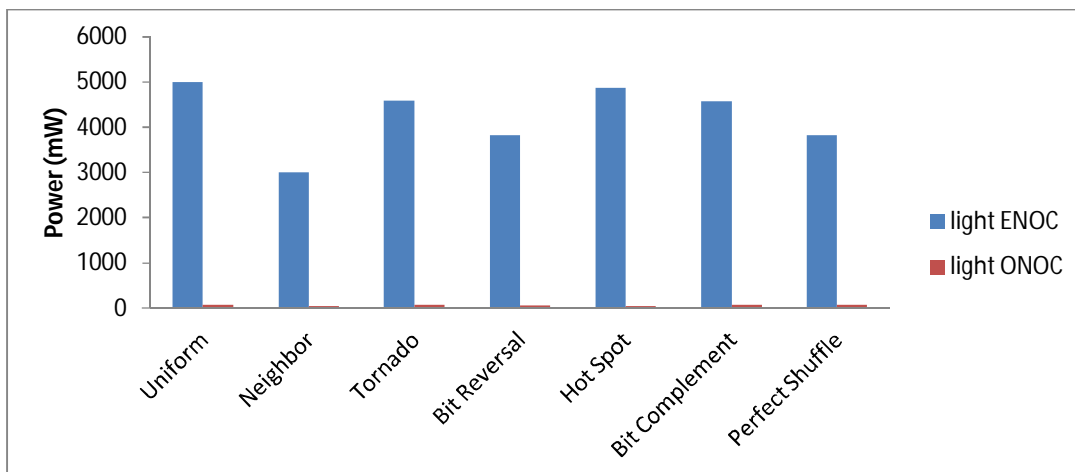
در شکل (5-24)، شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی با یک شبکه نوری بدون این ویژگی مقایسه شده است. معماری پروانه بدون بازپیکربندی قادر به ارسال چندپخشی نمی‌باشد. توان در حالت کلی 1,96 برابر کم‌تر شده است.



(الف)

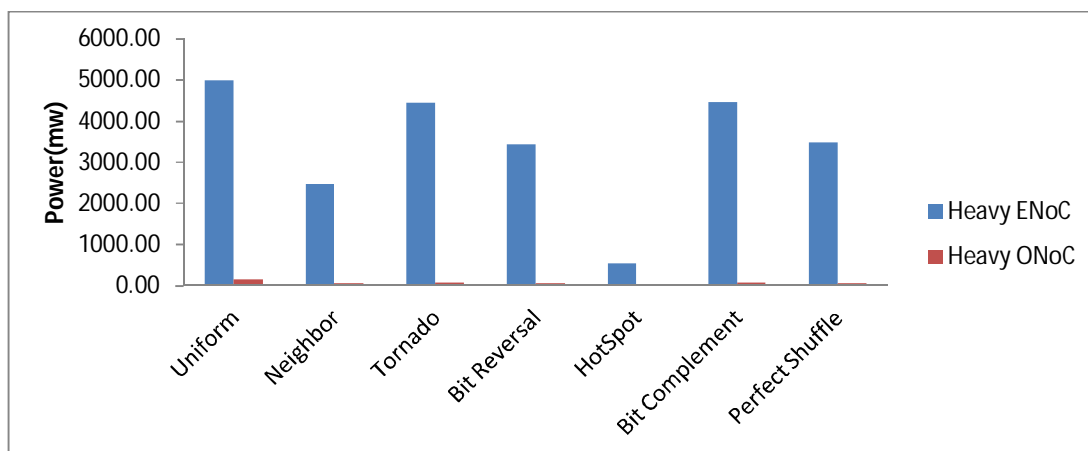


(ب)

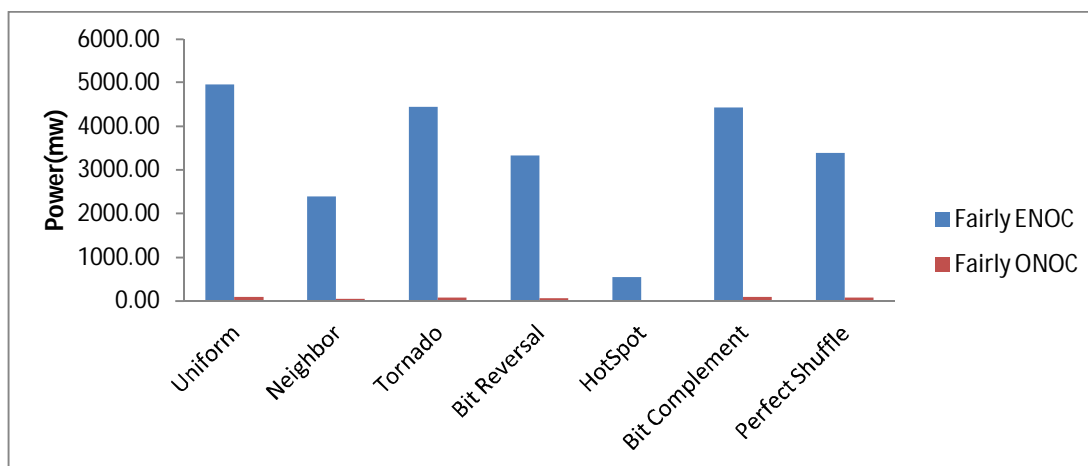


(ج)

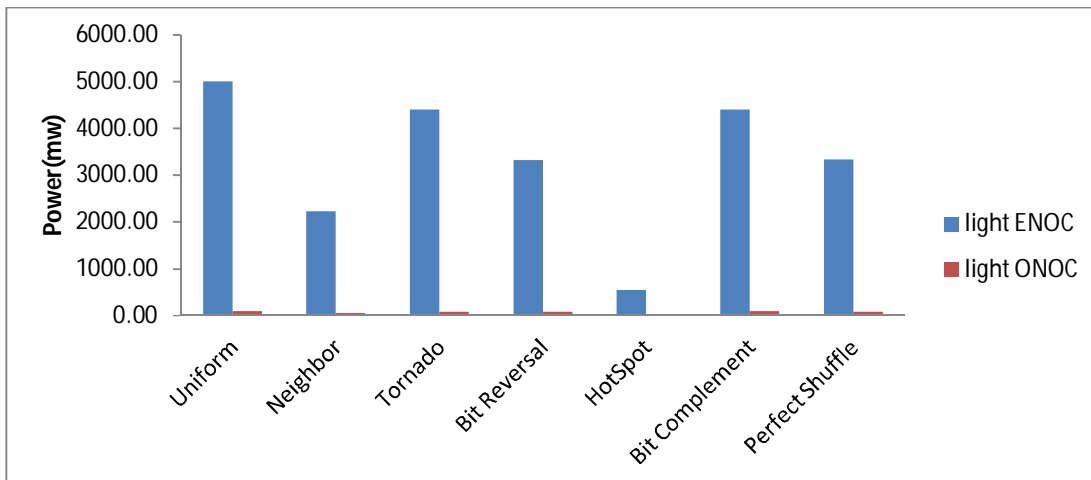
شکل 5-18: متوسط توان مصرفی کل (mw) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکترونیکی، مبتنی برهمبندی پروانه، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

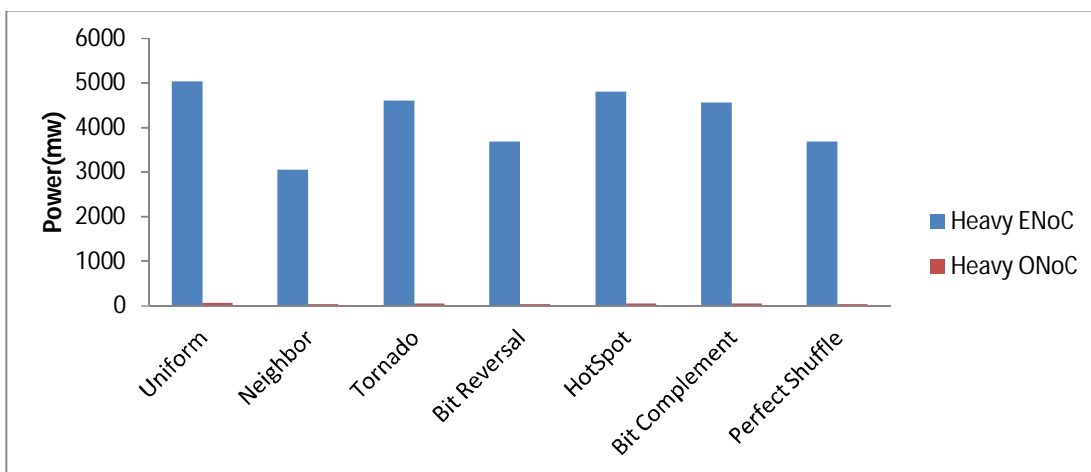


(ب)

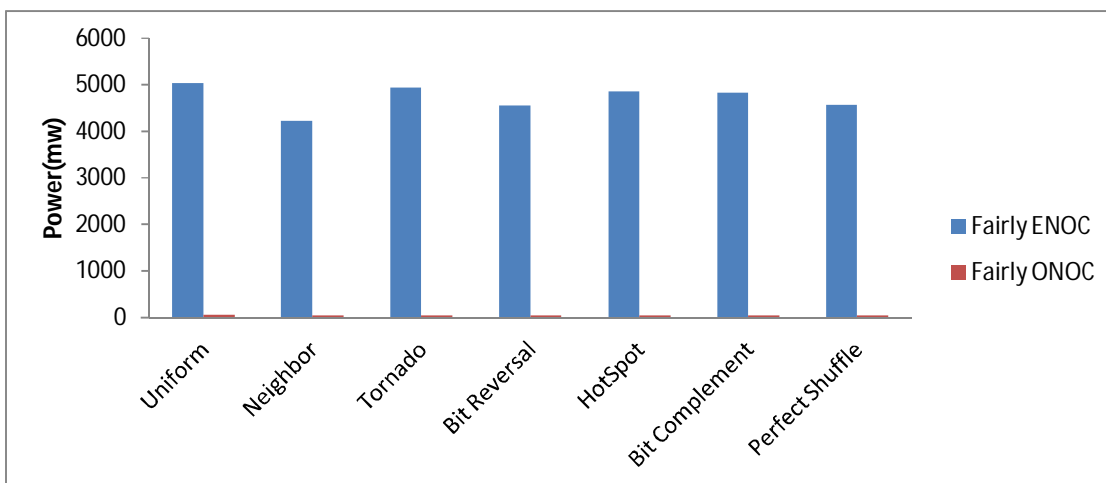


(ج)

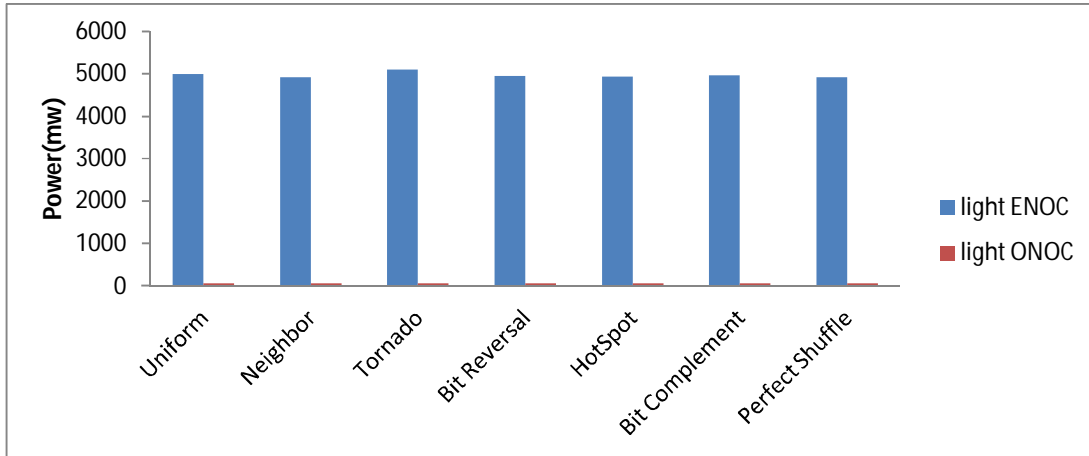
شکل 5-19: متوسط توان مصرفی تک پخششی (mw) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی پروانه، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)

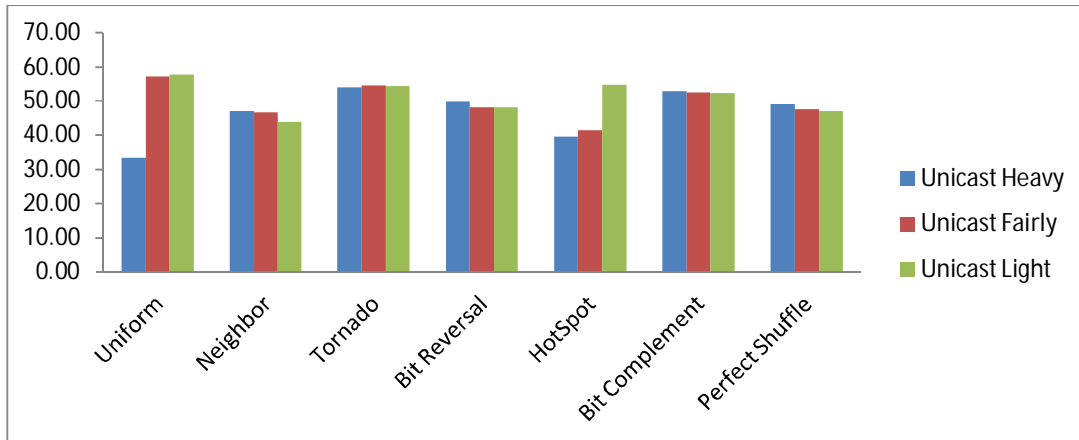


(ب)

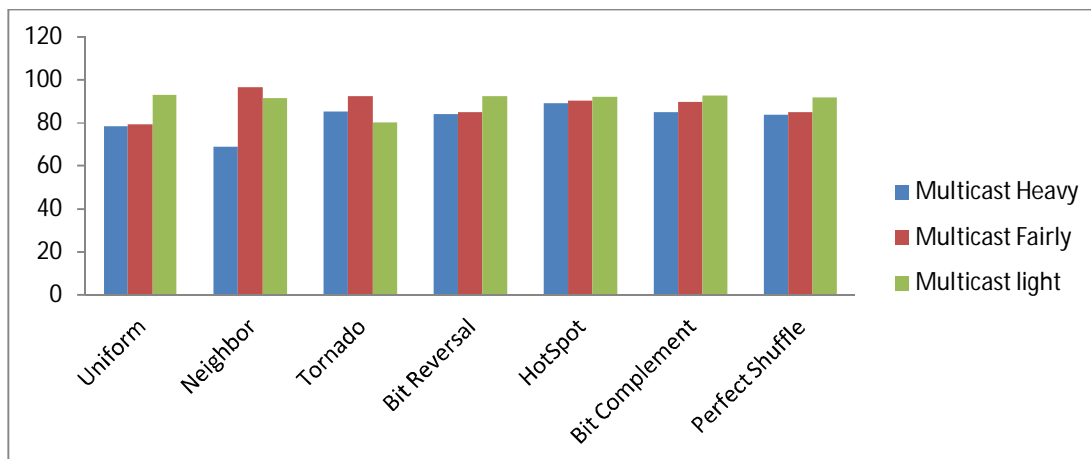


(ج)

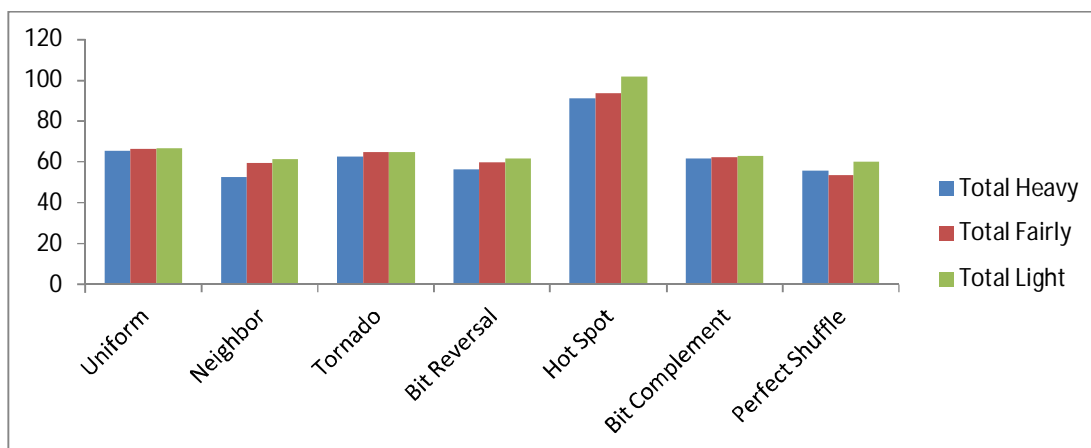
شکل 5-20: متوسط توان مصرفی چندپخشی (mw) در شبکه نوری پیشنهادی و شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی پروانه، (الف) ترافیک سنگین، (ب) ترافیک متوسط، (ج) ترافیک سبک.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 5-21: میزان کاهش متوسط توان مصرفی (mw) در شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر هم‌بندی پروانه، (الف) ارسال تک‌پخشی، (ب) ارسال چندپخشی، (ج) کلی.

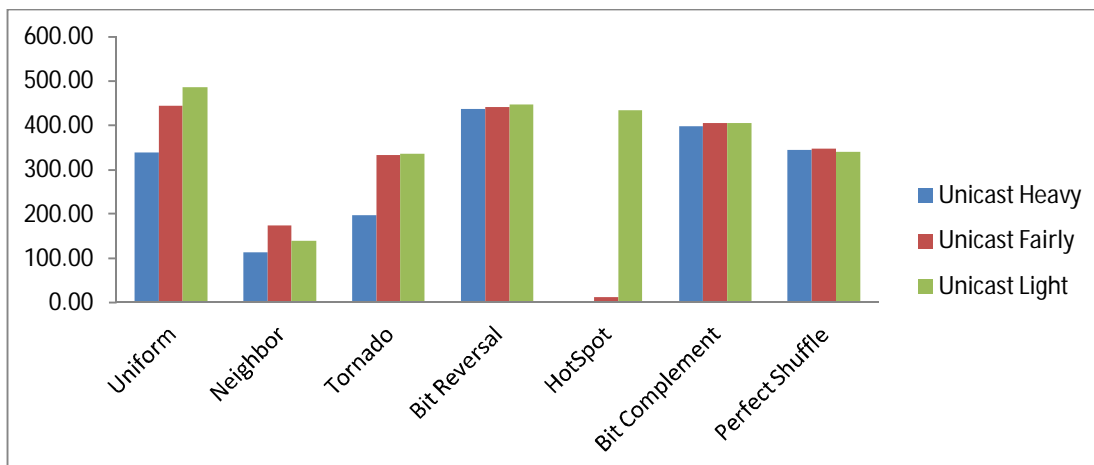
### 5-4-2-3- تحلیل انرژی

میزان کاهش انرژی مصرفی در شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه الکتریکی در شکل (5-5)

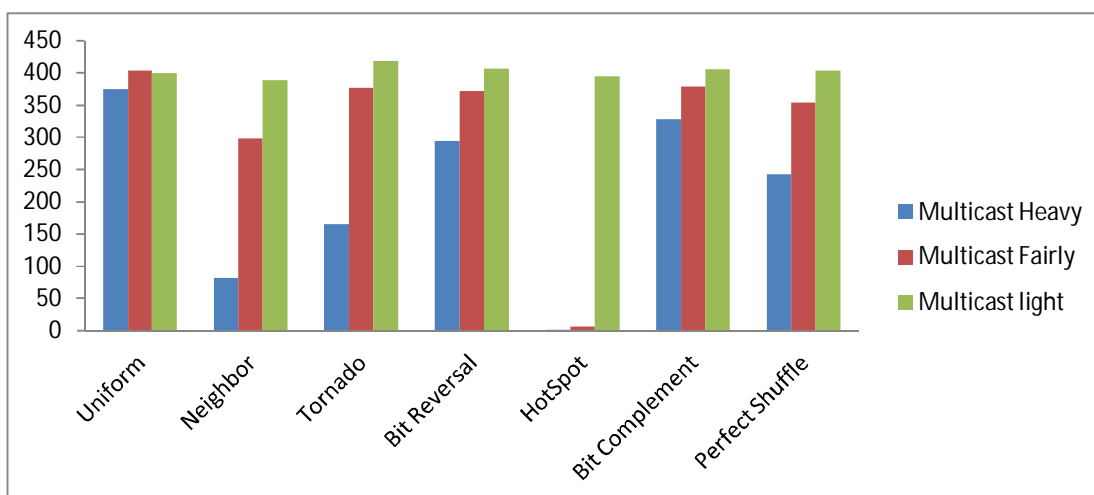
(22) نمایش داده شده است. به طور میانگین، انرژی مصرفی متوسط شبکه نوری پیشنهادی در مقایسه با بهترین شبکه الکتریکی، به ترتیب در بسته‌های تک‌پخشی، چندپخشی و مجموع، 313/22، 309/24 و 340/78 برابر کم‌تر شده است.

براساس شکل (5-23)، به طور میانگین، انرژی مصرفی متوسط شبکه نوری با قابلیت

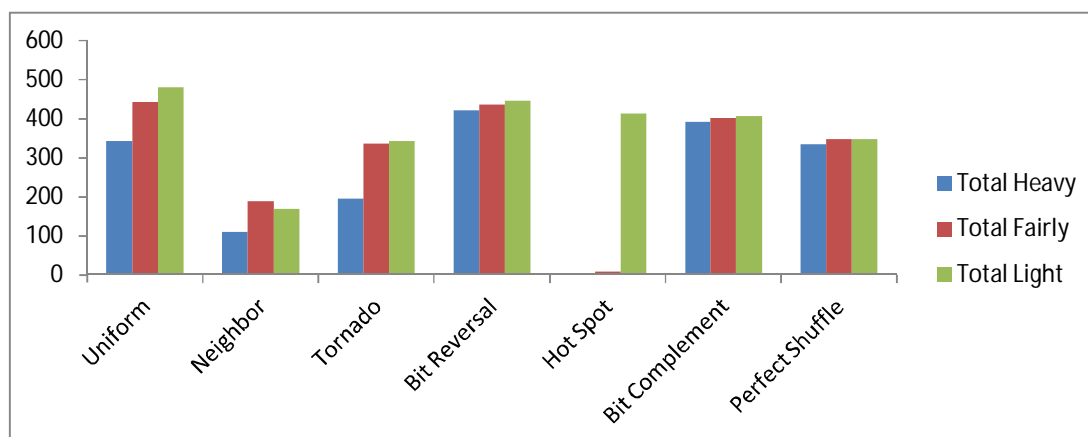
بازپیکربندی با یک شبکه نوری بدون این ویژگی، در مجموع، 1/24 برابر بیشتر شده است.



(الف)

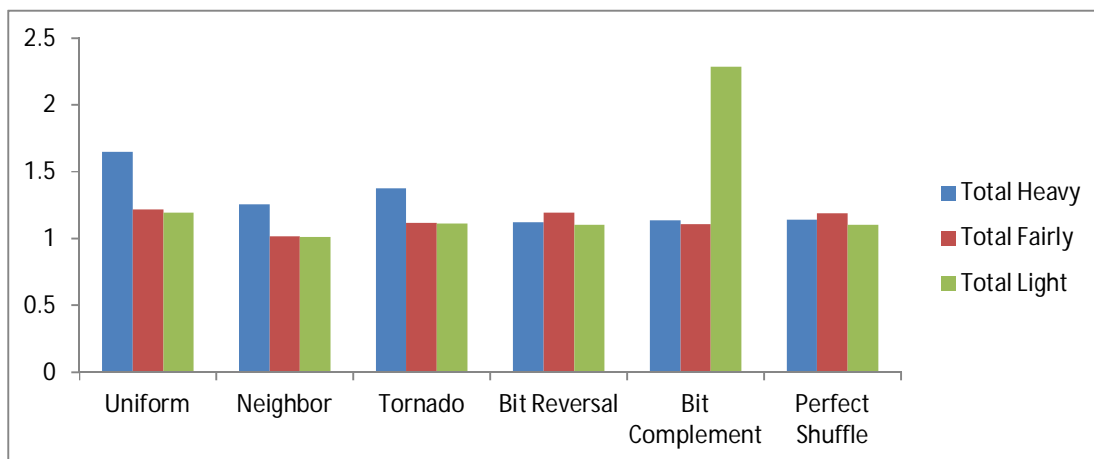


(ب)

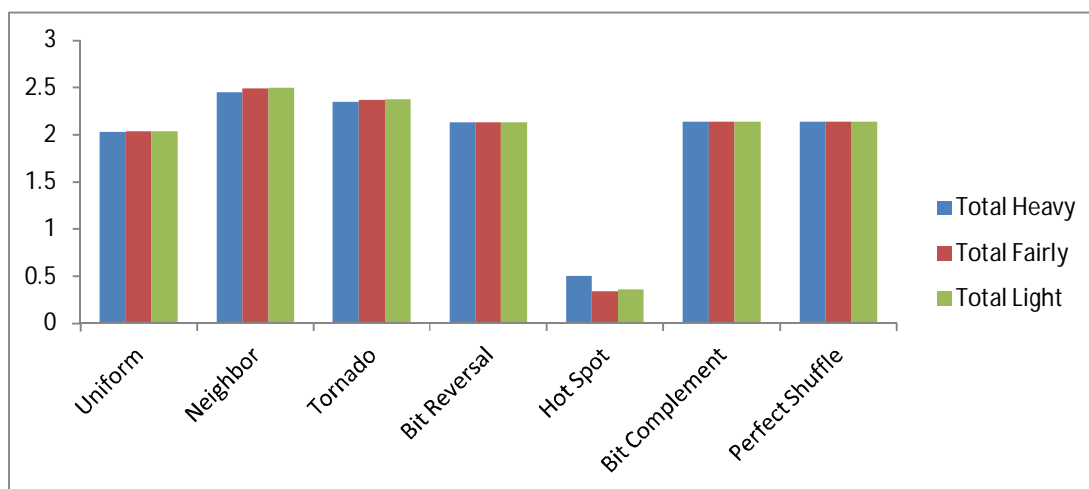


(ج)

شکل 5-22: میزان کاهش انرژی شبکه نوری پیشنهادی نسبت به شبکه روی تراشه الکتریکی، مبتنی بر همبندی پروانه، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.



شکل 5-23: میزان کاهش انرژی شبکه نوری با قابلیت بازیگر بندی نسبت به شبکه نوری، مبتنی بر هم-بندی پروانه، ترافیک سنگین، ترافیک متوسط، ترافیک سبک.



شکل 5-24: میزان کاهش توان مصرفی شبکه نوری پیشنهادی با قابلیت بازیگر بندی نسبت به شبکه نوری، هر دو مبتنی بر هم-بندی پروانه،

### نتیجه‌گیری و کارهای آتی

با پیشرفت فناوری VLSI، ابعاد ترانزیستورها کاهش یافته و این امر سبب افزایش تعداد ترانزیستورها درون تراشه شده است. این افزایش در تعداد پردازنده‌های مجتمع شده بر روی یک تراشه، افزایش اتصالات سراسری را در پی خواهد داشت و همان‌طور که پیش از این بیان شد، ارتباطات سراسری نقش مهمی در کارایی کل سیستم ایفا می‌کنند. به همین جهت، شبکه‌های روی تراشه به عنوان ساختار ارتباطی کارا و مقیاس‌پذیر برای جایگزینی معماری‌های سنتی مبتنی بر گذرگاه معرفی شدند. با این حال، اتصالات روی تراشه بخش مهمی از توان مصرف شده در معماری‌های چندپردازنده‌ای با کارایی بالا را شامل می‌شوند. این مسئله سبب شده است تا کاهش توان مصرفی در شبکه‌های روی تراشه از اهمیت بالایی برخوردار شود.

با پیشرفت فناوری نوری سیلیکونی، استفاده از اتصالات نوری درون تراشه به عنوان راه حلی کارا برای پیاده‌سازی ساختار ارتباطی بین پردازنده‌های یک تراشه مطرح شد. شفافیت نرخ بیت در عناصر سویچینگ نوری (انرژی مصرفی در سویچ‌های نوری مستقل از نرخ بیت داده ارسالی است)، و تلفات انتشار پایین در موج‌برهای نوری (توان مصرفی در اتصالات نوری مستقل از مسافت طی شده است)، دو عامل مهم در کاهش قابل توجه توان اتلافی در عناصر نوری سیلیکونی است. از سوی دیگر به کارگیری اتصالات نوری برای انتقال داده در سطح تراشه می‌تواند بسیاری از مشکلات مطرح در اتصالات الکتریکی، مانند پهنای باند، تأخیر و نویز هم‌شنوایی را برطرف نماید. بر این اساس، ایده‌ی استفاده از شبکه‌های نوری روی تراشه برای پیاده‌سازی اتصالات سراسری در سطح تراشه مطرح شد. با این وجود، معماری‌های نوری که تاکنون ارائه شده‌اند از مقیاس‌پذیری محدودی برخوردار هستند یا برای انتقال بسته‌های کنترلی به یک شبکه الکتریکی وابسته‌اند. در این پایان نامه یک شبکه نوری با قابلیت بازپیکربندی طراحی

نمودیم. از آنجا که در اتصالات نوری برخلاف اتصالات الکتریکی، مسافت بین گره‌ها تأثیر منفی بر پارامترهای چون تأخیر ندارد در این جا هدف بازپیکربندی، تغییر هم‌بندی براساس کاربرد، کاهش ازدحام و انتقال سیگنال از مسیری که نیاز به روشن کردن کمترین تعداد ریزحلقه داشته باشیم می‌باشد که در این امر منجر به کاهش توان می‌شود.

در صورتی که بتوان با توجه به نیازهای ترافیکی و کاربرد مورد نظر شبکه را بازپیکربندی کرد، کارایی و قابلیت شبکه روی تراشه افزایش می‌یابد. در این پروژه یک معماری جدید ارائه گردید که قادر به پشتیبانی از هم‌بندی توری مدور و هم‌بندی پروانه می‌باشد. ضمن اینکه ساختار این هم‌بندی به گونه‌ای است که می‌توان سایر هم‌بندی‌های درختی را هم با آن پیاده‌سازی کرد و علاوه بر آن امکان داشتن همزمان چند هم‌بندی پروانه را فراهم می‌آورد.

در معماری پیشنهادی سعی شده است تا ویژگی مقیاس‌پذیری شبکه، کاهش توان مصرفی و افزایش کارایی، در کنار یکدیگر لحاظ شوند. با توجه به کاهش انرژی در هر دو هم‌بندی، کاهش چشمگیر توان در هم‌بندی پروانه و افزایش ناچیز تأخیر، معماری پیشنهادی ارائه شده در دستیابی به اهداف خویش موفق بوده است. بر این اساس، ترکیب تکنیک WDM و مسیریابی طول موج به همراه قابلیت کاهش توان مصرفی در شبکه‌های نوری روی تراشه، به عنوان راهکاری برای پیاده‌سازی ارتباطات چندپخشی مطرح شد. به علاوه، با اختصاص طول موج‌های جداگانه به هر یک از بسته‌های تک‌پخشی و چندپخشی، امکان ارسال همزمان این بسته‌ها در معماری پیشنهادی فراهم شده است.

طراحی مسیریاب‌های نوری نیز بر پایه عناصر سویچینگ نوری غیر فعال انجام شده است که به این ترتیب، بسته‌های نوری در معماری پیشنهادی، تماماً به صورت نوری و بدون نیاز به پردازش الکتریکی مسیریابی می‌شوند. همچنین بر خلاف معماری‌های دیگر، بسته‌های کنترلی همانند بسته‌های داده از طریق اتصالات نوری و بدون نیاز به شبکه الکتریکی در سطح تراشه جابجا می‌گردند. در واقع، معماری تمام-نوری پیشنهادی از یک شبکه کنترلی مبتنی بر یک crossbar نوری مقیاس‌پذیر برای واریسی مقصد، و یک شبکه داده با قابلیت بازپیکربندی مبتنی بر هم‌بندی توری دو-بعدی و پروانه جهت

انتقال داده‌ها تشکیل شده است. حذف پردازش الکتریکی در مسیر یاب‌ها و حذف شبکه الکتریکی برای انتقال بسته‌های کنترلی، در کنار عناصر سویچینگ نوری غیر فعال، منجر به کاهش قابل توجه توان مصرفی در شبکه نوری پیشنهادی می‌شود.

به علاوه، برای مقابله با وضعیت مشغولی گره مقصد، از ترکیب دو روش ارسال مجدد و ذخیره موقت استفاده شده است که سهم مهمی در افزایش کارایی شبکه داشته باشد.

نتایج حاصل از مقایسه‌ی شبکه نوری پیشنهادی با بهترین شبکه روی تراشه الکتریکی در فناوری 22 نانومتر و مقایسه با شبکه‌های نوری بدون ویژگی بازپیکربندی، مؤید کارایی بالای اتصالات نوری برای انتقال داده‌ها در سطح تراشه است.

در انتها، به دو مورد به عنوان کارهای آتی اشاره می‌شود:

1. پیاده‌سازی هم‌بندی‌های دیگر در معماری پیشنهادی

در پیش گفته شد که هدف پیاده‌سازی معماری با قابلیت بازپیکربندی بر مبنای گذر بین هم-بندی‌ها می‌باشد. از آنجا که، هم‌بندی‌های مختلف برای کاربردهای مختلف بهینه و طراحی شده اند پس هدف بازپیکربندی در این پژوهش، بر مبنای کاربردهای مختلف می‌باشد. در اینجا تنها دو هم‌بندی توری و پروانه مورد بررسی قرار گرفتند، در بخش 4 دلیل این انتخاب به طور مفصل شرح داده شد.

2. شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این پایان‌نامه با استفاده از ترافیک‌های مصنوعی بوده است.

البته سعی شده که به کمک ترافیک‌های استاندارد (یکنواخت، محلی و مبتنی بر جایگشت)، عملکرد و کارایی شبکه در شرایط متفاوت و نیازهای مختلف برنامه‌های کاربردی ارزیابی شود. با این حال، برنامه‌های محاسباتی حقیقی نیز باید بر روی شبیه‌ساز پیاده‌سازی گردند تا معماری تحت الگوهای ترافیکی واقعی نیز بررسی شود.

## فهرست مراجع

- [Artundo\_08] I. Artundo, W. Heirmanb, C. Debaes, J. Dambre, J. Van, J. Campenhout, and H. Thienpont, "Design of a reconfigurable optical interconnect for large-scale multiprocessor networks", *Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits*, 2008.
- [Bakoglu\_85] H. B. Bakoglu and J. D. Meindl, "Optimal Interconnection Circuits for VLSI," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 32, No. 5, pp. 903–909, May 1985.
- [Benini\_02] L. Benini, G. De Micheli, "Networks on Chips: A New SoC Paradigm," *IEEE Computer*, Vol. 35, No. 1, pp. 70–80, Jan. 2002.
- [Briere\_07] M. Briere, et al., "System Level Assessment of an Optical NoC in an MPSoC Platform," in *Design, Automation & Test in Europe (DATE'07)*, pp. 1-6, April 2007.
- [Chan\_10] J. Chan, G. Hendry, A. Biberman, L. P. Carloni, and K. Bergman, "PhoenixSim: A Simulator for Physical-Layer Analysis of Chip-Scale Photonic Interconnection Networks," in *Design, Automation & Test in Europe (DATE'10)*, pp. 691-696, March 2010.
- [Chen\_07] G. Chen, et al., "Predictions of CMOS compatible on-chip optical interconnect," *VLSI J. Integration*, Vol. 40, No. 4, pp. 434–446, 2007.
- [Dally\_01] W. J. Dally and B. Towles, "Route Packets, Not Wires: On-Chip Interconnection Networks," in *38th Design Automation Conference (DAC'01)*, pp. 684–689, Jun. 2001.
- [Dally\_04] W. J. Dally and B. Towles, *Principles and Practices of Interconnection Networks*: Morgan Kaufmann Publishers, 2004.
- [Duato\_03] J. Duato, S. Yalamanchili, and L. Ni, *Interconnection Networks An Engineering Approach*: Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- [Glass\_92] C. J. Glass and L. M. Ni, "The Turn Model for Adaptive Routing," in *19th International Symposium on Computer Architecture (ISCA'92)*, pp. 278-287, May 1992.
- [Gao\_09] Y. Gao, Y. Jin, Z. Chang, and W. Hu, "Ultra-low Latency Reconfigurable Photonic Network on Chip Architecture Based on Application Pattern", *OSA/OFC/NFOEC, IEEE*, 2009.
- [Goodman\_84] J. W. Goodman, F. I. Leonberger, Sun-Yan Kung, and R. A. Athale, "Optical Interconnections for VLSI Systems," *Proceedings of the IEEE, Special Issue on Optical Computing*, Vol. 72, No. 7, pp 850–

865, 1984.

- [Gu\_09a] H. Gu, J. Xu, and W. Zhang, "A Low-Power Fat Tree-based Optical Network-on-Chip for Multiprocessor System-on-Chip," in *Design, Automation & Test in Europe (DATE'09)*, pp. 3-8, April 2009.
- [Gu\_09b] H. Gu, K. H. Mo, J. Xu, and W. Zhang, "A Low-power Low-cost Optical Router for Optical Networks-on-Chip in Multiprocessor Systems-on-Chip," in *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI'09)*, pp. 19-24, May 2009.
- [Guillemot\_98] C. Guillemot, "Transparent Optical Packet Switching: The European ACTS KEOPS Project Approach," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 12, pp. 2117–2134, Dec. 1998.
- [Haurylau\_06] M. Haurylau, et al., "On-chip Optical Interconnect Roadmap: Challenges and Critical Directions," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 12, No. 6, pp. 1699-1705, 2006.
- [Hemani\_00] A. Hemani, et al., "Network on Chip: An Architecture for Billion Transistor Era," in *IEEE NorChip Conf.*, pp. 166-173, Nov. 2000.
- [Hendry\_09] G. Hendry, et al., "Analysis of Photonic Networks for a Chip Multi-Processor Using Scientific Applications," in *3rd ACM/IEEE International Symposium on Networks-on-Chip (NoCS'09)*, pp. 104-113, May 2009.
- [Ho\_06] R. Ho, "Wire Scaling and Trends," a presentation at MTO DARPA meeting, Sun Microsystems Laboratories, Jackson Hole, WY, Aug. 2006.
- [Hoskote\_07] Y. Hoskote, S. Vangal, A. Singh, N. Borkar, and S. Borkar, "A 5-GHz Mesh Interconnect for a Teraflops Processor," *IEEE Micro*, Vol. 27, No. 5, pp. 51-61, Sept/Oct. 2007.
- [Hsieh\_06] I.-W. Hsieh, et al., "Ultrafast-pulse self-phase modulation and third-order dispersion in si photonic wire-waveguides," *Optics Express*, Vol. 14, No. 25, pp. 12 380–12 387, Dec. 2006.
- [Jerger\_08] N. E. Jerger, L.-S. Peh, and M. Lipasti, "Virtual Circuit Tree Multicasting: A Case for On-Chip Hardware Multicast Support," in *35th International Symposium on Computer Architecture (ISCA'08)*, pp. 229-240, June 2008.
- [Jeng\_99] J. Jeng, and L. W. Ning, "Parallel Polygon Scan Conversion on RMESH Multiprocessors", *ACM Applied computing*, 1999.
- [Kirman\_06] N. Kirman, et al., "Leveraging Optical Technology in Future Bus-based Chip Multiprocessors," in *39th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO-39)*, pp. 492-503, Dec. 2006.
- [Kirman\_10] N. Kirman and J. F. Martinez, "A Power-efficient All-optical On-chip Interconnect Using Wavelength-based Oblivious Routing," in *15th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS'10)*, pp.

15-28, March 2010.

- [Kodi\_10] A. Kodi, R. Morris, and A. Louri, "PROPEL: Power and Area-Efficient Nanophotonic On-Chip Interconnect Architecture for Multicores," *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-8, 2010.
- [Koohi\_09] S. Koohi and S. Hessabi, "Contention-Free on-Chip Routing of Optical Packets," in *3rd ACM/IEEE International Symposium on Networks-on-Chip (NoCS'09)*, pp. 134-143, May 2009.
- [Koonath\_05] P. Koonath, T. Indukuri, and B. Jalali, "Add-drop filters utilizing vertically coupled microdisk resonators in silicon," *Journal of Applied Physics Letters*, Vol. 86, pp. 091102-1–091102-3, March 2005.
- [Kumar\_05] R. Kumar, V. Zyuban, and D. M. Tullsen, "Interconnections in Multi-Core Architectures: Understanding Mechanisms, Overheads and Scaling," in *32nd International Symposium on Computer Architecture (ISCA'05)*, pp. 408–419, June 2005.
- [Li\_09] Z. Li, et al., "Spectrum: A Hybrid Nanophotonic-Electric On-Chip Network," in *46th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC'09)*, pp. 575-580, July 2009.
- [Lipson\_05] M. Lipson, "Guiding, modulating, and emitting light on silicon—challenges and opportunities," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 12, pp. 4222–4238, 2005.
- [Malumbres\_96] M. P. Malumbres, J. Duato, and J. Torrellas, "An Efficient Implementation of Tree-Based Multicast Routing for Distributed Shared-Memory Multiprocessors," in *8th IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing*, pp. 186-189, 1996.
- [Manolatu\_99] C. Manolatu, S. G. Johnson, S. Fan, P. R. Villeneuve, H. A. Haus, and J. D. Joannopoulos, "High-Density Integrated Optics," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 9, pp. 1682–1692, Sep. 1999.
- [McKinley\_92] P. K. McKinley, H. Xu, E. T. Kalns, and L. M. Ni, "ComPaSS: Efficient Communication Services for Scalable Architectures," in *Proceedings of Supercomputing '92*, pp. 478-487, 1992.
- [Miller\_00] D. Miller, "Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No. 6, pp. 728–749, 2000.
- [Modarressi\_08] M. Modarressi, H. Sarbazi-Azad, and A. Tavakkol, "Virtual Point-to-Point Links in Packet-Switched NoCs", *Computer Society IEEE*, 2008.
- [O'Connor\_04] I. O'Connor and F. Gaffiot, "On-chip optical interconnect for low-power," in *E. Macii (Ed.), Ultra-Low Power Electronics and Design, Kulwer, Dordrecht*, 2004.
- [Ogras\_04] U. Y. Ogras, and R. Marculescu, "Application-Specific Network-on-Chip Architecture Customization via Long-Range Link Insertion",

Marco GSRC, NSF CCR-00-93104, and SRC 2004-HJ-1189.2004.

- [Pan\_09] Y. Pan, P. Kumar, J. Kim, G. Memik, Y. Zhang, and A. Choudhary, "Firefly: Illuminating Future Network-on-Chip with Nanophotonics," in *36th International Symposium on Computer Architecture (ISCA'09)*, pp. 429-440, June 2009.
- [Parhami\_99] Parhami, "Introduction to parallel processing algorithms and architectures", *Plenum Press, New York*.<sup>1999</sup>.
- [Poon\_09] A. W. Poon, X. Luo, F. Xu, and H. Chen, "Cascaded Microresonator-Based Matrix Switch for Silicon On-Chip Optical Interconnection," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, No. 7, pp. 1216-1238, 2009.
- [Sekar\_08] K. Sekar, K. Lahiri, A. Raghunathan, and S. Dey, "Dynamically Configurable Bus Topologies for High-Performance On-Chip Communication", *IEEE VLSI*, Vol. 16, No. 10, 2008.
- [Schultz\_00] S. Schultz, E. Glytsis, and T. Gaylord, "Design, fabrication, and performance of preferential-order volume grating waveguide coupler," *Applied Optics-IP*, Vol. 39, No. 8, pp. 1223-1232, 2000.
- [Shacham\_08] A. Shacham, K. Bergman, and L. P. Carloni, "Photonic Networks-on-Chip for Future Generations of Chip Multiprocessors," *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 35, No. 1, pp. 70-78, 2008.
- [Small\_07] A. B. Small, B. G. Lee, K. Bergman, Q. Xu, M. Lipson, "Multiple-wavelength integrated photonic networks based on microring resonator devices," *Journal of Optical Networking*, Vol. 6, No. 2, pp. 112-120, 2007.
- [Shafaei\_10] A. B. Shafaei, "Optical Network On chip with multi broadcasting ability," *Master Thesis, Sharif University of Technology, 110, 2010*.
- [Soref\_86] R. Soref and J. Lorenzo, "All-silicon active and passive guided-wave components for  $\lambda = 1.3$  and  $1.6 \mu\text{m}$ ," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 22, No. 6, pp. 873-879, June 1986.
- [Soref\_87] R. A. Soref and B. R. Bennett, "Electrooptical effects in silicon," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 23, No. 1, pp. 123-129, Jan. 1987.
- [Vantrease\_08] D. Vantrease, et al., "Corona: System Implications of Emerging Nanophotonic Technology," in *35th International Symposium on Computer Architecture (ISCA'08)*, pp. 153-164, June 2008.
- [Varga] A. Varga, "OMNeT++ Discrete Event Simulation System," Available: <http://www.omnetpp.org>.
- [Wang\_09] L. Wang, Y. Jin, H. Kim, and E. J. Kim, "Recursive Partitioning Multicast: A Bandwidth-Efficient Routing for Networks-On-Chip," in *3rd ACM/IEEE International Symposium on Networks-on-Chip (NoCS'09)*, pp. 64-73, May 2009.
- [Wentzlaff\_07] D. Wentzlaff, et al., "On-Chip Interconnection Architecture of the Tile Processor," *IEEE Micro*, Vol. 27, No. 5, pp. 15-31, Sept/Oct.

2007 2007.

- [Xu\_92] H. Xu, P. K. McKinley, and L. M. Ni, "Efficient Implementation of Barrier Synchronization in Wormhole-Routed Hypercube Multicomputers," in *12th International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 118-125, 1992.
- [Zhang\_10] X. Zhang and A. Louri, "A Multilayer Nanophotonic Interconnection Network for On-Chip Many-Core Communications," in *47th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC'10)*, pp. 156-161, June 2010.
- [Zhou\_06] J. Zhou, W.H. Wong, E.Y.B. Pun, Y.Q. Shen, Y.X. Zhao, "Fabrication of low loss optical waveguides with a novel thermo-optical polymer material," *Journal of Optica Applicita*, Vol. 36, No. 2/3, pp. 429-435, 2006.

## **Abstract**

According to power limitation on a chip and the need to simultaneously access high utilization and low power consumption, Multi-Processor System-on-Chip (MPSoC) architectures have been introduced. The major part of power consumption in a network on chip belongs to interconnects. One of the most important issues is to decrease power consumption while maintaining high utilization. The ability of optical interconnects in decreasing power consumption and increasing utilization has introduced a new architecture called optical network on chip. This architecture uses the benefits of optical signals and elements in order to transfer data.

In this thesis, we introduce a new architecture with reconfigurability. The goal of this architecture is to check how we can improve the parameters of an optical network based on characteristics of distributed traffic on network on chip. To achieve this goal, it is necessary to change the topology and select links and routers based on application. In order to evaluate the proposed architecture, we first introduce an optical network simulator to implement our proposed architecture at behavioral level, and then compare it with electrical network on chip, as well as optical networks on chip without reconfigurability in terms of power consumption and delay.

**Key words:** 1- Optical Transfer, 2- Network-on-Chip, 3- Reconfigurability.

