

# روش نوین توزیع بار ترافیک مبتنی بر BGP در مراکز داده توزیع شده جغرافیایی

امیر اسمعیلی و بهادر بخشی سراسکانرود

ترافیکی در سطح کاربران و درخواست‌ها بین خوشه‌ها می‌پردازد که مسأله مد نظر در این مقاله نیز است. کارهای موجود در این حوزه سه نوع روش تقسیم بار را پیاده‌سازی نموده‌اند که عبارتند از تقسیم بار متمرکز [۲]، سیستم‌های مبتنی بر سرویس‌دهنده DNS<sup>۳</sup> و روش‌های مبتنی بر مسیریابی. هر یک از این روش‌ها دارای معایب خاص خود می‌باشد. در روش‌های متمرکز، وجود یک نقطه تقسیم‌کننده ترافیک علاوه بر ایجاد تک‌نقطه اشکال (SPF)<sup>۴</sup>، مفهوم مرکز داده توزیع شده جغرافیایی را زیر سؤال می‌برد. در روش مبتنی بر DNS نیز سرعت کم انتشار رکوردها و دقت کم این روش بازدهی و سرعت واکنش به تغییرات بار را با کاهش روبه‌رو می‌نماید. با وجود آن که روش‌های مبتنی بر مسیریابی با استفاده از آدرس‌های ویرایش ششم anycast دارای سرعت عملکرد بالایی هستند ولی مشکلات این روش‌ها عدم پایداری ارتباطات<sup>۵</sup> در هنگام تغییر خوشه، قابل استفاده نبودن مسیریابی داخلی (IGP)<sup>۶</sup> در سطح مسیریاب‌های اینترنتی و همچنین محدودیت‌های آدرس‌دهی anycast می‌باشد.

در این مقاله معماری جدیدی جهت توزیع بار ترافیکی در مراکز داده توزیع شده جغرافیایی پیشنهاد شده است. در این روش با استفاده از مفهوم مسیریابی anycast، پروتکل BGP و شبکه‌های نرم‌افزارمحور، یک معماری ترکیبی ارائه گردیده و مشکلات مربوط به پایداری ارتباطات در بخش نرم‌افزارمحور شبکه و با استفاده از کنترلر مرکزی حل شده است. استفاده از BGP باعث انعطاف‌پذیری بیشتر شده و قابلیت پیاده‌سازی عملی معماری پیشنهادی در اینترنت را فراهم می‌کند، همچنین سرعت انتشار تغییرات در این روش از سایر روش‌های موجود بیشتر است. ساختار بخش‌های آتی مقاله به این شرح است: در بخش ۲ روش‌های موجود در زمینه توزیع بار در مراکز داده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش ۳ معماری پیشنهادی ارائه و توضیح داده خواهد شد. شبیه‌سازی، آنالیز و مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در بخش ۴ انجام می‌گیرد. بخش ۵ نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد در زمینه کارهای آتی اختصاص دارد.

## ۲- بررسی روش‌های موجود

مراکز داده توزیع شده جغرافیایی بر اساس استاندارد TIA/۹۴۲ در بالاترین سطح درجه اطمینان قرار دارند [۳] و بنابراین مسأله توزیع بار در آنها بسیار حایز اهمیت است. همان گونه که ذکر شد هدف این مقاله مسأله توزیع بار ترافیکی بین خوشه‌های مرکز داده توزیع شده است، بنابراین در ادامه مقالات مرتبط در این خصوص بررسی می‌گردند.

چکیده: مسایل مربوط به مراکز داده به عنوان زیرساخت ارائه سرویس‌های فناوری اطلاعات همواره حایز اهمیت بوده است. از سوی دیگر در سال‌های اخیر، بنا به دلایل متعددی از جمله تفاوت هزینه انرژی در نقاط مختلف، امنیت بالاتر و تأمین کیفیت سرویس، مراکز داده توزیع شده جغرافیایی مورد توجه قرار گرفته است که در آن مرکز داده متشکل از چندین خوشه در نقاط مختلف است. مسأله اصلی در این نوع مراکز داده، توزیع کارای بار ترافیکی بین خوشه‌ها است. با وجود این که روش‌های متعددی برای این منظور پیشنهاد شده است ولی به دلیل متمرکز بودن توزیع‌کننده، سرعت پایین واکنش به تغییرات بار ترافیکی و یا محدود بودن به یک تکنولوژی خاص، راه حل کارا، عملی و جامع این مسأله به شمار نمی‌روند. در این مقاله معماری جدیدی پیشنهاد شده که در آن برای توزیع بار ترافیکی، مفهوم مسیریابی anycast با تنظیمات مناسب BGP و در نظر گرفتن ملاحظات عملی پیاده‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بهبود قابل توجه این روش نسبت به روش‌های موجود را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: توزیع بار ترافیکی، مراکز داده توزیع شده، anycast، BGP، شبکه‌های نرم‌افزار محور.

## ۱- مقدمه

امروزه با گسترش روزافزون محاسبات ابری و سرویس‌های مبتنی بر آن، دسترس‌پذیری، امنیت و کارایی بالای این سرویس‌ها از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برای تأمین آنها از منابع زیرساخت محاسباتی و ذخیره‌سازی مراکز داده استفاده می‌شود که به دو دسته کلی متمرکز و توزیع شده تقسیم می‌گردند. با توجه به این که مراکز داده توزیع شده جغرافیایی از چندین خوشه در نقاط مختلف جهان تشکیل شده‌اند، علاوه بر توزیع بار بین سرورهای یک خوشه (که پیش از این روش‌های متعددی برای آن پیشنهاد شده است) می‌بایست روش مؤثری برای توزیع بار بین خوشه‌ها وجود داشته باشد تا همه خوشه‌ها به صورت مؤثر قادر به ارائه سرویس باشند که این جنبه از توزیع بار چندان مورد توجه قرار نگرفته است.

مسأله توزیع بار بین سرورها (در یک مرکز داده متمرکز)، عموماً از جنس اختصاص منابع در سطح سیستم عامل به ماشین‌های مجازی به منظور بهینه‌سازی اهدافی مانند نرخ پذیرش یا مصرف انرژی [۱] است. توزیع بار در این سطح هدف این مقاله نیست. در مراکز داده توزیع شده جغرافیایی، مسأله توزیع بار به تقسیم بار

این مقاله در تاریخ ۲۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۱۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

امیر اسمعیلی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (email: aesmaeili@aut.ac.ir).

بهادر بخشی سراسکانرود، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (email: bbakhshi@aut.ac.ir).

۱. در هر یک از این خوشه‌ها چندین سرویس‌دهنده وجود دارد.

2. Central Load Balancer

3. Domain Name System

4. Single Point of Failure

5. Connection Establishment

6. Interior Gateway Routing Protocols

گره نام سرویس‌دهنده را به سرور بالادستی داده و آدرس آن را دریافت می‌نماید، این آدرس تا مدت زمان خاصی معتبر است و پس از آن نیاز به سؤال مجدد می‌باشد. در راه حل شرکت akami، درخواست کاربران به سرور مدیریت نام شبکه مرکز داده ارسال و بر حسب نوع درخواست، محل کاربر، ترافیک هر یک از سرورها و ... نام یک خوشه به عنوان خوشه سرویس‌دهنده به کاربر اعلام می‌شود. نقطه ضعف اصلی این روش عدم کنترل بر روی رکوردهای ارسالی DNS پس از اعلام به کاربر می‌باشد. با توجه به ماهیت سلسله‌مراتبی، بسته‌های ارسالی به شبکه احتمالاً در سرورهای نام پایین‌دستی تا زمان پایان اعتبار آنها نگهداری شده و به سرور اصلی مراجعه انجام نخواهد شد. این موضوع کنترل مدیر شبکه به کاربران ورودی را با چالش روبه‌رو خواهد نمود چرا که در صورت تغییر حجم بار خوشه‌ها تا قبل از اتمام زمان اعتبار، امکان تغییر مسیر درخواست کاربران وجود ندارد.

### ۳-۲ تقسیم بار ترافیکی بر اساس مسیریابی

در روش‌های مبتنی بر مسیریابی، الگوریتم‌های لایه شبکه مسیر ترافیک کاربران به طرف خوشه‌های مرکز داده را تغییر می‌دهند. در اکثر مقالاتی که با استفاده از این روش به توزیع بار در سطح خوشه‌های مرکز داده پرداخته‌اند از آدرس‌های ویرایش ششم IP و دامنه آدرس‌دهی anycast استفاده شده است [۱۲]. مفهوم anycast در مقابل مفاهیم همه‌پخش<sup>۴</sup> و چندپخش<sup>۵</sup> ارائه شده و به معنی ارسال به یکی از اعضای گروه (معمولاً نزدیک‌ترین) می‌باشد. روش‌هایی مانند [۱۳] و [۱۴] که با استفاده از این دامنه آدرس‌دهی و مسیریابی داخلی به توزیع بار در شبکه پرداخته‌اند از سرعت واکنش بالاتری به نسبت سایر روش‌ها برخوردار می‌باشد و نتایج شبیه‌سازی آنها افزایش ۱۰ درصدی در بازدهی شبکه از لحاظ تعداد ارتباطات هم‌زمان را نشان می‌دهد.

در این معماری وضعیت کنونی شبکه مانیتور شده و بر این اساس، ترافیک ورودی کاربران در لایه مسیریابی به خوشه خلوت‌تر ارسال می‌شود. یکی از مشکلات موجود در این زمینه، حفظ نشست‌های برقرار شده فعلی با خوشه سرویس‌دهنده است. در صورتی که کاربران قدیمی یک خوشه به دلیل ازدحام به خوشه دیگری مسیریابی شوند، باید این ترافیک در خوشه جدید شناسایی و به خوشه اصلی بازگردانده شود. در [۱۳] تغییرات در لایه کاربرد برای حل این مشکل پیشنهاد شده و با قراردادن آدرس سرویس‌دهنده اصلی ترافیک در لایه کاربرد تشخیص داده می‌شود. در [۱۴] علاوه بر این روش، قراردادن آدرس سرویس‌دهنده اصلی در لایه شبکه و بخش Source Route Option پیشنهاد شده است. با وجود این که این روش‌ها برای حل مشکل پایداری امکان‌پذیر است ولی محدودیت‌های خاصی را نیز دارا می‌باشد. اول این که در لایه کاربرد احتمالاً در همه شرایط مدیر شبکه قادر به ایجاد تغییرات نیست و دوم این که به دلیل این که Source Route توسط گره‌های شبکه قابل تغییر می‌باشد، در این روش آسیب‌پذیری حمله مردی در میان (MIME)<sup>۶</sup> وجود دارد و امروزه به صورت پیش‌فرض در مسیریاب‌های اینترنتی اعمال نمی‌شود. نکته بعدی محدودیت استفاده از دامنه آدرس‌دهی anycast است که مدیران مرکز داده را مجبور به ثبت و استفاده از این دامنه آدرس‌ها می‌نماید.

همان طور که اشاره شد روش‌های توزیع بار ترافیک کاربران بین مراکز داده شامل سه روش متمرکز، مبتنی بر DNS و مسیریابی است که در ادامه بررسی شده است.

### ۲-۱ توزیع‌کننده متمرکز بار ترافیکی

بیشترین مقالات در زمینه توزیع بار مراکز داده مربوط به توزیع‌کننده‌های متمرکز می‌باشد. این توزیع‌کننده‌ها که بیشتر در شبکه‌های نرم‌افزارمحور مورد استفاده قرار می‌گیرند بر اساس مدل‌های واکنشی، به توزیع بار در مرکز داده می‌پردازند. در [۴] با استفاده از شبکه‌های نرم‌افزارمحور [۵] یک راه حل متمرکز ارائه شده که در آن با استفاده از یک کنترلر متمرکز NOX [۶] ترافیک بین سرورهای مختلف تقسیم می‌گردد. این معماری قابلیت پیاده‌سازی الگوریتم‌های واکنشی (خلوت‌ترین سرور<sup>۱</sup> و کمترین زمان پاسخ<sup>۲</sup>) را با استفاده از اطلاعاتی که از سرورهای شبکه دریافت می‌شود دارد. یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های توزیع بار متمرکز، الگوریتم Round Robin وزن‌دار است که در آن ترافیک تخصیصی به خوشه  $i$ ام که با  $C_i$  نشان داده می‌شود طبق (۱) محاسبه می‌گردد

$$C_i = \frac{L_{im} w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (1)$$

در این رابطه  $w_i$  وزن خوشه  $i$ ام و  $L_{im}$  کل ترافیک ورودی به مرکز داده می‌باشد.

یکی از مشکلات اصلی توزیع‌کننده‌های متمرکز ایجاد تک‌نقطه اشکال در شبکه است که برای حل این موضوع می‌بایست دستگاه به صورت افزونه دیده شود. علاوه بر این محل قرارگیری توزیع‌کننده مرکزی نیز مشکل دیگر این معماری محسوب می‌شود که مفهوم مرکز داده توزیع‌شده را زیر سؤال خواهد برد. سایر مقالاتی که در زمینه توزیع‌کننده‌های متمرکز می‌باشند (مانند [۷] و [۸]) نیز این مشکلات را دارند.

### ۲-۲ تقسیم بار ترافیکی با استفاده از DNS

دسته دوم مقالات توزیع بار ترافیک ورودی، روش‌های مبتنی بر سرویس‌دهنده DNS می‌باشند [۹] که از سرویس‌دهنده نام در شبکه برای تقسیم بار استفاده می‌نمایند به این صورت که تمام خوشه‌ها دارای اسم یکسان ولی آدرس مجزا و منحصر به فرد هستند. ترافیک کاربران در مرحله ترجمه اسم به آدرس، به آدرس‌های متفاوتی نگاشته می‌شوند که موجب توزیع بار می‌گردد. اکثر الگوریتم‌های مبتنی بر سرویس‌دهنده نام، به صورت واکنشی و با مانیتور نمودن وضعیت کنونی سرورها اقدام به توزیع بار می‌نمایند. مهم‌ترین مقالات در این زمینه، راه حل شرکت akami [۱۰] و همچنین راه حل شرکت گوگل برای مدیریت مراکز داده خود می‌باشد [۱۱]. شرکت akami بیش از ۱۲۰۰۰ سرور خود را که در نقاط مختلف جهان پراکنده می‌باشند از طریق توزیع بار مبتنی بر سرویس‌دهنده نام مدیریت می‌نماید.

اصول کار سرویس‌دهنده‌های نام در شبکه بر مبنای یک مدل سلسله‌مراتبی بوده که شامل زنجیره‌ای است که از ۱۳ سرور ریشه اینترنت<sup>۳</sup> شروع شده و به کاربر اینترنتی ختم می‌شود. در این فرایند هر

4. Broadcast  
5. Multicast  
6. Man in the Middle Attack

1. Least Connection  
2. Lowest Response Time  
3. Root Hints

جدول ۱: فرایند انتخاب بهترین مسیر در BGP [۱۵].

Seq.	Name	Preference
۱	Weight	High
۲	Local Preference	High
۳	Locally Generated	True
۴	AS-Path	Lower
۵	Origin	IGP > EGP > Unknown
۶	MED	Lower
۷	External	eBGP > iBGP
۸	IGP Cost	Lower

روش‌های مختلف در لایه کاربرد و شبکه برای حل این مشکل استفاده شده است اما هر یک از این روش‌ها بنا به دلایل محدودیت‌های لایه نرم‌افزار و موارد امنیتی دارای مشکلاتی هستند که پیاده‌سازی را با چالش مواجه می‌نماید. جهت حل این مشکل لازم است کاربرانی که هنگام بروز ازدحام به خوشه اشتباهی مسیریابی می‌شوند تشخیص داده شده و به خوشه درست هدایت شوند.

### ۳-۲ اصول طراحی معماری

در معماری پیشنهادی برای مرتفع نمودن این نیازمندی‌ها از یک معماری ترکیبی از شبکه‌های نرم‌افزارمحور و شبکه‌های سنتی استفاده شده است. برای حل مشکل مسیریابی از پروتکل مسیریابی خارجی BGP استفاده شده است. در این پروتکل برای هر شبکه یک هویت مستقل در نظر گرفته شده که AS<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. الگوریتم انتخاب بهترین مسیر در این پروتکل از ۱۲ مرحله تشکیل شده که ۸ مرحله اصلی آن در جدول ۱ آمده است. مسیرها به ترتیب مطرح شده در این جدول مقایسه شده و با پیداشدن اولین مسیر بهتر، جستجو خاتمه می‌یابد.

در معماری پیشنهادی از مرحله چهارم انتخاب بهترین مسیر استفاده شده است. به طور کلی AS-Path یک دنباله از شماره AS‌های عبوردهنده ترافیک می‌باشد که هر مسیریاب نام AS خود را به دنباله اضافه می‌نماید. در فرایند انتخاب بهترین مسیر، مسیری که کوتاه‌ترین AS-Path را دارد به عنوان مسیر بهتر انتخاب می‌شود. یکی از تکنیک‌های تغییر مسیریابی در BGP اعمال تغییر در تعداد AS‌های اضافه‌شده در دنباله توسط یک مسیریاب می‌باشد<sup>۳</sup>. در معماری پیشنهادی نیز کلیه خوشه‌های مرکز داده با یک آدرس و AS-Path‌ها مختلف به شبکه اعلام شده و با تغییر در AS-Path‌ها ترافیک به خوشه‌های مختلف باز مسیریابی می‌شود.

مشکل استفاده از دامنه آدرس‌های anycast نیز به این ترتیب حل خواهد شد که با توجه به این که در استاندارد BGP هر یک از آدرس‌های اعلام شده توسط مسیریاب‌های مرزی یک AS می‌توانند با AS-Path‌های متفاوت در شبکه جهانی اعلام شوند و مسیریاب‌های مختلف با توجه به کوتاه‌ترین دنباله AS‌ها مسیر بهینه را انتخاب خواهند نمود (این ویژگی به خاصیت Multi-homing معروف است و به منظور انتقال ترافیک بین شبکه‌های مختلف از مسیریاب‌های متفاوت از آن استفاده می‌شود). با معماری پیشنهادی که از چند دروازه مختلف و یک هویت AS تشکیل شده است مفهوم anycast بدون استفاده از دامنه آدرس‌های مورد نظر پیاده‌سازی شده است. نوآوری آخر کار حل مشکل پایدار نگه‌داشتن ارتباطات کاربران در هنگام باز مسیریابی اشتباه است. برای حل این مشکل در معماری پیشنهادی از یک بخش نرم‌افزارمحور استفاده شده است. در این بخش از شبکه سرورهای مربوط به هر خوشه مرکز داده به سوئیچ‌های پشتیبانی‌کننده ۱.۴ Open Flow متصل بوده و توسط یک کنترلر مرکزی [۱۶] و [۱۷] که همه سوئیچ‌های خوشه‌های مختلف به آن متصل می‌باشند مدیریت می‌شوند<sup>۴</sup>.

ذکر این نکته حایز اهمیت است که روش پیشنهادی، علاوه بر پوشش مشکلات روش‌های قبل، قادر به تغییر مسیر ترافیک حملات توزیع شده

مسأله مهم دیگر در خصوص روش‌های مبتنی بر مسیریابی، نوع الگوریتم مسیریابی مورد استفاده است. به طور کلی الگوریتم‌های مسیریابی داخلی دارای محدودیت‌هایی چون تعداد مسیریاب‌های موجود در شبکه، نیاز به دسترسی به کلیه مسیریاب‌های موجود در شبکه برای تغییر معیارهای مسیریابی و مسیریابی نقطه به نقطه می‌باشند که این امر با ماهیت کلان اینترنت در تناقض بوده و تنها قابل پیاده‌سازی در محیط‌های آزمایشگاهی و کوچک است. از این رو برای یک مرکز داده که دارای خوشه‌های مختلفی در سراسر جهان می‌باشد نیاز به استفاده از الگوریتم مسیریابی خارجی سطح کلان است که در کارهای پیشین به آن توجه نشده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این بخش، روش‌های موجود یا به صورت متمرکز عمل می‌کنند که با مفهوم مراکز داده توزیع شده در تناقض است یا از DNS استفاده می‌کنند که کنترل دقیق و سریع بر روی ترافیک ندارد و یا از تکنولوژی‌هایی مانند مسیریابی داخلی و دامنه آدرس خاص استفاده می‌کنند که به صورت عملی قابل پیاده‌سازی در سطح جهانی نیست. بنابراین راهکار عملی برای حل این موضوع به عنوان یک مسأله باز همچنان مطرح است.

### ۳-۳ معماری روش پیشنهادی

در این بخش به ارائه معماری روش پیشنهادی پرداخته خواهد شد که برای آن ابتدا نیازمندی‌های مد نظر بیان شده و اجزای معماری پوشش دهنده این موارد شرح داده می‌شود.

#### ۳-۱ نیازمندی‌های معماری توزیع بار ترافیک

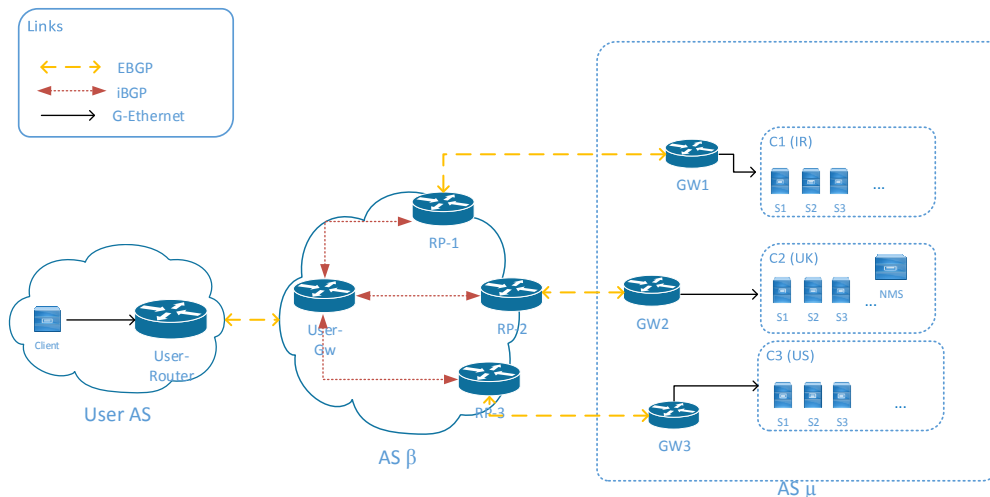
اولین مسأله، پروتکل مسیریابی است. این پروتکل می‌بایست بدون نیاز به دسترسی به همه مسیریاب‌های شبکه و تنها با تغییر معیارهای مسیریابی در دروازه مرکز داده، مسیر بسته‌های ورودی را تغییر دهد. به عبارت دیگر برای این منظور باید از پروتکل‌های مسیریابی خارجی (EGP)<sup>۱</sup> که ترافیک را در سطح کلان و شبکه به شبکه کنترل می‌کنند استفاده گردد. مسأله دوم، نحوه آدرس‌دهی خوشه‌های مراکز داده است. در کارهای پیشین [۱۳] و [۱۴] از دامنه آدرس‌های anycast و ویرایش ششم برای مسیریابی استفاده شده است در حالی که در اکثر شبکه‌ها همچنان از IPv۴ استفاده می‌شود. بنابراین لازم است تا از مفهوم anycast استفاده شود ولی پیاده‌سازی آن محدود به یک تکنولوژی خاص نباشد. سومین نیازمندی حل مشکل پایداری ارتباطات در هنگام تغییر مسیریابی از یک خوشه به خوشه دیگر می‌باشد. اگرچه در کارهای پیشین [۱۳] و [۱۴] از

2. Autonomous System

3. As-Path Prepending

۴. با توجه به ماهیت توزیع شده خوشه‌های مرکز داده در معماری پیشنهادی می‌توان از کنترلرهای توزیع شده [۱۸] تا [۲۰] استفاده نمود.

1. Exterior Routing Protocol

شکل ۱: بخش سنتی مرکز داده با  $\alpha$  خوشه.

بین سوئیچ‌های خوشه‌های مختلف یک ارتباط حلقه وجود دارد تا در زمان نیاز به اصلاح مسیریابی کاربران به خوشه اصلی، از این لینک‌ها استفاده شود. در هر خوشه از یک کنترلر SDN استفاده شده که وظیفه مدیریت سوئیچ‌های هر خوشه را بر عهده دارند. هنگام مسیریابی اشتباه یک کاربر قدیمی (به دلیل تغییر مسیریابی قبل از اتمام نشست آن) کنترلر با تشخیص این موضوع از طریق لینک‌های بین خوشه‌ها کاربر را به خوشه درست بازمسیریابی می‌نماید.

### ۳-۳-۳ بخش مدیریت ترافیک مرکز داده

در معماری پیشنهادی با توجه به ماهیت واکنشی الگوریتم توزیع بار، از یک سامانه مانیتورینگ  $NMS^3$  برای بررسی وضعیت شبکه استفاده شده است. این سامانه از طریق استانداردهای WMI و SNMP به جمع‌آوری اطلاعات مربوط به وضعیت کنونی سرورها می‌پردازد. از طرفی این سامانه در لایه کاربرد شبکه نرم‌افزارمحور [۵] با کنترلر شبکه در ارتباط بوده تا در صورت نیاز در کنترلر دستورات لازم را اعمال نماید. از طرفی برای مدیریت ترافیک ورودی کاربران در شبکه نیاز است تا سامانه با دروازه‌های شبکه در ارتباط باشد که این مهم از طریق استاندارد CLI<sup>4</sup> برقرار شده است. شکل ۲ طراحی داخلی هر خوشه را نمایش می‌دهد.

### ۳-۴ الگوریتم‌های معماری پیشنهادی

در معماری پیشنهادی برای توزیع بار از چهار الگوریتم استفاده می‌شود که دو مورد از آنها با ورود هر بسته و دو مورد دیگر به صورت دوره‌ای انجام می‌شوند.

#### ۳-۴-۱ الگوریتم توزیع بار بین خوشه‌ای

این الگوریتم در سطح کلان و بین خوشه‌های مرکز داده ترافیک را توزیع می‌نماید و با ورود هر بسته و در سامانه مانیتورینگ اجرا و نتیجه آن از طریق کنترلر و دروازه‌های شبکه به ترتیب در بخش‌های نرم‌افزارمحور و سنتی شبکه اعمال می‌شود. شبه‌کد این الگوریتم در شکل ۳ آمده است. این الگوریتم به شرح زیر ترافیک ورودی به مرکز داده را از طریق افزایش دنباله AS-Path که توسط دروازه‌های خوشه اعلام خواهد شد مدیریت می‌نماید. اگر این بسته، شروع یک نشست جدید باشد (خط ۲)، تعداد نشست‌های فعال (Usr) با سه حد آستانه بررسی می‌شود. در

جدول ۲: نمادهای مورد استفاده در معماری پیشنهادی.

ردیف	پارامتر	نماد
۱	تعداد خوشه‌ها	$\alpha$
۲	AS اینترنت	$\beta$
۳	AS مرکز داده	$\mu$
۴	تعداد سرورهای خوشه	$S$
۵	حد ازدحام	$C_{exc}$
۶	حد بحران	$C_{max}$
۷	حد خلوتی خوشه	$C_{min}$
۸	ظرفیت خوشه	$C$

عدم سرویس  $DDOS^1$  از یک خوشه شلوغ به سایر خوشه‌های خلوت می‌باشد که این امر به نوبه خود باعث آرام‌سازی حملات (با توجه به هدف حمله‌کنندگان در این روش) و انتقال ترافیک حمله از یک خوشه به کلیه خوشه‌ها می‌شود.

### ۳-۳ جزئیات طراحی معماری پیشنهادی

همان گونه که ذکر شد معماری پیشنهادی، یک معماری ترکیبی از شبکه‌های سنتی و نرم‌افزارمحور است. برای توصیف معماری و جزئیات الگوریتم از نمادهای جدول ۲ استفاده می‌شود.

#### ۳-۳-۱ بخش سنتی مرکز داده

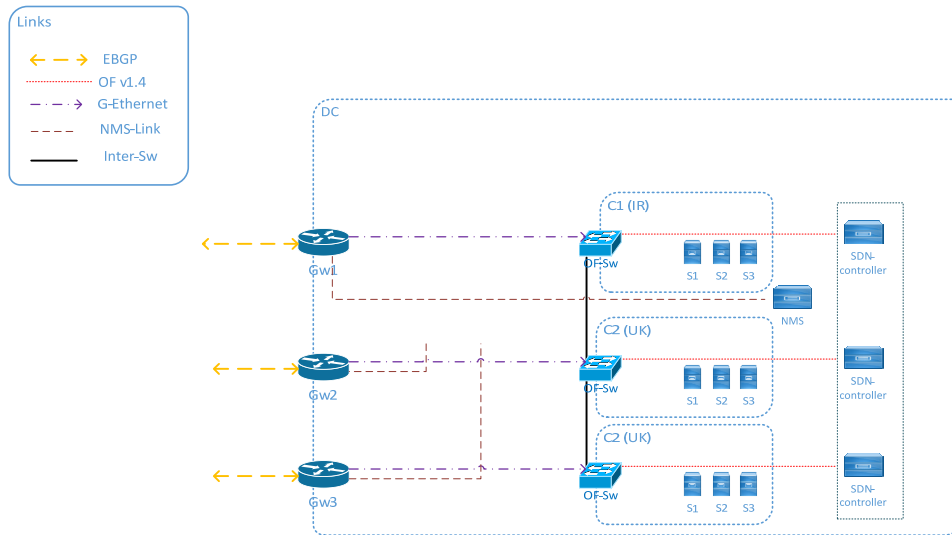
بخش سنتی مرکز داده از تعدادی دروازه اینترنتی تشکیل شده که تحت هویت  $\mu$  با شبکه جهانی که AS آن  $\beta$  نامیده می‌شود، در هر خوشه همسایگی BGP دارند. مطابق شکل ۱، دروازه‌های هر خوشه با ارسال دنباله AS-Path به همسایه‌های خارجی خود ترافیک ورودی به خوشه را کنترل می‌نمایند. در بخش سنتی مرکز داده نیز ارتباط میان سوئیچ‌های بخش نرم‌افزارمحور با دروازه‌ها از طریق لینک‌های با پهنای باند بالا انجام می‌شود.

#### ۳-۳-۲ بخش نرم‌افزارمحور مرکز داده

در بخش نرم‌افزار محور معماری پیشنهادی، در هر خوشه از یک سوئیچ پشتیبانی‌کننده  $OF v 1.4$  استفاده شده که سرورهای خوشه به این سوئیچ متصل می‌باشند.

3. Network Monitoring Server  
4. Command Interface Line

1. Distributed Denial of Service  
2. Mitigation



شکل ۲: طراحی داخلی هر خوشه و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر.

1. for each input packet
2. if packet = SYN
3. LeastConnection(S)
4. set wildCard to flow table
5. else if packet isn't for Current Cluster
6. set MicroFlow to Correct OF switch
7. else route to host

شکل ۴: الگوریتم توزیع بار درون خوشه‌ای.

1. when Timer expires
2. if not  $C(\text{all Cluster}) < 3 \times C_{\min}$
3. for each Cluster
4. if  $C(\text{Cluster}) < C_{\min}$
5. AS --

شکل ۵: الگوریتم تنظیم دوره‌ای AS-Path.

همه خوشه‌ها اجرا شده و با توجه به تعداد فعلی کاربران خوشه نسبت به تغییر دنباله AS-Path آن خوشه اقدام می‌نماید. لازم به ذکر است در صورتی که کل کاربران مرکز داده از یک حد آستانه (خط ۲) کمتر باشد، نیازی به تغییر AS-Path نیست چرا که این حالت به معنی کمبود بار کل مرکز داده است (شکل ۵).

### ۳-۴-۴ الگوریتم کنترل دنباله AS-Path

مسیریاب‌های اینترنتی برای جلوگیری از دستکاری<sup>۲</sup> دنباله‌های AS-Path، دنباله‌هایی که بیش از ۲۵ عضو در آنها قرار داشته باشد را به عنوان حمله در نظر گرفته و آنها را قبول نمی‌کنند. برای جلوگیری از رد شدن دنباله‌های ساخته شده، به صورت دوره‌ای دنباله‌ها بررسی شده و در صورت افزایش اعضای دنباله به بیش از ۲۰ عضو، از کل دنباله خوشه‌ها ۲ واحد کم می‌نماید. فرایند کم شدن بر روی کلیه دنباله‌ها اعمال می‌شود تا اولویت ترافیک ورودی به مرکز داده در خوشه‌ها حفظ شود (شکل ۶).

با توجه به الگوریتم‌های شرح داده شده، معماری پیشنهادی در دو سطح (الف) توزیع بار در بین خوشه‌ها و (ب) توزیع بار در هر خوشه بین سرورها به شکل واکنشی می‌پردازد. این الگوریتم با استفاده از ویژگی‌های مسیریابی در استاندارد BGP بدون نیاز به استفاده از دامنه آدرس‌های anycast مفهوم anycast را پیاده‌سازی نموده است. با توجه به این که مسیریاب‌های اینترنتی بین دو مسیر یکسان، مسیر با کوتاه‌ترین

1. for each input packet
2. if packet = SYN
3.  $Usr ++$
4. if  $Usr > C$  then Reject Packet and  $Usr --$
5. if  $Usr > C_{\max}$  then  $AS += 2$
6. if  $Usr < C_{\max}$  and  $Usr > C_{exc}$  then  $AS ++$
7. Intra-Cluster Load Balancer()
8. else if packet is for Current Cluster
9. route to S(Packet)
10. else route to Correct Cluster

شکل ۳: الگوریتم توزیع بار بین خوشه‌ای.

صورتی که تعداد کاربران (نشست‌های فعال) خوشه از ظرفیت خوشه (C) بیشتر باشد این درخواست رد می‌شود (خط ۴). اگر تعداد کاربران بیش از حد بحرانی ( $C_{\max}$ ) باشد به دنباله AS-Path دو بار (خط ۵) و در صورتی که خوشه در حالت ازدحام باشد (خط ۶) به دنباله AS-Path فقط یک بار AS این مرکز داده ( $\mu$ ) اضافه می‌شود. با پذیرفته شدن این درخواست الگوریتم توزیع بار درون خوشه‌ای فراخوانی می‌شود تا درخواست به سرور مناسب ارسال گردد.

### ۳-۴-۳ الگوریتم توزیع بار درون خوشه‌ای

این الگوریتم در هر خوشه و به منظور توزیع بار بین سرورهای خوشه با ورود هر بسته اجرا می‌شود. اگر این بسته شروع نشست جدید باشد به خلوت‌ترین سرورس دهنده ارسال می‌شود (خط ۳ و ۴ در شکل ۴). اگر این بسته درخواست جدید نبوده و به اشتباه به این ارسال شده باشد با تنظیم قواعد جدید مسیریابی در سوئیچ، به خوشه صحیح بازمسیریابی می‌شود (خط ۶).

### ۳-۴-۳ الگوریتم تشخیص خلوت شدن خوشه

پس از تشخیص ازدحام در خوشه به دلیل افزایش AS-Path توسط الگوریتم توزیع بار بین خوشه‌ای ممکن است برای مدت زمانی هیچ ترافیکی به خوشه وارد نشده و درخواست‌های فعلی نیز به اتمام برسند. این وضعیت، حالت خلوت<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. دلیل آن این است که به دلیل افزایش بیش از حد دنباله AS-Path هیچ یک از مسیریاب‌های شبکه جهانی ترافیک را به خوشه مورد نظر ارسال نمی‌نمایند. برای حل این مشکل، الگوریتم تشخیص خلوت شدن خوشه به صورت دوره‌ای برای

روش‌ها ارزش افزوده‌ای ندارد. در این روش‌ها با فرض‌های غیر واقعی که امکان پیاده‌سازی عملی ندارد (مانند استفاده از مسیریابی داخلی در سطح internet یا استفاده از source routing) معیارهای کارایی (مانند نرخ پذیرش) بهبود قابل توجهی خواهد داشت ولی در عمل نمی‌توان از آنها استفاده کرد.

طبق این روش شبیه‌سازی، کاربران طبق مدل آماری مورد اشاره به مرکز داده مراجعه نموده و در صورت بروز ازدحام توسط یکی از روش‌های مورد بررسی کاربران به خوشه‌های دیگر باز مسیریابی می‌شوند (برای ارزیابی دقیق‌تر تعداد کاربران متغیر در نظر گرفته شده است). تعداد کاربران از ۳۰۰۰۰ هزار کاربر تا ۱۲۰۰۰۰ کاربر مراجعه‌کننده به مرکز داده قرار داده شده است. هر کاربر به طور متوسط زمانی را در مرکز داده سرویس گرفته و پس از آن از مرکز داده خارج می‌شود. دو سناریوی کاربران تک‌درخواستی و چنددرخواستی مورد آزمایش قرار گرفته است.

در سناریوی اول کاربران حجم ترافیک پائینی دارند، آنها با ورود به مرکز داده یک درخواست ارسال نموده و بین ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ ثانیه در مرکز داده فعالیت نموده و پس از آن از مرکز داده قطع می‌شوند (طول عمر این درخواست‌ها یک مقدار تصادفی بین ۶۰۰ الی ۱۲۰۰ ثانیه است). تعداد کاربرانی که در این تست شرکت داده می‌شوند ۳۰۰۰۰ کاربر بوده و برای مقایسه با روش مبتنی بر DNS تعداد گام DNS برای توزیع بار ۱۰۰ کاربر در نظر گرفته شده است. کل مرکز داده دارای ۳ خوشه و حد رد کردن درخواست ۲۱۲ در نظر گرفته شده است. شکل ۷ تعداد کاربران هر خوشه در روش پیشنهادی و روش مبتنی بر DNS را نمایش می‌دهد. همان گونه که در این نمودار مشخص است تعداد کاربران در روش مبتنی بر DNS به دلیل سرعت واکنش پایین این روش دائماً در حال کم و زیاد شدن است در حالی که روش پیشنهادی با واکنش مناسب و سریع به صورت متوسط تعداد کاربران یکسانی را می‌پذیرد که این مسأله در شکل‌های بعدی با جزئیات بیشتری شرح داده شده است.

میزان بهبود در تعداد کاربران هم‌زمان (نسبت تعداد متوسط کاربران مرکز داده در روش پیشنهادی نسبت به روش DNS) و همچنین بهبود در تعداد درخواست‌های رد شده (نسبت تعداد درخواست‌های رد شده توسط روش DNS نسبت به روش پیشنهادی) در شکل ۸ آمده است. با توجه به نمودارهای شکل ۸ حداکثر میزان بهبود در تعداد کاربران هم‌زمان ۱۳/۵ درصد و تعداد درخواست‌های رد شده ۱۴ درصد نسبت به حالت مبتنی بر DNS می‌باشد.

در کنار تعداد کاربران، پارامتر دیگری که بر روی بار مرکز داده تأثیرگذار است TTL درخواست‌ها می‌باشد. شکل ۹ نمایش‌دهنده میزان بهبود کارایی با افزایش TTL کاربران است. در این آزمایش، بیشترین میزان بهبود برای TTL برابر ۶۵۰۰ ثانیه است. برای TTL‌های بسیار کمتر از این مقدار حجم بار ترافیکی مرکز داده چندان زیاد نیست و بنابراین روش DNS هم کارایی نسبتاً قابل قبولی دارد، فلذا میزان بهبود کم است. برای TTL‌های بسیار بزرگ‌تر از این مقدار نیز مرکز داده کاملاً در حالت اضافه بار است و منابع کافی برای توزیع بار وجود ندارد، فلذا کارایی الگوریتم پیشنهادی خیلی بهتر از روش DNS نیست.

در سناریوی دوم به ازای هر کاربر تعداد بیشتر از یک درخواست به خوشه ارسال می‌شود (سناریوی کاربران با بار متغیر). در این سناریو، کاربران به صورت متغیر و با بار ۲، ۳ و ۸ درخواست به خوشه مرکز داده وارد می‌شوند. نتایج مقایسه روش پیشنهادی با روش مبتنی بر DNS (با گام ۵۰) در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آمده است.

با توجه به شکل ۱۰ بیشترین میزان بهبود در تعداد کاربران هم‌زمان

1. when Timer expires
2. for each Cluster
3. if AS-Path Cluster > 20
4. all Cluster AS = 2

شکل ۶: الگوریتم بررسی سرحد AS-Path.

AS-Path را انتخاب می‌نمایند، خوشه‌های مرکز داده در هنگام بروز ازدحام در شبکه با اضافه‌نمودن به دنباله AS-Path خوشه مسیریابی ترافیک را از آن خوشه دور می‌نمایند.

در خصوص استفاده از آدرس‌های یکسان برای همه خوشه‌های مرکز داده نیز با توجه به این که کنترلر نرم‌افزارمحور شبکه با استفاده از مشخصات سوکت ارتباط شامل آدرس کاربر، آدرس مقصد، شماره پورت مبدأ و شماره پورت مقصد ترافیک کاربران مختلف را به سرور اصلی هدایت می‌نماید، تداخلی در آدرس‌های داخل مرکز داده به وجود نمی‌آید (در داخل مرکز داده تصادم آدرس<sup>۱</sup> به وجود نخواهد آمد).

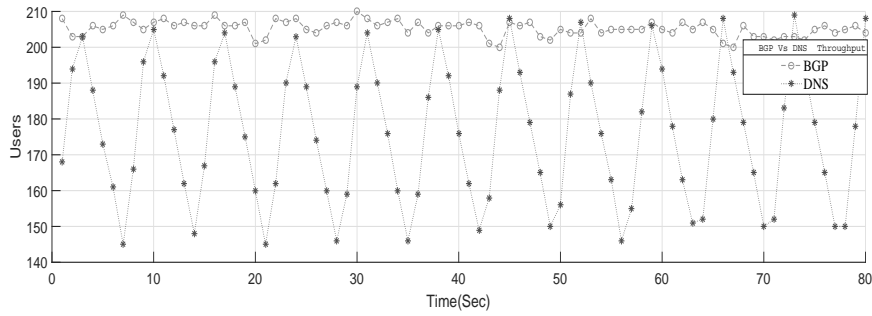
استفاده از معماری ترکیبی نرم‌افزارمحور و سنتی در کنار استفاده از امکانات BGP مدیران مرکز داده را قادر خواهد ساخت تا با کمترین تغییر در ساختار مرکز داده بیشترین بازدهی را در تعداد کاربران هم‌زمان متصل شده به خوشه‌ها داشته باشند.

#### ۴- شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی

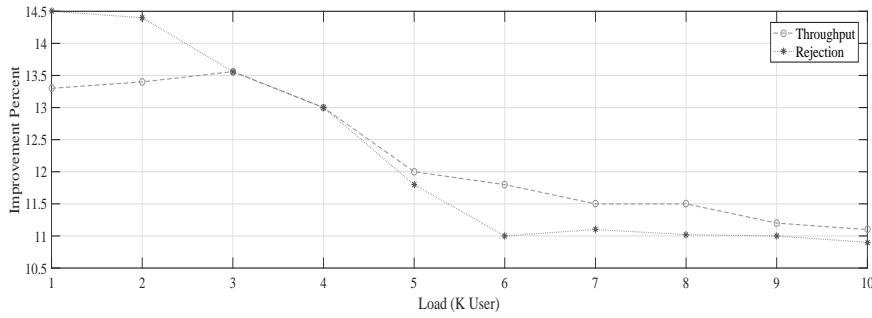
در این بخش به ارزیابی کارایی روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. برای پیاده‌سازی معماری پیشنهادی، در بخش سنتی از شبیه‌ساز شبکه GNS۳ استفاده شد که در آن، دروازه‌های هر خوشه با دریافت دستور از سامانه مدیریت شبکه، دنباله AS-Path مد نظر را با BGP به همسایگان خود اعلام می‌کنند و کاربران در شبکه اینترنت به طور اتوماتیک به خوشه مسیریابی می‌شوند. برای ایجاد تغییر در دنباله AS-Path هر خوشه از روش Route-map استفاده شده است. با توجه به این که بسته‌های ورودی به شبکه نرم‌افزارمحور به صورت اتوماتیک به کنترلر ارسال می‌شوند و در صورت ورود بسته‌ها به دلیل تغییر AS-Path به خوشه نادرست، کنترلر با ایجاد روال موقتی<sup>۲</sup> بسته‌ها را به خوشه درست باز مسیریابی می‌نماید، در شبیه‌سازی‌های انجام شده یک فرایند بارگیری با تغییر خوشه ورودی ثابت مشاهده شد. در شبیه‌سازی دروازه‌های شبکه از مسیریاب‌های Cisco سری ۷۲۰۰ استفاده شده و مسیریابی خارجی BGP بر روی آن‌ها پیاده‌سازی شده است. به پیاده‌سازی در محیط شبیه‌سازی رابطه میان ظرفیت خوشه و حد ازدحام و بحران در بهترین حالت به شرح  $C_{exc} = 0.85C$  و  $C_{max} = 0.95C$  است.

برای شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی روش پیشنهادی از مدل داده‌های آماری موجود در خصوص کاربران اینترنت استفاده شده است. سامانه مانیتورینگ که الگوریتم‌های بخش ۳-۴ را پیاده‌سازی می‌نماید با استفاده از تکنولوژی NET. پیاده‌سازی شده است. شاخص‌هایی که برای مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها انتخاب شده است شامل تعداد کاربران هم‌زمان متصل شده به خوشه‌های مرکز داده و نیز تعداد درخواست‌های رد شده توسط مرکز داده می‌باشد. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، این روش با روش مبتنی بر DNS مقایسه شده که برای توزیع بار ترافیک از روش Round Robin استفاده می‌نماید. لازم به ذکر است علی‌رغم تشابه روش پیشنهادی به روش‌های مبتنی بر مسیریابی، مقایسه با این

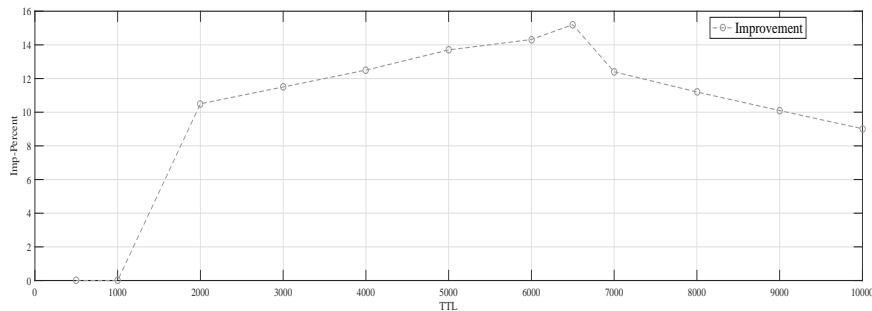
1. IP Conflict
2. Micro Flow



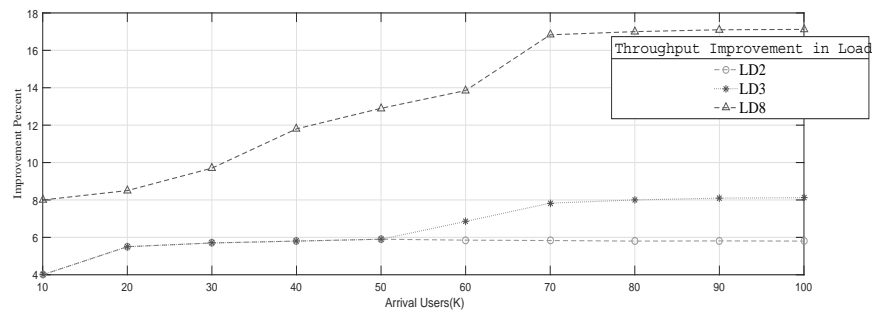
شکل ۷: تعداد کاربران هر خوشه در روش پیشنهادی (BGP) و روش DNS.



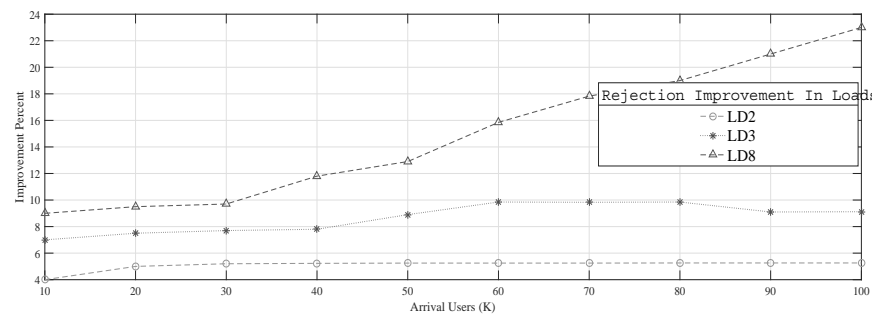
شکل ۸: میزان بهبود در بسته‌های رنده و بازدهی مرکز داده.



شکل ۹: مقایسه بهبود کارایی با افزایش TTL کاربران.



شکل ۱۰: میزان بهبود در تعداد کاربران هم‌زمان در بارهای ۲، ۳ و ۸.



شکل ۱۱: میزان بهبود در تعداد درخواست‌های رنده در بارهای ۲، ۳ و ۸.

- and Intelligence Systems, pp. 662-667, Shenzhen, China, 27-29 Nov. 2014.
- [9] F. Semchedine, L. Bouallouche-Medjkoune, O. Sayeh, S. Ayoub, and D. Aïssani, "DNS-based load balancing with cache for geographically distributed web server systems," in *Proc. Global Summit on Computer & Information Technology, GSCIT'14*, 6 pp., Sousse, Tunisia, 14-16 Jun. 2014.
- [10] J. Dilley, B. Maggs, J. Parikh, H. Prokop, R. Sitaraman, and B. Wehl, "Globally distributed content delivery," *IEEE Internet Computing*, vol. 6, no. 5, pp. 50-58, Sep./Oct. 2002.
- [11] S. Jain, et al., "B4: experience with a globally-deployed software defined WAN," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 43, no. 4, pp. 3-14, Oct. 2013.
- [12] Network Working Group, *The Common Gateway Interface (CGI) Version 1.1*, <https://tools.ietf.org/html/rfc2526> (Accessed on 11 May 2017).
- [13] H. Hashim and A. Manan, "Active anycast method for server load balancing," in *Proc. Student Conf. on Research and Development*, pp. 105-108, Shah Alam, Malaysia, Malaysia 17-17 Jul. 2002.
- [14] R. L. Pereira and T. Vazao, "Network layer implemented anycast load balancing," in *Proc. IEEE Symp. on Computers and Communications*, pp. 387-393, Las Vegas, NV, USA, 1-4 Jul. 2007.
- [15] Network Working Group, *A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*, <https://tools.ietf.org/html/rfc4271> (Accessed on 11 May 2017).
- [16] N. Gude, T. Koponen, J. Pettit, B. Pfaff, M. Casado, N. McKeown, and S. Shenker, "NOX: towards an operating system for networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 3, pp. 105-110, Jul. 2008.
- [17] S. Kaur, S. Japinder, and S. Navtej, "Network programmability using POX controller," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communication, Computing & Systems, ICCCS'14*, 2014.
- [18] A. A. Dixit, F. Hao, S. Mukherjee, T. V. Lakshman, and R. Kompella, "Elasticon: an elastic distributed sdn controller," in *Proc. ACM/IEEE Symp. on Architectures for Networking and Communications Systems*, pp. 17-20, Marina del Rey, CA, USA, 20-21 Oct. 2014.
- [19] A. Krishnamurthy, S. P. Chandrabose, and A. Gember-Jacobson, "Pratyastha: an efficient elastic distributed SDN control plane," *ACM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*, pp. 133-138, Chicago, Illinois, USA, 22-22 Aug. 2014.
- [20] V. Yazici, M. O. Sunay, and A. O. Ercan, "Controlling a software defined network via distributed controllers," in *Proc. NEM Summit, Implementing Future Media Internet towards New Horizons*, 6 pp., 2012.

**امیر اسمعیلی** در سال ۱۳۸۷ کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه شاهد تهران و در سال ۱۳۹۵ کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت کرده است. نام برده هم‌اکنون به عنوان رئیس اداره پشتیبانی زیرساخت فضا در سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی مشغول به کار می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارت از مهندسی ترافیک، شبکه‌های نرم‌افزارمحور و امنیت شبکه‌های کامپیوتری است.

**بهادر بخشی سراسکانرود** در سال ۱۳۸۹ مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی کامپیوتر از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود و از سال ۱۳۹۱ تا کنون به عنوان عضو هیأت‌علمی دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شبکه‌های نرم‌افزارمحور و مجازی‌سازی کارکردهای شبکه است.

خوشه در بار ۸ و به اندازه ۱۷ درصد می‌باشد، همچنین بیشترین میزان بهبود در تعداد درخواست‌های رد شده نیز مربوط به بار ۸ و ۲۳ درصد می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در حجم ترافیک بالا که توزیع بار اهمیت و ارزش بیشتری دارد، کارایی بالاتری نسبت به روش‌های موجود دارد.

روش پیشنهادی با توجه به این که دارای قابلیت پیاده‌سازی در شبکه جهانی است و از مسیریابی BGP پشتیبانی می‌نماید دارای مقیاس‌پذیری بیشتری نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر مسیریابی می‌باشد. استفاده از این استاندارد باعث افزایش حجم جداول مسیریابی تا چند برابر روش‌های مبتنی بر مسیریابی داخلی و یا مسیریابی دستی می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک معماری جدید برای توزیع بار ترافیکی در مراکز داده توزیع‌شده جغرافیایی ارائه شد که در مقایسه با سایر روش‌های موجود دارای انعطاف‌پذیری و میزان کارایی بیشتری نسبت به روش مبتنی بر Round Robin است. این روش برای مدیریت ترافیک ورودی به مرکز داده، مفهوم anycast را با استفاده از پروتکل BGP و از طریق تنظیم مناسب دنباله AP-Path پیاده‌سازی کرده است. از ایده این روش می‌توان برای تشخیص سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر حملات توزیع‌شده DOS به خوشه‌های مراکز داده استفاده نمود.

## مراجع

- [1] H. Goudarzi and M. Pedram, "Force-directed geographical load balancing and scheduling for batch jobs in distributed datacenters," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Cluster Computing, CLUSTER'13*, 8 pp., Indianapolis, IN, USA, 23-27 Sept. 2013.
- [2] -, "About Data Centers," [www.tia942.org/content/162/289/About\\_Data\\_Centers](http://www.tia942.org/content/162/289/About_Data_Centers) (Accessed on 11 May 2017).
- [3] H. Goudarzi, S. Hatami, and M. Pedram, "Demand-side load scheduling incentivized by dynamic energy prices," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, SmartGridComm'11*, pp. 351-356, Brussels, Belgium, 17-20 Oct. 2011.
- [4] H. Uppal and D. Brandon, *OpenFlow Based Load Balancing*, Networking Project Report, University of Washington, 2010.
- [5] D. Kreutz, et al., "Software-defined networking: a comprehensive survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, Jan. 2015.
- [6] N. Gude, et al., "NOX: towards an operating system for networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 3, pp. 105-110, Jul. 2008.
- [7] A. Serra, D. Gaiti, G. Barroso, and J. Boudy, "Assuring QoS differentiation and load balancing on web servers clusters," in *Proc. IEEE Conf. on Control Applications, CCA'05*, pp. 885-890, Toronto, Canada, 28-31 Aug. 2005.
- [8] H. Zhang and X. Guo, "SDN-based load balancing strategy for server cluster," in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. on Cloud Computing*