



## بهینه‌سازی مصرف توان در گره مجازی‌سازی تابع شبکه

الهه احسان پور، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات، دانشگاه شهرکرد

[elaheh.ehsanpour@gmail.com](mailto:elaheh.ehsanpour@gmail.com)

علی قیاسیان، دکترای مهندسی برق، عضو هیئت‌علمی دانشگاه شهرکرد

[ghiasian.ali@eng.sku.ac.ir](mailto:ghiasian.ali@eng.sku.ac.ir)

### چکیده

مجازی‌سازی تابع شبکه از دیدگاه صنعت و دانشگاه به‌عنوان یک تغییر مهم در تأمین خدمات مخابراتی مورد توجه قرار گرفته است. با جدا کردن توابع شبکه از دستگاه‌های فیزیکی که بر روی آن‌ها اجرا می‌شوند، مجازی‌سازی تابع شبکه پتانسیل این را دارد که هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و باعث افزایش سرعت و کاهش زمان سرویس‌دهی شود. الگوی مجازی‌سازی تابع شبکه هنوز در مراحل ابتدایی خود است و طیف وسیعی از فرصت‌ها را برای جامعه تحقیقاتی به‌منظور توسعه معماری، سیستم‌ها و برنامه‌های جدید فراهم می‌کند. در این زمینه، نوبت‌گردشی توان کارآمد یک استراتژی به اشتراک‌گذاری پردازنده است و با هدف بهینه‌سازی مصرف توان در گره مجازی‌سازی تابع شبکه به کار می‌رود. استفاده از این استراتژی باعث کاهش نرخ پردازنده و مصرف توان در گره مجازی‌سازی تابع شبکه می‌شود. در این مقاله، گره مجازی‌سازی تابع شبکه را مورد تحلیل قرار می‌دهیم و استراتژی نوبت‌گردشی توان کارآمد را معرفی می‌کنیم. اجرای ایده بهینه‌سازی مصرف توان بر روی گره مجازی‌سازی تابع شبکه را بررسی و از یک مدل برای محاسبه مصرف توان استفاده می‌کنیم. استراتژی پیشنهادی را با استراتژی نوبت‌گردشی شبکه-آگاه مقایسه و نتایج را ارائه می‌نماییم. نتایج حاصل از تحلیل و شبیه‌سازی نشان می‌دهند که استراتژی پیشنهادی نوبت‌گردشی توان کارآمد در مقایسه با استراتژی دیگر، مصرف توان کمتری دارد.

**کلیدواژه‌ها:** استراتژی نوبت‌گردشی توان کارآمد، استراتژی نوبت‌گردشی شبکه-آگاه، بهینه‌سازی مصرف توان، تقسیم‌بندی نرخ پردازنده، مجازی‌سازی تابع شبکه

### 1- مقدمه

در گذشته سرویس‌دهی صنعت مخابرات در اپراتورهای شبکه انجام می‌شد که دستگاه‌های فیزیکی و تجهیزات سرویس‌دهی را از هم جدا می‌کرد. معمولاً اجزای سرویس‌دهی، زنجیره پیوسته‌ای دارند که



در توپولوژی شبکه و محل قرارگیری عناصر سرویس دهی، تأثیرگذار است. در این زنجیره برای ارائه سرویس با کیفیت بالا و پایدار و مطابق با پروتکل های تعریف شده، مشکلاتی از قبیل مدت زمان طولانی و سرعت پایین سرویس دهی و وابستگی بسیار به سخت افزارهای تخصصی و ... وجود دارد. در همین زمان، تجهیزات مورد نیاز مشتریان برای دریافت خدمات جدید و متنوع در حال افزایش است. بنابراین ارائه دهندگان سرویس های مخابراتی<sup>1</sup> باید تجهیزات فیزیکی جدید را به طور مداوم خرید، ذخیره سازی و راه اندازی کنند. این مسئله نیاز به تکنسین های ماهر و قرارگیری تجهیزات شبکه به صورت متراکم دارد. موارد ذکر شده منجر به هزینه های سرمایه ای و عملیاتی بالا برای ارائه دهندگان سرویس های مخابراتی می شود. در این صورت سرویس دهنده های مخابراتی باید راهی پیدا کنند تا شبکه هایی پویاتر و سریع تر بسازند و هزینه ها را کاهش و سرویس دهی را بهبود دهند (Wu, and etc, 2015, 35-41).

مجازی سازی تابع شبکه<sup>2</sup> یک راه حل برای این چالش است که می تواند با استفاده از فناوری مجازی سازی، یک روش جدید برای طراحی، توسعه و مدیریت خدمات شبکه معرفی کند. مجازی سازی تابع شبکه یک تغییر در ساختار هسته ای است که در زیرساخت های مخابراتی قرار دارد. ایده اصلی آن جدا کردن تجهیزات فیزیکی شبکه از توابعی است که بر روی آن ها اجرا می شوند. همچنین باعث می شود بسیاری از تجهیزات شبکه که بر روی سرورهایی با حجم بالا، سوئیچ ها و قسمت های ذخیره سازی قرار دارند، بتوانند در مراکز داده قرار گیرند و به مشتریان سرویس ارائه دهند. به این ترتیب یک سرویس مشخص را می توان به مجموعه ای از توابع شبکه مجازی<sup>3</sup> تجزیه کرد که می توانند نرم افزارهای مختلف را در یک یا چند سرور استاندارد صنعتی اجرا کنند. همچنین این توابع قابلیت جابه جایی در مکان های مختلف شبکه را دارند، بدون اینکه نیازی به خرید، نصب و راه اندازی سخت افزار جدیدی داشته باشند (Han, and etc, 2015, 90-97).

جهت روشن شدن موضوع، به عنوان مثال، یک نمونه از کاربردهای مجازی سازی تابع شبکه را نشان می دهیم. شکل 1، تجهیزات مورد نیاز مشتریان<sup>4</sup> را نشان می دهد که از توابع مختلفی ساخته شده است. توابع عبارتند از: پروتکل پیکربندی پویای میزبان<sup>5</sup>، ترجمه نشانی شبکه<sup>6</sup>، مسیریابی، اتصال و اجرای جهانی<sup>7</sup>، دیوار آتش، مودم، رادیو و سوئیچینگ. در این مثال، تجهیزات مورد نیاز مشتریان را می توان یک سرویس در نظر گرفت که از هشت تابع شبکه ساخته شده است. این توابع ممکن است بر یکدیگر اولویت داشته باشند یا اجرای آن ها از یک ترتیب خاص تبعیت کند. همچنین لازم است که این توابع در یک دستگاه فیزیکی در جایگاه مشتریان 1 و 2 قرار گیرند. با چنین پیاده سازی، اگر نیاز به تغییر در این تجهیزات وجود داشته باشد، مثلاً اضافه، حذف و یا به روز رسانی کردن یک تابع، ممکن است

<sup>1</sup> Telecommunications Service Provider

<sup>2</sup> Network Functions Virtualization

<sup>3</sup> Virtual Network Function

<sup>4</sup> Customer Premises Equipment

<sup>5</sup> Dynamic Host Configuration Protocol

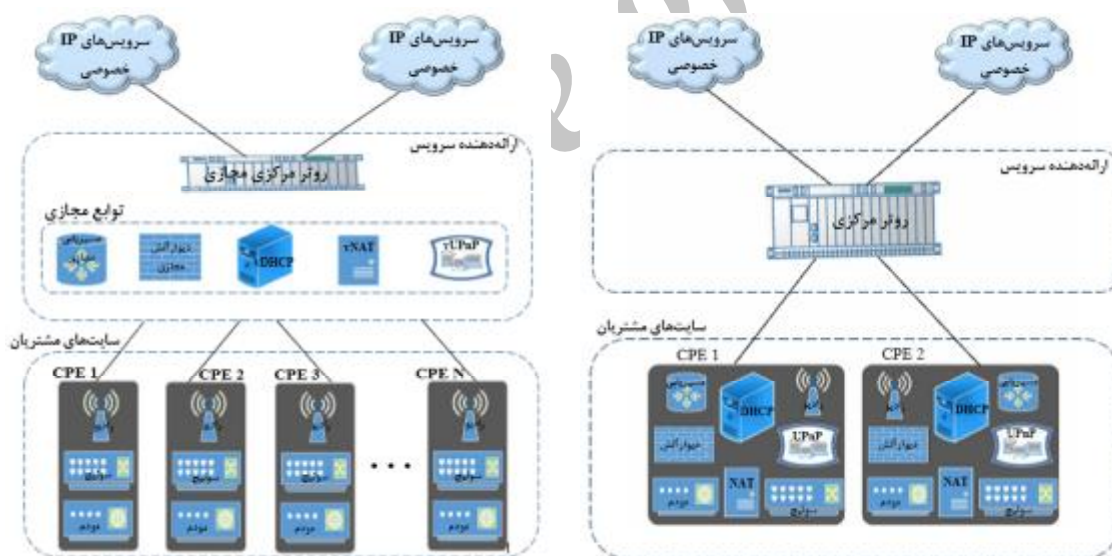
<sup>6</sup> Network Address Translation

<sup>7</sup> Universal Plug and Play



تکنسین مجبور باشد که از شرکت خدمات اینترنتی<sup>8</sup> به صورت جداگانه با هر یک از مشتریان صحبت کند و یا اطلاعات را منتقل کند. حتی ممکن است در صورتی که تابع اضافه شود، نیاز به یک تغییر کامل در دستگاه باشد. این کار نه تنها برای شرکت های اینترنتی گران قیمت است، بلکه برای مشتریان نیز هزینه زیادی دارد. شکل 2، یک روش اجرای تجهیزات مورد نیاز مشتریان بر اساس مجازی سازی تابع شبکه را نشان می دهد که در آن برخی از توابع مشتریان به یک زیرساخت مشترک در شرکت اینترنتی که می تواند یک مرکز داده نیز باشد، منتقل می شوند. این کار باعث می شود که تغییرات ذکر شده در بالا آسان تر اتفاق بیفتند. برای مثال، به روزرسانی پروتکل پیکربندی برای همه مشتریان فقط شامل تغییرات در شرکت اینترنتی باشد. در همین روش، اضافه کردن یک تابع دیگر مانند کنترل همه جانبه و یکسان برای همه و یا زیرمجموعه ای از مشتریان را می توان در یک بار انجام داد. علاوه بر صرفه جویی در هزینه های عملیاتی برای شرکت اینترنتی، منجر به تجهیزات ارزان تر در مقیاس های بزرگ می شود (ETSI Ind. Spec. Group (ISG), 2013, 15-32).

ارائه دهندگان سرویس های مخابراتی تضمین می کنند که با استفاده از مجازی سازی تابع شبکه، انعطاف پذیری و قابلیت های شبکه افزایش و سرویس دهی به مشتریان بهبود می یابد. همچنین می توان خدمات شبکه های جدید، سریع و ارزان را توسعه بخشید و یا حمایت کرد (Guerzoni, 2012, 1-16).



شکل 2: اجرای CPE با مجازی سازی تابع شبکه

شکل 1: پیاده سازی سنتی CPE

با پیاده سازی مجازی سازی تابع شبکه روی سرورهای عادی، مدیر شبکه می تواند از منابع به صورت بهینه استفاده کند. همچنین می توان یک سرویس را بدون نیاز به حضور فیزیکی متخصص راه اندازی کرد. از دیگر مزایای مجازی سازی تابع شبکه می توان به کاهش پیچیدگی سیستم و هزینه راه اندازی و نگهداری اشاره کرد.

<sup>8</sup> Internet Service Provider



مجازی سازی تابع شبکه با تمام مزایای پیش بینی شده و سرعت پیشرفت بسیار زیاد و پذیرفته شدن آن توسط دانشگاه و صنعت، هنوز در مراحل اولیه است و جنبه های مهمی وجود دارد که باید مورد بررسی قرار گیرد. چالش های پژوهشی که در ارتباط با مجازی سازی تابع شبکه مطرح می شوند، عبارتند از: مدیریت و یکنوا سازی، بهینه سازی مصرف توان، کارایی مجازی سازی تابع شبکه، تخصیص منابع، امنیت و حریم خصوصی، مدل سازی منابع و توابع و ارائه خدمات (Bolla, and etc, 2014, 26-32).

## 2- بیان مسئله

تمرکز حوزه ای مقاله حاضر بر روی مسئله مصرف توان است. پژوهش های انجام شده در زمینه بهینه سازی مصرف توان نشان داده اند که بیش از 10 درصد هزینه های عملیاتی سرویس دهندگان مخابراتی، با استمداد از پیاده سازی های مبتنی بر مجازی سازی تابع شبکه کاهش یافته است. استدلال این است که با انعطاف پذیری و توانایی تخصیص منابع و مقیاس بندی، ارائه دهندگان سرویس های مخابراتی می توانند تعداد دستگاه های فیزیکی عملیاتی را در هر نقطه کاهش دهند و بنابراین صورت حساب انرژی کاهش می یابد (Richard, and Klein, 2015, 1-15).

تمرکز خاص این مقاله بر روی روشی است که منابع پردازنده<sup>9</sup> را در یک گره مجازی سازی تابع شبکه تقسیم بندی و برای مقدار درصد پردازشگر که به هر تابع شبکه مجازی اختصاص داده می شود، تصمیم گیری می کند. این مسئله بسیار پیچیده است زیرا می تواند عملکرد صف های خروجی مرتبط با کارت های رابط شبکه<sup>10</sup> را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. همچنین نوع استراتژی انتخاب شده می تواند بر روی میزان مصرف توان گره تأثیرگذار باشد. در این مقاله می خواهیم سیاست تقسیم بندی و به-اشتراک گذاری پردازنده ها را تحت عنوان نوبت گردشی توان کارآمد<sup>11</sup> که به طور خاص برای گره مجازی سازی تابع شبکه مطرح شده است، معرفی و مصرف توان آن را بررسی کنیم.

## 3- اهمیت و ضرورت تحقیق

در چند سال گذشته، مصرف توان روند رو به رشد و نگران کننده ای در بخش های صنعتی و به ویژه در فناوری اطلاعات و ارتباطات داشته است. سازمان های دولتی، ارائه دهندگان خدمات اینترنتی و اپراتورهای مخابراتی آمار نگران کننده ای درباره انرژی مورد نیاز شبکه گزارش داده اند. طرح جهانی الکترونیکی توسعه پایدار<sup>12</sup> برآورد کرده است که در صورت عدم استفاده از فناوری های شبکه سبز<sup>13</sup> انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از فناوری اطلاعات و ارتباطات در سال 2020 به 2.3 درصد از کل تولید گازهای گلخانه ای جهان خواهد رسید در حالی که در سال 2002 میزان 1.3 درصد گزارش شده است (Bianco, and etc, 2007, 737-742).

<sup>9</sup> Central Processing Unit

<sup>10</sup> Network Interface Card

<sup>11</sup> Power Efficient Round Robin

<sup>12</sup> Global e-Sustainability Initiative

<sup>13</sup> Green Network Technologies



اخیراً با توجه به افزایش قیمت انرژی، روند رو به رشد تعداد مشتریان، افزایش تقاضا برای دسترسی به پهنای باند و گسترش سرویس‌دهی توسط مخابرات، بهینه‌سازی مصرف انرژی برای مراکز داده و شبکه‌ها و زیرساخت‌های سرویس‌دهی به یک هدف با اولویت بالا تبدیل شده است. افزایش مصرف انرژی شبکه، معمولاً در حوزه سرویس‌های جدید بررسی می‌شود. طبق قانون مور<sup>14</sup>، به ازای هر دو سال میزان مصرف انرژی دو برابر می‌شود که به افزایش تعداد کاربران و دستگاه‌های آن‌ها بستگی دارد. به منظور حمایت از زیرساخت‌های شبکه‌های نسل جدید و خدمات مرتبط با آن‌ها، مخابرات و شرکت‌های اینترنتی نیاز به تجهیزات بزرگ‌تر، با معماری پیچیده‌تر دارند که توانایی انجام فعالیت‌های گسترده‌تر را داشته باشند (Bruschi, and etc, 2016, 1-10).

#### 4- پیشینه پژوهش

تحقیق و پژوهش درباره مجازی‌سازی تابع شبکه در اکتبر 2012 آغاز شد و تعدادی از ارائه‌دهندگان سرویس‌های مخابراتی پیشرو در جهان به‌طور مشترک یک مقاله کاربردی (Han, and etc, 2015, 90-97) در رابطه با اقدامات عملی، تحقیقاتی و صنعتی منتشر کردند. در نوامبر همان سال مؤسسه استانداردهای ارتباطات اروپایی<sup>15</sup> به‌عنوان مرکز استانداردسازی مجازی‌سازی تابع شبکه انتخاب شد (European Telecommunications Standards Institute, 2015).

در سال‌های اخیر چندین سازمان استاندارد، فروشندگان و پروژه‌های تحقیقاتی و دانشگاهی و صنعتی با اهداف گوناگون همگام با مؤسسه استانداردهای ارتباطات اروپایی بر روی مجازی‌سازی تابع شبکه کار می‌کنند و برخی از آن‌ها در همکاری نزدیک با این مؤسسه می‌باشند. همچنین پروژه‌های بسیاری در زمینه توسعه و بهبود قابلیت‌های مجازی‌سازی تابع شبکه انجام شده است. در تمام این پروژه‌ها، طرح‌های ارائه‌شده از مؤسسه استانداردهای ارتباطات اروپایی پیروی می‌کنند. پیاده‌سازی مجازی‌سازی تابع شبکه برای تعیین ویژگی‌های عملکردی و موارد استفاده آن، بر اساس استانداردهای ارتباطات اروپایی تعریف و در حال حاضر اجرا می‌شود (Mijumbi, and etc, 2016, 236-262).

اگرچه مجازی‌سازی تابع شبکه دارای مزایای بسیاری است ولی چالش‌های مهمی نیز وجود دارند که باید بررسی شوند. یکی از این چالش‌ها بهینه‌سازی مصرف توان است. دلیل بررسی این چالش تنها کاهش هزینه‌های انرژی نیست بلکه رعایت استانداردهای قانونی و زیست‌محیطی نیز می‌باشد. موضوعاتی که در زمینه بهینه‌سازی مصرف توان مجازی‌سازی تابع شبکه مطرح می‌شوند عبارت‌اند از: کاهش سرعت پردازنده، خاموش کردن برخی قطعات سخت‌افزاری، تقسیم‌بندی نرخ پردازنده، جایگزینی با تجهیزات انرژی-آگاه<sup>16</sup>، برنامه‌ریزی و الگوریتم‌های زنجیره‌ای و ... از میان موضوعات

<sup>14</sup> Moore

<sup>15</sup> European Telecommunications Standards Institute

<sup>16</sup> Energy-Aware



مختلف، یکی از بهترین و سازگارترین انتخابها برای گره مجازی سازی تابع شبکه تقسیم بندی نرخ پردازنده است.

در طول چند دهه گذشته، استراتژی به اشتراک گذاری پردازنده<sup>17</sup> نقش مهمی در ارزیابی عملکرد مکانیسم های تخصیص منابع ایفا کرده است. مفهوم به اشتراک گذاری پردازنده از الگوریتم های زمان بندی نوبت گردشی<sup>18</sup> در سیستم های کامپیوتری پدید آمده است (Kleinrock, 1967, 242-261). در سال های اخیر، استراتژی به اشتراک گذاری پردازنده توجه دوباره ای به عنوان یک مفهوم مناسب برای مدل سازی عملکرد پروتکل های پهنای باند در شبکه های سوئیچ بسته ای<sup>19</sup> در یک پروتکل هدایت انتقال<sup>20</sup> خاص دریافت کرده است. می دانیم که توزیع در صف با ورودی پواسون یک توزیع هندسی ساده است؛ با صرف نظر از توزیع خدمات مورد نیاز و توزیع زمان (Roberts, 2004, 319-332).

همان گونه که اینترنت تکامل می یابد تا از خدمات جدید و متنوع حمایت کند، نیاز به فرم های متنوع سرویس دهی نیز افزایش پیدا می کند (Aalto, and etc, 2007, 36-43). توانایی تقسیم بندی سهم های پهنای باندهای مختلف یکی از اساسی ترین مشخصه ها برای فرم های متنوع سرویس دهی است. بنابراین نیاز داریم که انواع استراتژی های به اشتراک گذاری پردازنده را بررسی کنیم و بهترین استراتژی متناسب با موضوعمان را انتخاب کنیم.

ما استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد را به گره مجازی سازی تابع شبکه اعمال می کنیم. نوبت گردشی توان کارآمد استراتژی تقسیم بندی پردازنده برای صف های داخلی تابع و صف های کارت رابط شبکه می باشد و هدف آن کاهش زمان عدم فعالیت لینک های خروجی است. به این منظور بسته های اطلاعاتی که از یک تابع شبکه مجازی سرویس دریافت کرده اند، در صف قرار می گیرند و باید برای انتقال از طریق کارت رابط شبکه منتظر بمانند. در این استراتژی برای جلوگیری از هدر رفتن ظرفیت لینک های خروجی، نوبت گردشی توان کارآمد باید به صورت پویا سهمی از پردازنده که به هر تابع شبکه مجازی اختصاص یافته را تغییر دهد. همچنین با توجه به وضعیت خروجی صف های کارت رابط شبکه، به هر صف داخلی تابع سهم بیشتری از پردازنده را برای سرویس دهی اختصاص دهد تا گره مجازی سازی تابع شبکه را از طریق کارت های رابط شبکه کمتر بارگذاری شده، ترک کند. در این مقاله برآنیم که با استفاده از مدل سازی گره مجازی سازی تابع شبکه و اعمال استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد، ایده بهینه سازی مصرف توان را بررسی کنیم.

استراتژی دیگری در مقاله (Faraci, and etc, 2016, 1-10) مسئله تخصیص منابع در داخل گره مجازی سازی تابع شبکه را تحت عنوان نوبت گردشی شبکه - آگاه<sup>21</sup> مورد بحث و بررسی قرار داده است. در این استراتژی زمانی که یکی از صف های داخلی تابع خالی باشد، سهم نرخ پردازنده اختصاصی آن در میان صف های دیگر متناسب با سهم های پردازنده ای که قبلاً اختصاص داده شده، تقسیم بندی می شود. به

<sup>17</sup> Processor Sharing

<sup>18</sup> Round Robin

<sup>19</sup> Packet Switching

<sup>20</sup> Transmission Control Protocol

<sup>21</sup> Network-Aware Round Robin



همین ترتیب، اگر یک صف خالی یک بسته جدید دریافت کند، سهم نرخ پردازنده قبلی دوباره به آن صف اختصاص داده می‌شود. بنابراین در این روش نرخ کلی پردازنده ثابت در نظر گرفته شده است و مسئله بهینه‌سازی مصرف توان مورد توجه قرار نگرفته است. در قسمت بررسی و تحلیل نتایج ما این استراتژی را نیز در نظر می‌گیریم و با استراتژی پیشنهادی نوبت گردشی توان کارآمد مقایسه می‌نماییم.

## 5- مبانی نظری

در این بخش می‌خواهیم سیستم مورد نظر را به طور کامل شرح دهیم و استراتژی تقسیم‌بندی نرخ پردازنده را بررسی کنیم.

### 5-1- زیرساخت تابع مجازی سازی شبکه

زیرساخت تابع مجازی سازی شبکه در شکل 3-الف نشان داده شده است. معماری ارائه شده متناسب با ویژگی‌های زیرساخت مجازی سازی تابع شبکه<sup>22</sup> مؤسسه استاندارد ارتباطات اروپایی است و از سه حوزه مختلف محاسبه، هایپروویژن و زیرساخت شبکه تشکیل شده است.

حوزه محاسبه شامل منابع سخت‌افزاری محاسباتی و ذخیره‌سازی است و به گره اجازه می‌دهد تا میزبان توابع شبکه مجازی باشد. مجازی سازی محاسبات و ذخیره‌سازی‌ها در حوزه هایپروویژن انجام می‌شود. همچنین در این حوزه ماشین‌های مجازی با هدف بهینه‌سازی ساخته می‌شوند و می‌توانند از یک گره به گره‌ای دیگر انتقال یابند و یا متوقف شوند. ارتباطات میان ماشین‌های مجازی و میان ماشین‌های مجازی و محیط خارجی و مسیریابی ترافیک، توسط حوزه زیرساخت شبکه ارائه می‌شود. حوزه زیرساخت بیشتر از مفهوم شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار<sup>23</sup> استفاده می‌کند.

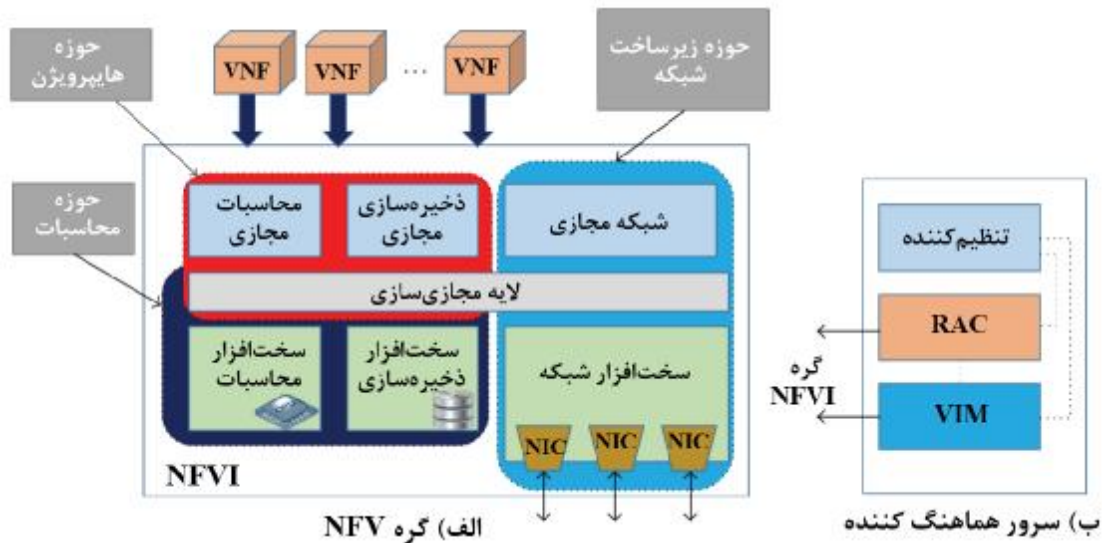
گره مجازی سازی تابع شبکه توسط سرور هماهنگ‌کننده از راه دور کنترل می‌شود. معماری سرور هماهنگ‌کننده در شکل 3-ب نشان داده شده است. این سرور از سه بلوک اصلی ساخته شده است: تنظیم‌کننده، کنترل‌کننده اختصاصی منابع<sup>24</sup> و مدیر زیرساخت مجازی سازی<sup>25</sup> که به صورت سطوح متقاطع کار می‌کنند.

<sup>22</sup> Network Functions Virtualization Infrastructure

<sup>23</sup> Software Defined Network

<sup>24</sup> Resource Allocation Controller

<sup>25</sup> Virtualized Infrastructure Manager



شکل 3: زیرساخت تابع مجازی سازی شبکه

برای هر جریان ترافیکی جدیدی که وارد شبکه می شود، بلوک های بالا وظایف زیر را انجام می دهند:

(1) تنظیم کننده تصمیم می گیرد که کدام یک از گره ها باید میزبان توابع شبکه مجازی درخواستی باشد.

همچنین تمام الگوریتم ها و استراتژی ها را برای مدیریت و هماهنگی در کل شبکه اجرا می کند. پس از هر تصمیمی، تنظیم کننده از کنترل کننده اختصاصی منابع درخواست می کند که ماشین های مجازی را منتقل و یا متوقف کند.

(2) کنترل کننده اختصاصی منابع ماشین های مجازی را به منظور ارائه پردازش مجازی و ذخیره سازی منابع برای اجرای توابع شبکه درخواستی مورد آزمایش قرار می دهد.

(3) مدیر زیرساخت مجازی سازی شامل یک کنترل کننده شبکه مبتنی بر نرم افزار است که با توجه به تصمیمات تنظیم کننده، سوئیچ های سخت افزاری و نرم افزاری آن را به گونه ای تنظیم می کند تا جریان های ترافیک از طریق ماشین های مجازی که توابع درخواستی را اجرا می کنند، عبور کنند. به طور خاص، اگر جریان جدیدی نیاز به تابع نداشته باشد یا هیچ یک از توابع مورد نیاز در سرورهای محلی وجود نداشته باشند، سوئیچ سخت افزاری شبکه مبتنی بر نرم افزار به گونه ای تنظیم شده است که جریان

را به طور مستقیم به اینترنت هدایت می کند؛ در مقابل، اگر برخی از توابع در یکی از سرورهای محلی اجرا شوند، سوئیچ محلی مسیر جریان را به سرورهای محلی و سپس خارج از اینترنت هدایت می کند. به همین ترتیب، سوئیچ های نرم افزاری شبکه های مبتنی بر نرم افزار در سرورهای محلی پیکربندی می شوند به طوری که جریان جدید در ابتدا از تمام ماشین های مجازی محلی که توابع درخواستی را اجرا می کنند، عبور می کند و سپس به خارج سوئیچ سخت افزاری شبکه های مبتنی بر نرم افزار ارسال می شود. در پایان جریان، سرور هماهنگ کننده باید برخی از منابع را آزاد کند، ماشین های مجازی





درگیر شده را از بین ببرد و مسیرهای مجازی نسبی را خراب کند (Faraci, and Schembra, 2015, 435-450).

### 5-2- معماری گره تابع مجازی سازی شبکه

با توجه به توضیحات ارائه شده، معماری گره مجازی سازی تابع شبکه در شکل 4 نمایش داده شده است. اجزای اصلی آن پردازنده و کارت های رابط شبکه می باشند. پردازنده، حوزه محاسبات را مدیریت می کند و میزبان حوزه های پرویزن است. کارت رابط شبکه با صف های خود، بلوک سخت افزار شبکه در شکل 3 را تشکیل می دهد (Faraci, and etc, 2016, 1-10).

گره مجازی سازی تابع شبکه را در نظر می گیریم و استراتژی موردنظرمان را به آن اعمال می کنیم. تعداد توابع شبکه مجازی برابر  $M$  می باشد که در گره در حال حرکت هستند و  $L$  تعداد کارت های رابط شبکه خروجی است. به منظور ساده سازی روابط، فرض می کنیم که تمام کارت های رابط شبکه دارای ویژگی های یکسان از نظر ظرفیت بافر و نرخ خروجی هستند. بنابراین،  $K^{(NIC)}$  اندازه صف مرتبط با هر کارت رابط شبکه است که حداکثر تعداد بسته هایی که هر صف می تواند شامل شود را نشان می دهد.  $\mu^{(NIC)}$  نرخ انتقال لینک خروجی مرتبط با هر کارت رابط شبکه است و با واحد بیت بر ثانیه<sup>26</sup> نشان داده می شود. بلوک توزیع کننده جریان، وظیفه مسیریابی هر جریان ورودی به سمت تابع موردنیاز را دارد و یک سوئیچ نرم افزاری شبکه مبتنی بر نرم افزار است. این بلوک جریان ها را به ماشین های مجازی هدایت می کند که توابع درخواستی را مطابق با پیام های کنترلی دریافت شده از مدیر زیرساخت مجازی سازی اجرا می کنند.



<sup>26</sup> bit/s



شکل 4: معماری گره مجازی سازی تابع شبکه

$\mu^{(P)}$  سرعت پردازش کلی پردازنده با واحد بسته بر ثانیه<sup>27</sup> است. این نرخ در میان تمام توابع فعال متناسب با استراتژی موردنظر به اشتراک گذاشته می شود.  $\mu^{(F)}$  آرایه کلی  $\mu_{[m]}^{(F)}$  است. زمانی که  $m \in \{1, \dots, M\}$  باشد بخشی از نرخ پردازنده اختصاص داده شده به ماشین مجازی، برای اجرای تابع  $F_m$  استفاده می شود. همچنین داریم:

$$\sum_{m=1}^M \mu_{[m]}^{(F)} = \mu^{(P)} \quad (1)$$

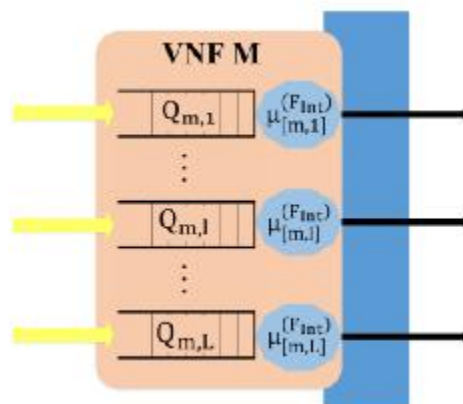
هنگامی که یک بسته توسط تابع موردنیاز سرویس داده می شود، به یکی از کارت های رابط شبکه فرستاده می شود تا از گره خارج شود. اگر کارت رابط شبکه در حال ارسال بسته دیگری باشد، بسته های دریافت شده در صف های کارت رابط شبکه قرار می گیرند. صف های مرتبط با NIC 1 را به صورت کلی با  $Q_1^{(NIC)}$  نشان می دهیم.

به منظور اجرای استراتژی موردنظر، بلوک مرتبط به هر تابع با مجموعه ای از  $L$  صف موازی، با عنوان صف های داخلی تابع در شکل 5 با تابع کلی  $F_m$  نشان داده شده است.

به صورت کلی لامین صف داخلی تابع  $F_m$ ، با عنوان  $Q_{m,l}$  در شکل 5 نشان داده شده است و برای بسته هایی استفاده می شود که پس از دریافت سرویس تابع  $F_m$  در صف قرار گرفته اند تا گره را از طریق NIC 1 ترک کنند.  $K_{Ins}^{(F)}$  اندازه هر صف داخلی تابع است. نرخ پردازنده اختصاصی هر تابع کلی  $F_m$  میان صف های داخلی آن تقسیم می شود.  $\mu_{[m,l]}^{(F_{Ins})}$  بخشی از نرخ پردازنده اختصاص داده شده به صف  $Q_{m,l}$ ، از تابع  $F_m$  است. همچنین، داریم:

$$\sum_{l=1}^L \mu_{[m,l]}^{(F_{Ins})} = \mu_{[m]}^{(F)} \quad (2)$$

سهم نرخ پردازنده اختصاص داده شده به هر صف داخلی تابع به صورت پویا توسط کنترل کننده اختصاصی منابع با توجه به نوع استراتژی تغییر می کند.



شکل 5: بلوک دیگرام تابع کلی  $F_m$

<sup>27</sup> packets/s



## 3-5- استراتژی به اشتراک گذاری پردازنده نوبت گردشی توان کارآمد

کنترل کننده اختصاصی منابع در مورد تقسیم بندی نرخ پردازنده در دو مرحله تصمیم گیری می کند:

**مرحله 1:** واگذاری سهم نرخ پردازنده به صفهایی که خروجی یک کارت شبکه خاص هستند.

این مرحله با هدف تحقق استراتژی پیشنهادی و کاهش استفاده از لینکهای خروجی کارت رابط شبکه و در نتیجه، کاهش تأخیر در صفهای مرتبط انجام می شود. به این منظور، یک صف مجازی را در نظر بگیرید که شامل بستههایی است که در همه صفهای داخلی تابع  $Q_{m,l}$  برای هر  $m \in [1, M]$  ذخیره شده اند و تمام بستهها گره را از طریق NIC 1 ترک خواهند کرد. صف مجازی را با  $Q_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)}$  و نرخ سرویس دهی اش را با  $\mu_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)}$  نشان می دهیم. همچنین داریم:

$$\mu_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)} = \sum_{m=1}^M \mu_{[m,l]}^{(F_{Ins})} \quad (3)$$

با توجه به مطالب گفته شده، ایده این است که سهم بیشتری از نرخ پردازنده به صفهای داخلی تابعی داده شود که جریانها را به کارتهای رابط شبکه ای که در حال تخلیه هستند، ارسال می کند. بنابراین جریانهایی که گره را از طریق کارتهای رابط شبکه کمتر بارگذاری شده ترک می کنند، برتری دارند و کنترل کننده اختصاصی منابع،  $\mu_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)}$  را به روش زیر محاسبه می کند:

$$\mu_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)} = \frac{q_{ref} - Q_1^{(NIC)}}{\sum_{j=1}^L \{q_{ref} - Q_j^{(NIC)}\}} \mu^{(P)} \quad (4)$$

که در آن  $Q_1^{(NIC)}$  نشان دهنده وضعیت صف مرتبط با NIC 1 است و  $q_{ref}$  به شرح زیر تعریف می شود:

$$q_{ref} = \min \{ \alpha \cdot \max_j (Q_j^{(NIC)}), K^{(NIC)} \} \quad (5)$$

عبارت  $q_{ref}$  یک مقدار هدفمند برای مرجع است که از طریق وضعیت صف کارت رابط شبکه ای محاسبه می شود که دارای بالاترین طول است و با ضریب  $\alpha$  تقویت شده و به میزان حداکثر طول صف  $K^{(NIC)}$  کاهش یافته است. در این روش اگر  $\alpha = 1$  در نظر بگیریم، صف کارت رابط شبکه ای که دارای بالاترین طول است، بستههای صفهای داخلی تابع را دریافت نمی کند چون نرخ سرویس آنها صفر شده است. همچنین صفهای دیگر بستهها را با نرخی دریافت می کنند که متناسب با فاصله بین طول آنها و طول صف کارت رابط شبکه ای است که بیشترین میزان بارگذاری را دارد. بنابراین مقدار  $\alpha = 1$  عملکرد خوبی ندارد زیرا همیشه یک گروه از صفهای داخلی تابع سرویس دهی نمی شوند. در نهایت مشخص شد تمام مقادیر  $\alpha$  در بازه [1,2] عملکرد تقریباً یکسانی دارند. به همین دلیل، در تجزیه و تحلیل های عددی  $\alpha$  را برابر 1.2 قرار می دهیم.

**مرحله 2:** تقسیم بندی نرخ پردازنده به هر صف داخلی تابع.



به صورت کلی لامین صف داخلی تابع  $F_m$  را به صورت صف  $Q_{m,l}$  در نظر گرفته شده است. نرخ سرویس دهی متناسب با وضعیت فعلی این صف در مقایسه با لامین صف توابع دیگر محاسبه می شود. به این منظور، وضعیت صف مجازی را با  $Q_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)}$  نشان می دهیم. همچنین می توان آن را از طریق مجموع وضعیت های تمام صف های داخلی تابع  $Q_{m,l}$  برای هر  $m \in [1, M]$  محاسبه کرد که:

$$Q_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)} = \sum_{k=1}^M Q_{k,l}^{(F_{Ins})} \quad (6)$$

بنابراین، نرخ سرویس دهی صف داخلی تابع  $Q_{m,l}$  به عنوان بخشی از نرخ سرویس دهی اختصاص داده شده بر اساس مرحله اول به صف مجازی  $Q_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)}$  به صورت  $\mu_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)}$  تعیین می شود که به شرح زیر است:

$$\mu_{[m,l]}^{(F_{Ins})} = \frac{Q_{m,l}^{(F_{Ins})}}{Q_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)}} \mu_{Aggr}^{(\rightarrow NIC_1)} \quad (7)$$

البته اگر در هر زمانی یک صف داخلی تابع خالی باقی مانده باشد، به میزان سهم نرخ پردازنده اختصاص داده شده به آن صف، از نرخ کلی پردازنده کم می کنیم. به همین ترتیب، اگر یک صف خالی یک بسته جدید دریافت کند، سهم نرخ پردازنده قبلی دوباره به آن صف اختصاص داده می شود.

## 6- بحث پژوهش

هدف اصلی استراتژی پیشنهادی بهینه سازی مصرف توان در گره مجازی سازی تابع شبکه است. این استراتژی یک روش برای کاهش مصرف توان است به همین دلیل نام نوبت گردشی توان کارآمد را برای آن انتخاب نموده ایم. این استراتژی نیز یک روش برای تقسیم بندی نرخ پردازنده است و هنگامی که در صف های داخلی گره مجازی سازی تابع شبکه هیچ بسته ای برای سرویس دهی وجود ندارد و صف خالی باقی مانده است، نرخ کلی پردازنده را به میزان همان صف خالی کاهش می دهیم. با این کار نرخ کلی پردازنده تغییر می کند و در نتیجه مصرف توان نیز کاهش می یابد.

### 6-1- شرح مسئله

ابتدا گره مجازی سازی تابع شبکه را در برنامه متلب شبیه سازی و استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد را به آن اعمال می کنیم. سپس نمودارهای حاصل از شبیه سازی روش پیشنهادی مان را با روش نوبت گردشی شبکه-آگاه مقایسه می کنیم و نتایج را گزارش می دهیم.

استراتژی پیشنهادی نوبت گردشی توان کارآمد بسته های اطلاعاتی را بررسی می کند که از یک تابع شبکه مجازی سرویس دریافت کرده و در صف قرار گرفته اند و برای انتقال از طریق کارت شبکه منتظر بمانند. این استراتژی سهم پردازنده اختصاص یافته به هر تابع شبکه مجازی را تغییر می دهد تا این بسته ها گره مجازی سازی تابع شبکه را از طریق کارت های رابط شبکه کمتر بارگذاری شده، ترک کنند. ایده ای که ما برای تقسیم بندی نرخ پردازنده استفاده کردیم به این صورت است که هنگامی که



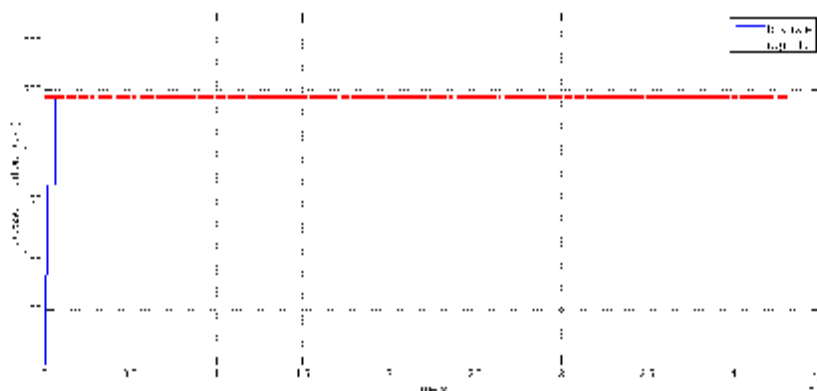
در یکی از صف‌های داخلی گره مجازی‌سازی تابع شبکه هیچ بسته‌ای برای سرویس‌دهی وجود ندارد و صف خالی باقی‌مانده است، نرخ پردازنده را به میزان همان صف خالی کاهش می‌دهیم. با این کار نرخ کلی پردازنده و در نتیجه مصرف توان نیز کاهش می‌یابد.

در استراتژی نوبت‌گردشی شبکه-آگاه زمانی که یکی از صف‌های داخلی تابع خالی باشد، سهم نرخ پردازنده اختصاصی آن در میان صف‌های دیگر متناسب با سهم‌های پردازنده‌ای که قبلاً اختصاص داده شده، تقسیم‌بندی می‌شود. به همین ترتیب، اگر یک صف خالی بسته‌ای جدید دریافت کند، سهم نرخ پردازنده قبلی دوباره به آن صف اختصاص داده می‌شود.

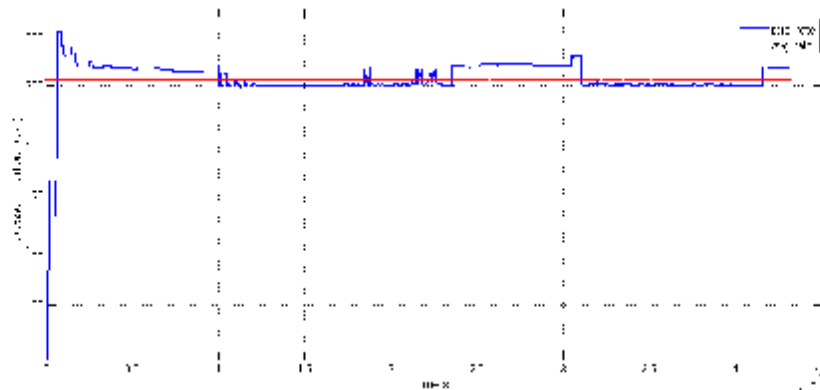
## 6-2- بررسی و تحلیل نتایج

در این قسمت نمودارهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را نمایش داده‌ایم و در هر قسمت به‌صورت جداگانه نمودارها را مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهیم. در تجزیه و تحلیل عددی، یک گره مجازی-سازی تابع شبکه با  $M=4$  (تعداد توابع شبکه مجازی) و  $L=3$  (تعداد کارت‌های رابط شبکه خروجی) در نظر می‌گیریم. بنابراین یک گره را با 12 جریان مختلف داریم که هر کدام با دو مشخصه توابع شبکه مجازی درخواستی و کارت‌های رابط شبکه خروجی مشخص می‌شوند. هر جریان با یک مدل روشن/خاموش تولید می‌شود که مدت‌زمان روشن/خاموش بودن با توزیع نمایی مشخص می‌شود. وقتی یک جریان در حالت خاموش است، هیچ بسته‌ای از آن جریان به گره وارد نمی‌شود؛ در عوض، زمانی که در حالت روشن است، بسته‌ها با میانگین نرخ  $\lambda_{ON}$  به گره وارد می‌شوند. اندازه هر بسته نیز دارای توزیع نمایی با میانگین 1 کیلوبایت است. در تمام شبیه‌سازی‌ها، مدت‌زمان یکسان  $\delta = \bar{T}_{OFF} + \bar{T}_{ON} = 5 \text{ msec}$  را برای طول دوره روشن/خاموش بودن در نظر گرفتیم.

نمودارهای نرخ کلی کارت‌های رابط شبکه در استراتژی‌های نوبت‌گردشی توان کارآمد و نوبت‌گردشی شبکه-آگاه به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است.



شکل 6: نمودار نرخ کارت‌های رابط شبکه در استراتژی نوبت‌گردشی توان کارآمد



شکل 7: نمودار نرخ کارت‌های رابط شبکه در استراتژی نوبت گردشی شبکه-آگاه

همان‌گونه که در شکل‌های بالا مشهود است، میزان نرخ کلی کارت‌های رابط شبکه در استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد کمتر از استراتژی نوبت گردشی شبکه-آگاه است. همچنین در نمودار استراتژی نوبت گردشی شبکه-آگاه نوسان وجود دارد. دلیل این نوسانات عدم برقراری تعادل در پردازنده هنگام تقسیم نرخ بین صف‌ها است. پردازنده نمی‌تواند بین نرخ قبلی صف‌ها و نرخ‌های جدید که می‌خواهد به هر صف اختصاص دهد، تعادل برقرار نماید؛ بنابراین نوسانات اتفاق می‌افتند. زمانی که تقسیم‌بندی نرخ بین صف‌های پر می‌خواهد انجام شود، این نوسانات ایجاد می‌شوند. نمودار استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد تقریباً ثابت است و نوسانی وجود ندارد، زیرا در این روش دیگر تقسیم‌بندی نرخ انجام نمی‌شود و فقط به میزان نرخ صف‌های خالی، از نرخ پردازنده کم می‌شود. در این حالت در پردازنده تعادل برقرار است.

حال می‌خواهیم توان این دو استراتژی را با هم مقایسه نماییم. برای مقایسه توان، از مدل توان مقاله (Kim, and etc, 2014, 153-160) استفاده می‌کنیم. در این مقاله، یک مدل توان ساده ارائه شده است که می‌تواند به‌طور مؤثر برای اندازه‌گیری توان در زمان واقعی استفاده شود. اگرچه این مدل ساده است ولی دارای دقتی بیش از 90 درصد می‌باشد.

$$P_{\text{system}} = P_{\text{CPU}} + P_{\text{DRAM}} + P_{\text{other}} = \beta f^3 c + \gamma f + \varepsilon N + \omega K + P_{\text{other}} \quad (8)$$

این مدل توان ساده با 4 پارامتر مشخص شده است: فرکانس کنونی، تعداد هسته‌های فعال، تعداد دسترسی‌ها به حافظه پنهان و تعداد خطاهای آخرین سطح حافظه پنهان. برخلاف تکنیک‌های مدل‌سازی توان موجود که اکثر آن‌ها پیچیده است و برای استفاده در زمان واقعی استفاده می‌شود، این مدل توان به‌اندازه کافی ساده است که برای استفاده عملی کاربرد دارد و همچنین از دقت بسیار بالایی برخوردار است.

مقادیر پارامترهای مدل توان رابطه (8) بر اساس سیستم سرور Intel SR1690WB با پردازنده Xeon E5620 محاسبه شده است. در این مدل  $f$  فرکانس،  $c$  تعداد هسته‌های فعال،  $N$  تعداد دسترسی‌ها به

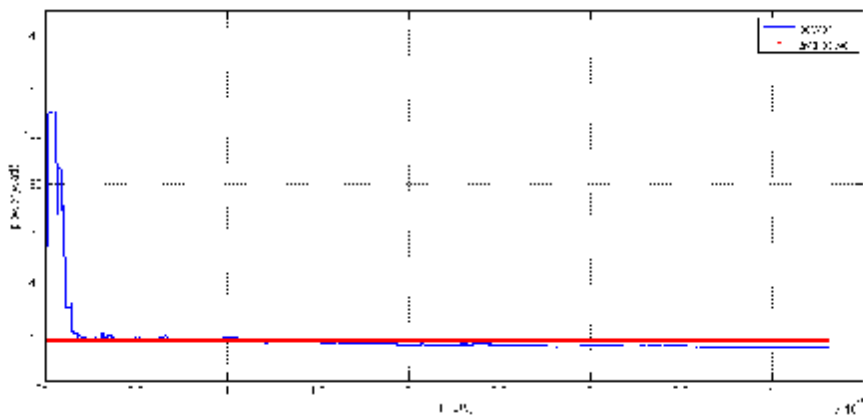


حافظه پنهان و  $K$  تعداد خطاها در آخرین سطح حافظه پنهان هستند. مقادیر ثابت مدل توان در جدول زیر مشخص شده‌اند (Kim, and etc, 2014, 153-160).

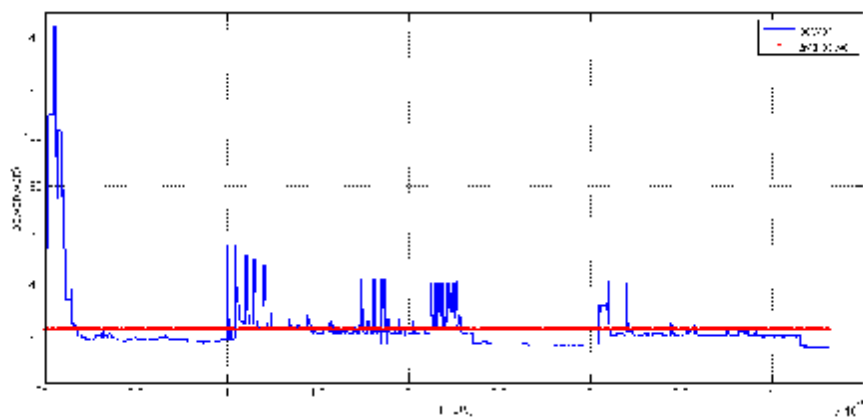
جدول 1: مقادیر ثابت مدل توان

پارامتر	مقدار
$\beta$	0.114403
$\gamma$	5.323903
$\varepsilon$	1.278825
$\omega$	0.194341
$P_{other}$	52.34901

بر اساس این مدل نمودارهای توان کارت‌های رابط شبکه در استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد در شکل 8 و نوبت گردشی شبکه-آگاه در شکل 9 نمایش داده شده است.



شکل 8: نمودار مصرف توان کارت‌های رابط شبکه در استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد



شکل 9: نمودار مصرف توان کارت‌های رابط شبکه در استراتژی نوبت گردشی شبکه-آگاه



همانگونه که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، میزان مصرف توان کارت‌های رابط شبکه در استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد کمتر از استراتژی نوبت گردشی شبکه-آگاه است. در استراتژی نوبت گردشی شبکه-آگاه توان متوسط 21.51 وات و توان لحظه‌ای 144.8 وات است. در استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد میزان توان متوسط نسبت به استراتژی دیگر، 5.08 وات کاهش پیدا کرده و به 16.43 وات رسیده است و بالاترین میزان توان لحظه‌ای 108.6 وات است. از مقایسه نمودارها درمی‌یابیم که به هدف استراتژی پیشنهادی‌مان یعنی کاهش مصرف توان رسیدیم و نسبت به استراتژی نوبت گردشی شبکه-آگاه، 23.61 درصد توان متوسط و 25 درصد توان لحظه‌ای را کاهش دادیم.

### 7- نتیجه‌گیری

توان حیاتی‌ترین عنصر طبیعت می‌باشد و امروزه اهمیت و جایگاه خود را در همه صنعت‌ها و شاخه‌ها پیدا کرده است. در سیستم‌های محاسباتی مانند مراکز داده، توان بالایی مصرف می‌شود. افزایش مصرف توان، شرکت‌ها را مجبور می‌کند که برای برآورد هزینه‌ها تدابیر خاصی بیندیشند و بودجه‌های کلانی را صرف کنند. از طرف دیگر مصرف زیاد توان باعث گرم شدن کره زمین می‌شود و آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به محیط‌زیست وارد می‌کند. بنابراین همواره تلاش برای بهینه کردن مصرف توان بوده است و کارهای بسیاری در این زمینه انجام گردیده است. در مسئله بهینه کردن مصرف توان، انتخاب درست الگوریتم تقسیم‌بندی منابع در مجازی‌سازی تابع شبکه بسیار مهم است و کمک بزرگی به فرایند بهبود مصرف توان می‌کند. همان‌طور که گفته شد در این مقاله، مسئله تخصیص منابع در داخل گره با معرفی استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این استراتژی در مورد به اشتراک‌گذاری پردازنده می‌باشد و ایده اصلی آن بهینه‌سازی مصرف توان در گره مجازی‌سازی تابع شبکه است. نتایج حاصل از بررسی و مطالعه این استراتژی نشان دادند که قابلیت کاهش توان را دارا می‌باشد. همچنین گره‌های مجازی‌سازی تابع شبکه که استراتژی نوبت گردشی توان کارآمد را اجرا می‌کنند، می‌توانند در همان شبکه با گره‌هایی که از استراتژی‌های دیگر استفاده می‌کنند همکاری کنند و از این امکان می‌توان در اینترنت آینده استفاده کرد.

### مراجع

- [1] Aalto, S., Ayesta, U., and Borst, S. (2007). *Beyond Processor Sharing*, ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, vol. 34, pp. 36 – 43.
- [2] Bianco, C., Cucchietti, F., and Griffa, G. (September-October 2007). *Energy consumption trends in the next generation access network—a telco perspective*, in Proceedings of the 29th International Telecommunication Energy Conference (INTELEC '07), pp. 737–742, Rome, Italy.
- [3] Bolla, R., Lombardo, C., Bruschi, R., and Mangialardi, S. (Mar. 2014). *DROpv2: Energy efficiency through network function virtualization*, IEEE Netw., vol. 28, no. 2, pp. 26–32.





- [4] Bruschi, R., Carrega, A., and Davoli, F. (2016). *A Game for Energy-Aware Allocation of Virtualized Network Functions*, Journal of Electrical and Computer Engineering, Hindawi Publishing Corporation, 10 pages.
- [5] ETSI Ind. Spec. Group (ISG) Network Functions Virtualisation (NFV), (Oct. 2013) *ETSI GS NFV 001 V1.1.1: Network function virtualization. Use cases*, Sophia-Antipolis Cedex, France, pp. 15–32. [Online]. Available: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/nfv/001\\_099/001/01.01.01\\_60/gs\\_nfv001v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/nfv/001_099/001/01.01.01_60/gs_nfv001v010101p.pdf).
- [6] European Telecommunications Standards Institute. (2015). *European telecommunications standards institute, Industry Specification Groups (ISG)—NFV*, Sophia-Antipolis Cedex, France. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv>.
- [7] Faraci, G., Lombardo, A., and Schembra, G. (2016). *A Processor-Sharing Scheduling Strategy for NFV Nodes*, Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 16, 10 pages.
- [8] Faraci, G., and Schembra, G. (2015). *An Analytical Model to Design and Manage a Green SDN/NFV CPE Node*, IEEE Transactions on Network & Service Management, vol. 12, no. 3.
- [9] Guerzoni, R. (Jun. 2012). *Network functions virtualisation: An introduction, benefits, enablers, challenges and call for action*, Introductory white paper, in Proc. SDN OpenFlow World Congr., pp. 1–16.
- [10] Han, B., Gopalakrishnan, V., Ji, L., and Lee, S. (Feb. 2015). *Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations*, IEEE Communication Mag., vol. 53, no. 2, pp. 90–97.
- [11] Kim, M., Ju, Y., Chae, J., and Park, M. (2014). *A Simple Model for Estimating Power Consumption of a Multicore Server System*, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 153-160.
- [12] Kleinrock, L. (1967). *Time-shared systems: a theoretical Treatment*, J. ACM., vol. 14, pp. 242–261.
- [13] Mijumbi, R., Serrat, J., and Gorricho, J. (2016). *Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges*, IEEE communications surveys & tutorials, vol. 18, no. 1, pp. 236-262.
- [14] Richard, P., and Klein, T. (2015). *Global What if Analyzer of NeTwork Energy Consumption (GWATT). Bell labs application able to measure the impact of technologies like SDN & NFV on network energy consumption*, Bell Labs, Alcatel Lucent, Murray Hill, NJ, USA, White Paper, pp. 1–15. [Online]. Available: <http://gwatt.net/intro/1>.
- [15] Roberts, J.W. (2004). *A survey on statistical bandwidth sharing*, Computer Network, vol. 45, 319–332.
- [16] Wu, J., Zhang, Z., Hong, Y., and Wen, Y. (Jan. 2015). *Cloud radio access network (C-RAN): A primer*, IEEE Network, vol. 29, no. 1, pp. 35–41.