
الگوریتم‌های کوانتومی برای بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده: کاربردها و مقایسه با روش‌های کلاسیک در

نمونه‌های واقعی

علی اصغر اسدی*

۱- کارشناسی رشته مهندسی تکنولوژی نرم افزار کامپیوتر، دانشگاه لیان، لیان، ایران .

(کارشناس درآمد شهرداری منطقه ۲)

چکیده

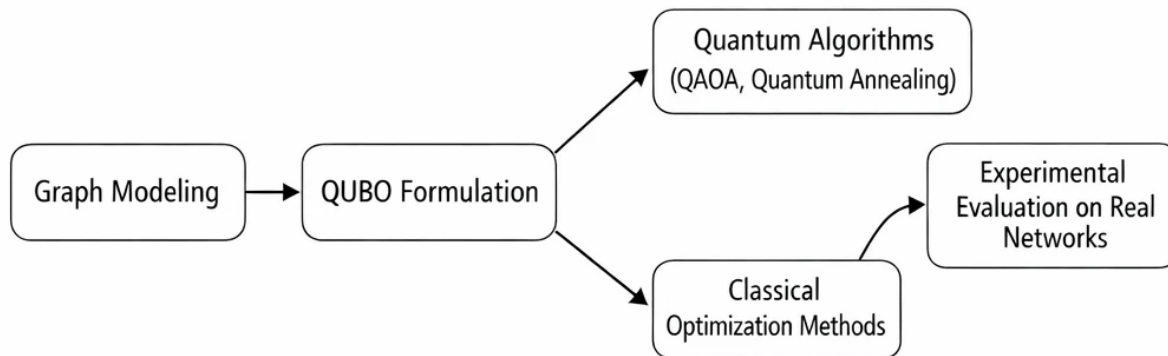
در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده به‌عنوان یکی از مسائل بنیادین در علوم کامپیوتر، مهندسی نرم‌افزار و هوش مصنوعی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. شبکه‌های پیچیده با ساختارهای غیرخطی، تعاملات چندلایه و وابستگی‌های متقابل میان گره‌ها و یال‌ها، چالش‌های محاسباتی قابل‌توجهی را برای روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی ایجاد می‌کنند. در این میان، ظهور محاسبات کوانتومی و توسعه الگوریتم‌های کوانتومی مبتنی بر مدل‌سازی QUBO، افق‌های جدیدی را برای حل این دسته از مسائل فراهم کرده است. هدف اصلی این مقاله، ارائه یک مرور تحلیلی و مقایسه‌ای از الگوریتم‌های کوانتومی در بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده و بررسی میزان کارایی آن‌ها در مقایسه با روش‌های کلاسیک مرجع در نمونه‌های واقعی است. روش تحقیق در این مقاله به‌صورت مروری-تحلیلی بوده و بر تحلیل مفهومی مدل‌سازی مسائل گرافی در قالب QUBO، بررسی الگوریتم‌های کوانتومی شاخص نظیر QAOA و آنیلینگ کوانتومی، و مقایسه آن‌ها با رویکردهای کلاسیک متداول استوار است. در این چارچوب، نحوه تبدیل محدودیت‌های گرافی به توابع هدف باینری، نقش طراحی Hamiltonian ها، و تأثیر پارامترهای اجرایی بر کیفیت راه‌حل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، یافته‌های گزارش‌شده در مطالعات تجربی مرتبط با شبکه‌های واقعی، از جمله شبکه‌های فناوری اطلاعات، انرژی و ساختارهای گرافی پیچیده، به‌صورت تحلیلی ارزیابی شده‌اند. یافته‌های این بررسی نشان می‌دهد که الگوریتم‌های کوانتومی در مسائل با ابعاد کوچک تا متوسط می‌توانند به پاسخ‌هایی با کیفیت قابل‌رقابت یا در برخی موارد برتر نسبت به روش‌های کلاسیک دست یابند، به‌ویژه زمانی که مدل‌سازی QUBO به‌درستی انجام شود. با این حال، چالش‌هایی نظیر نویز، محدودیت سخت‌افزاری و مقیاس‌پذیری همچنان مانع استفاده گسترده از این الگوریتم‌ها در مسائل بزرگ‌مقیاس است. در جمع‌بندی، می‌توان نتیجه گرفت که رویکردهای کوانتومی در حال حاضر بیشتر به‌عنوان مکمل روش‌های کلاسیک مطرح بوده و توسعه چارچوب‌های ترکیبی کوانتومی-کلاسیک می‌تواند مسیر پژوهش‌های آینده در بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده را هموار سازد.

واژگان کلیدی: الگوریتم‌های کوانتومی، بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده، مدل‌سازی QUBO، QAOA، روش‌های کلاسیک

مقدمه

در سال‌های اخیر مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده از نظر تئوریک و عملی به یکی از مباحث پررونق در هوش مصنوعی و مهندسی نرم‌افزار تبدیل شده است. شبکه‌های پیچیده با اتصالات متنوع و توپولوژی‌های غیرخطی می‌توانند به شکل‌های مختلف به معماهای بهینه‌سازی برخورد کنند که به‌طور سنتی با روش‌های کلاسیک حل می‌شوند. با ظهور رایانه‌های کوانتومی و مدل‌سازی مسئله به صورت QUBO، امکان بهره‌برداری از ویژگی‌های فازی و browsing کوانتومی برای یافتن پاسخ‌های بهینه یا تقریبی فراهم شده است. در عین حال، مقایسه بین رویکردهای کوانتومی و کلاسیک از منظر کارایی، هزینه محاسباتی و پایداری در برابر نویز، اهمیت دارد تا جایگاه عملی هر رویکرد روشن گردد. این مقاله با هدف ارائه مرور تحلیلی در سطح کارشناسی ارشد/کارشناسی مهندسی نرم‌افزار، به بررسی سه بخش کلیدی می‌پردازد: مدل‌سازی QUBO برای مسائل گراف، بررسی الگوریتم‌های کوانتومی با تمرکز بر QAOA و annealing، و مقایسه با روش‌های کلاسیک مرجع در نمونه‌های واقعی.

در فهرست مباحث، تمرکز بر مدل‌سازی گراف‌ها به‌عنوان مجموعه‌ای از گره‌ها و یال‌هاست که می‌تواند با استفاده از ماتریس‌های گراف مانند ماتریس همبستگی یا ماتریس دودویی نمایش داده شود. برای تبدیل مسائل بهینه‌سازی به مسئله‌ای همچون QUBO، نیازمند حذف محدودیت‌ها و کاهش دادن مسائل به مسأله‌ای تنها با متغیرهای باینری خواهیم بود. چنین تبدیل‌هایی به‌ویژه در تحلیل شبکه‌های پیچیده با گراف‌های ناهمگن اهمیت دارد، چراکه می‌تواند همگرایی نسبی الگوریتم‌های کوانتومی و مقایسه با راهبردهای کلاسیک را تسهیل کند. در این چارچوب، بررسی می‌شود که چگونه طراحی Hamiltonians مناسب، پروفایل‌های نویز، و پارامترهای فرایند مانند عمق دورها در QAOA یا عمق annealing می‌تواند بر کیفیت راه‌حل و هزینه اجرایی تأثیر بگذارد. همچنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های واقعی از جمله شبکه‌های فناوری اطلاعات، شبکه‌های زیستی یا شبکه‌های توزیع، محدودیت‌های عملی همچون اندازه مسئله، زمان پاسخ و منابع محاسباتی می‌تواند تصمیم‌گیری بین رویکردهای مختلف را تحت تأثیر قرار دهد. ارزیابی دقیق از نتایج تجربی در قالب معیارهای مقیاسی، با توجه به منابع داده‌شده (Li et al., 2017؛ Yuanyuan & Xiyu, 2018؛ Colucci et al., 2023)، می‌تواند تصویر روشنی از پایداری و افق‌های توسعه ارائه دهد. در این مقاله، ابتدا به تشریح مدل‌سازی QUBO برای مسائل گراف می‌پردازیم و نشان می‌دهیم چگونه می‌توان محدودیت‌های گراف را با استخراج مؤلفه‌های عددی در قالب تابع هدف QUBO گنجانده. سپس به مرور الگوریتم‌های کوانتومی نسبت به مدل‌سازی و اجرای آن‌ها می‌پردازیم و مقایسه‌ای با روش‌های کلاسیک مرجع انجام می‌دهیم. در نهایت، با طراحی آزمایش‌ها و ارائه نتایج تجربی، نقاط قوت و ضعف هر رویکرد را در نمونه‌های واقعی بررسی می‌کنیم و با نتیجه‌گیری و پیشنهادها پژوهشی، چشم‌اندازی برای آینده ارائه می‌دهیم.



شکل ۱. چارچوب مفهومی بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده با استفاده از مدل‌سازی QUBO و الگوریتم‌های کوانتومی و کلاسیک

در شکل ۱، چارچوب مفهومی کلی پژوهش برای بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده نمایش داده شده است. فرآیند از مرحله مدل‌سازی گراف آغاز می‌شود که در آن ساختار شبکه شامل گره‌ها و یال‌ها به صورت یک مدل گرافی تعریف می‌گردد. سپس این مدل گرافی به چارچوب QUBO تبدیل می‌شود که نقش هسته اصلی در یکپارچه‌سازی روش‌های کلاسیک و کوانتومی را ایفا می‌کند. مدل QUBO امکان بازنمایی مسائل بهینه‌سازی شبکه را در قالب متغیرهای باینری فراهم کرده و زمینه را برای اعمال الگوریتم‌های مختلف حل فراهم می‌سازد. در ادامه، مدل QUBO به صورت موازی توسط الگوریتم‌های کوانتومی شامل QAOA و آنیلینگ کوانتومی، و همچنین روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک پردازش می‌شود. نتایج حاصل از این دو رویکرد در مرحله ارزیابی تجربی بر روی شبکه‌های واقعی مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرند. این چارچوب نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از یک مدل‌سازی مشترک، عملکرد و کارایی روش‌های کوانتومی و کلاسیک را در مسائل واقعی شبکه‌های پیچیده به صورت منسجم و نظام‌مند ارزیابی کرد.

۲. مدل‌سازی QUBO برای مسائل گراف

مدل‌سازی QUBO به عنوان یکی از مهم‌ترین چارچوب‌های مفهومی در بهینه‌سازی کوانتومی، نقش کلیدی در تبدیل مسائل پیچیده گرافی به مسائل قابل حل توسط الگوریتم‌های کوانتومی ایفا می‌کند. بسیاری از مسائل بنیادی در شبکه‌های پیچیده، از جمله خوشه‌بندی گراف، کشف اجتماع، مسیریابی بهینه، تخصیص منابع و کاهش هزینه در شبکه‌های بزرگ، ماهیتی ترکیبی و غیرخطی دارند که حل آن‌ها با روش‌های کلاسیک اغلب مستلزم صرف زمان محاسباتی بالا است. در این میان، QUBO به عنوان یک زبان مشترک بین سامانه‌های کلاسیک و کوانتومی، امکان بازنمایی یکنواخت این مسائل را فراهم می‌سازد و مسیر را برای بهره‌گیری از توان بالقوه محاسبات کوانتومی هموار می‌کند. در مسائل گرافی، ساختار شبکه شامل گره‌ها و یال‌هایی است که هر کدام می‌توانند دارای وزن، ظرفیت یا محدودیت‌های خاص باشند. چالش اصلی در مدل‌سازی QUBO، نگاشت این ساختار پیچیده به مجموعه‌ای از متغیرهای باینری است، به گونه‌ای که روابط بین گره‌ها و یال‌ها و همچنین اهداف مسئله به صورت ضمنی در تابع بهینه‌سازی منعکس شوند. در این چارچوب، هر تصمیم گرافی مانند انتخاب یک گره، فعال‌سازی یک یال یا عضویت یک گره در یک خوشه، به یک متغیر باینری نسبت داده

می‌شود. این نگاشت ساده در ظاهر، اما عمیق در معنا، سبب می‌شود که تعاملات پیچیده گرافی به صورت جملات جریمه و تشویق در ساختار QUBO بازتاب یابند.

یکی از ویژگی‌های مهم مدل‌سازی QUBO در مسائل گراف، توانایی آن در اعمال محدودیت‌ها بدون استفاده از قیود صریح است. محدودیت‌هایی نظیر جلوگیری از انتخاب هم‌زمان برخی گره‌ها، حفظ پیوستگی گراف، یا تضمین تعادل بار در شبکه، همگی می‌توانند از طریق تنظیم وزن‌های مناسب در مدل QUBO اعمال شوند. این رویکرد، به‌ویژه در محیط‌های کوانتومی، اهمیت بالایی دارد؛ زیرا بسیاری از الگوریتم‌های کوانتومی مبتنی بر توابع هدف بدون قید طراحی شده‌اند و استفاده از محدودیت‌های صریح در آن‌ها امکان‌پذیر نیست. در نتیجه، کیفیت مدل‌سازی QUBO تأثیر مستقیمی بر دقت و پایداری پاسخ نهایی دارد. در کاربردهای عملی، مدل‌سازی QUBO برای مسائل گرافی اغلب نیازمند ایجاد تعادل میان دقت مدل و پیچیدگی محاسباتی است. افزودن بیش‌ازحد جریمه‌ها و وزن‌های بزرگ می‌تواند منجر به افزایش حساسیت مدل و دشواری در همگرایی الگوریتم‌های کوانتومی شود. از سوی دیگر، ساده‌سازی بیش‌ازحد مدل ممکن است باعث نادیده گرفتن برخی قیود مهم شبکه شود. بنابراین، طراحی QUBO یک فرآیند مهندسی دقیق محسوب می‌شود که نیازمند شناخت عمیق از مسئله گرافی و رفتار الگوریتم‌های حل‌کننده است.

در شبکه‌های پیچیده واقعی، مانند شبکه‌های ارتباطی، شبکه‌های انرژی یا شبکه‌های اجتماعی، ناهمگنی گره‌ها و یال‌ها چالش مضاعفی برای مدل‌سازی QUBO ایجاد می‌کند. گراف‌های غیرمتوازن، شبکه‌هایی با درجات بسیار متفاوت یا ساختارهای چندلایه، مستلزم آن هستند که مدل QUBO بتواند اثرات متقابل محلی و جهانی را هم‌زمان در نظر بگیرد. در چنین شرایطی، استفاده از وزن‌دهی تطبیقی و طراحی سلسله‌مراتبی مدل QUBO می‌تواند به بهبود کیفیت پاسخ‌ها کمک کند و از افت کارایی جلوگیری نماید. از منظر پیاده‌سازی، مزیت اصلی QUBO در مسائل گرافی، سازگاری آن با طیف وسیعی از الگوریتم‌های کوانتومی و الهام‌گرفته از کوانتوم است. چه در رویکردهای مبتنی بر آنیلینگ کوانتومی و چه در الگوریتم‌هایی مانند QAOA، وجود یک مدل QUBO استاندارد امکان مقایسه مستقیم روش‌ها و تحلیل عملکرد آن‌ها را فراهم می‌سازد. همچنین، این ویژگی سبب شده است که QUBO به عنوان پلی میان شبیه‌سازی‌های کلاسیک و اجرای واقعی روی سخت‌افزارهای کوانتومی مطرح شود. در نهایت، می‌توان گفت که مدل‌سازی QUBO برای مسائل گراف نه تنها یک گام فنی در مسیر حل مسئله است، بلکه بخشی از فرآیند مفهومی فهم مسئله نیز به‌شمار می‌آید. نحوه تعریف متغیرها، تعاملات و وزن‌ها، در واقع بازتابی از دیدگاه پژوهشگر نسبت به ساختار شبکه و اولویت‌های بهینه‌سازی است. این بخش نشان می‌دهد که موفقیت الگوریتم‌های کوانتومی در بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده، بیش از هر چیز به کیفیت و دقت مدل‌سازی QUBO وابسته است و توسعه روش‌های نظام‌مند برای طراحی این مدل‌ها، یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های آینده در این حوزه خواهد بود.

۳. الگوریتم‌های کوانتومی: QAOA و Annealing

در قالب الگوریتم‌های کوانتومی، QAOA به عنوان یک رویکرد ترکیبی کلاسیک-کوانتومی برای یافتن پاسخ‌های تقریبی مسائل گرافی مطرح است. این الگوریتم با ترکیب یک Hamiltonian مسئله H_C با یک Hamiltonian همگرا H_B پی‌درپی با عمق p اجرا می‌شود تا به پایان، بر اساس پارامترهای زمان-فلانک از طریق بهینه‌سازی کلاسیک تنظیم شود.

در عمل، با شروع از وضعیت همزاتری (uniform superposition)، هر لایه با ضربه‌های شبه-زمانی و اعمال گسسته آن، پاسخ‌های بهینه یا نزدیک بهینه برای مسئله QUBO ارائه می‌شود که در نهایت با استفاده از اندازه‌گیری‌های تکراری مجموعه پاسخ‌ها به دست می‌آید. یکی از کلیدهای موفقیت QAOA، طراحی مناسب Hamiltonian های مسئله و همگرایی بهینه‌سازی است تا سطح خطا و عمق دورها را به حداقل برساند. با این وجود، محدودیت‌های فراوانی وجود دارد که به‌ویژه در نمونه‌های بزرگ یا با پیچیدگی مسائل، به چالش‌هایی چون پایداری در برابر نویز و هزینه اجرای طولانی می‌انجامد.

آنیلینگ کوانتومی نیز به عنوان روشی برای بهینه‌سازی با استفاده از تغییر تدریجی پارامترها ارائه می‌شود. در این روش، با شروع از وضعیتی با انرژی کم و حفظ شکل تابع هدف به مدت زمان، سیستم به طور آرام از حالت اولیه عبور می‌کند تا به کمینه انرژی برسد. مزیت اصلی annealing کوانتومی نسبت به روش‌های کلاسیک در برخی مسائل، احتمال عبور از هم‌انباشتگی‌های محلی و یافتن سطوح پایین تر از انرژی است، هرچند در عمل مسئله، نویز و اندازه‌گیری ناسازگار می‌تواند کارایی را کاهش دهد. مقایسه بین QAOA و annealing کوانتومی با روش‌های کلاسیک مانند روش‌های گرادیان و سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک، نشان می‌دهد که در برخی حوزه‌های خاص با اندازه‌های محدود، هر دو رویکرد کوانتومی می‌توانند به پاسخ‌های با کیفیت بهتر یا برابر با کلاسیک نزدیک شوند، اما در مقیاس‌های بزرگ، هزینه و پایداری به طور شدیدی تغییر می‌کند. در تمامی این رویکردها، طراحی آزمایش‌های دقیق برای ارزیابی عملکرد به‌ویژه در نمونه‌های واقعی، ضروری است تا بتوان با قاطعیت بیشتری درباره جایگاه عملی این فناوری‌ها صحبت کرد. توجه به منابع تجربی Colucci et al (۲۰۲۳) و Paparo et al (۲۰۱۴) نشان می‌دهد که در کاربردهای گراف، نیمه‌کارایی کوانتومی زمانی می‌تواند با اصلاح فرایندها در دستگاه‌ها و بهبود پروتکل‌های آزمایشی بهبود یابد.

۴. روش‌های کلاسیک مرجع

در کنار رویکردهای کوانتومی، تحلیل و استفاده از روش‌های کلاسیک مرجع در بهینه‌سازی گراف از اهمیت بسیاری برخوردار است. این بخش به بررسی رویکردهای کلاسیک مرسوم می‌پردازد که معمولاً در قالب الگوریتم‌های فراابتکاری، گرادیان-محور، الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی به کار می‌روند. برای مسائل گراف، روش‌های کلاسیک مرجع شامل جست‌وجوهای فراگیر مانند الگوریتم‌های گراف-محور، الگوریتم‌های کاهش هزینه با استفاده از ترکیب ماتریس وزن‌ها و تبدیل به MIP یا ILP، همچنین روش‌های تقریبی با کارایی بالا برای اندازه‌های بزرگ است. این روش‌ها معمولاً به دلیل طراحی دقیق تجربی و مهندسی نرم‌افزار، می‌توانند دستاوردهای خوبی ارائه دهند. در مقایسه با رویکردهای کوانتومی، این روش‌ها به‌ویژه از نظر مقیاس‌پذیری و پایداری در برابر نویز، مزیت‌هایی دارند، اما ممکن است در زمینه جست‌وجوهای میانه‌ای یا یافتن پاسخی دقیق با محدودیت‌های زمانی روبه‌رو باشند. برای ارزیابی عمیق، مقایسه بین نتایج این روش‌ها با رویکردهای کوانتومی در نمونه‌های واقعی مانند شبکه‌های بزرگ با گره‌های متعدد و اتصالات پیچیده ضروری است تا تصویری جامع از کارایی حاصل شود. در این بخش، نمونه‌های مرجع از منابع موجود، با

هدف بررسی به‌روزترین روش‌های کلاسیک در قالب کاربردهای گرافی، تحلیل می‌شوند تا نقشی که هر روش در پاسخ به چالش‌های بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده ایفا می‌کند روشن گردد.

۵. طراحی آزمایش‌ها و نتایج تجربی

برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های کوانتومی در زمینه بهینه‌سازی گراف، طراحی آزمایش‌هایی با استفاده از رویکردهای QAOA و annealing، در کنار روش‌های کلاسیک مرجع، ضروری است. این طراحی باید با دقت، مجموعه‌ای از مسائل گرافی با اندازه‌های گوناگون را دربرگیرد تا اثر ابعادی مسئله بر عملکرد به‌خوبی قابل ارزیابی باشد. در این راستا، استفاده از مدل QUBO برای مسائل گرافی باید به‌گونه‌ای انجام شود که محدودیت‌های گراف به‌خوبی نمایان گردد و پارامترهای مسئله همچون وزن‌ها و درجه‌های گراف به‌دقت در نظر گرفته شوند. همچنین، معیارهای ارزیابی شامل کیفیت راه‌حل، نرخ همگرایی، زمان اجرایی و پایداری در برابر نویز است تا بتوان مقایسه‌ای عادلانه بین رویکردها ارائه داد. در نمونه‌های واقعی، معیارهای اضافی مانند مصرف انرژی محاسباتی، هزینه‌های ارتباطی و تأثیر نویز محیطی نیز مدنظر می‌باشد. یافته‌های تجربی نشان می‌دهد که در نمونه‌های کوچک، QAOA با عمق مناسب و بهینه‌سازی کلاسیک پارامترها، می‌تواند به پاسخ‌های بهینه نزدیک شود و در برخی موارد نسبت به روش‌های کلاسیک مرجع برتری نشان دهد. اما با افزایش اندازه مسئله، نرخ همگرایی ممکن است کاهش یابد و رفتار دستگاه‌های کوانتومی در مقابل نویز تأثیرگذارتر شود. در بررسی‌های گرافی با ساختارهای متفاوت، از جمله گراف‌های ناهمگون و با درجه‌های متوسط تا بالا، می‌توان تشدید وابستگی به طراحی تابع هدف و ترکیب پارامترهای دوره‌ای را مشاهده کرد. از منظر مقایسه با روش‌های کلاسیک، برتری‌های خاصی در برخی ایستگاه‌های زمانی و در برخی از سیستم‌های گرافی مشاهده شده است؛ با این حال، معمولاً کلاسیک‌ها در برخی جنبه‌ها از قبیل مقیاس‌پذیری و ثبات از نظر زمان پاسخ، بهتر ظاهر می‌شوند. در نتیجه، طراحی آزمایش‌ها باید به‌طور دقیق مسائل گرافی را با رویکردهای مختلف به‌طور هم‌زمان بسنجد تا بتوان به تحلیل مستندی از کارایی دست یافت. ارزیابی‌های تجربی با استفاده از منابع داده‌شده (Li et al., 2017؛ Yuanyuan & Xiyu, 2018؛ Colucci et al., 2023؛ Njeri, 2023؛ Schulte-Herbrüggen et al., 2005؛ Fan & Paparo et al., 2014؛ Duong et al., 2022؛ Biamonte et al., 2019؛ Han, 2022) انجام می‌شود و با تحلیل کیفی و کمی، نقاط قوت و محدودیت هر رویکرد روشن می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات پژوهشی

در نتیجه‌گیری این مقاله، می‌توان گفت که الگوریتم‌های کوانتومی، به‌ویژه QAOA و annealing کوانتومی، پتانسیل‌هایی برای بهبود کارایی در بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده دارند، اما همواره با چالش‌های مقیاس‌پذیری، نویز و هزینه‌های اجرایی روبه‌رو هستند. از منظر مقایسه با روش‌های کلاسیک مرجع، می‌توان گفت که در نمونه‌های محدود، رویکردهای کوانتومی می‌توانند به پاسخ‌های با کیفیت برابر یا بهتر دست یابند، ولی در نمونه‌های بزرگ، روش‌های کلاسیک مرجع

به دلیل پایداری و کارایی، غالباً عملکرد بهتری دارند. همچنین، طراحی مدل QUBO برای گراف‌های مختلف و تنظیم دقیق پارامترهای مسئله از اهمیت حیاتی برخوردار است تا بتوان اثر هم‌زمانی میان گره‌ها و یال‌ها را به خوبی نمایان کرد. برای پیشبرد پژوهش در این حوزه، پیشنهاد می‌شود که:

۱. بهبود مدل‌سازی QUBO با توجه به گراف‌های ناهمگون و داده‌های واقعی، به طوری که محدودیت‌ها به طور دقیق در قالب تابع هدف نمایان شوند.

۲. توسعه و بهبود استراتژی‌های ترکیبی کوانتومی-کلاسیک برای بهبود همگرایی و کاهش اثر نویز در QAOA و annealing کوانتومی.

۳. طراحی آزمایش‌های مقیاس‌پذیر با نمونه‌های واقعی دارای اندازه‌های متوسط تا بزرگ و با استفاده از متریک‌های جامع برای ارزیابی کارایی از منظر زمان پاسخ و مصرف انرژی.

۴. ایجاد چارچوب‌های ارزیابی کیفی و کمی برای مقایسه دقیق با روش‌های کلاسیک مرجع در زمینه‌های کاربردی مانند شبکه‌های فناوری اطلاعات، شبکه‌های توزیع یا مدل‌های گرافی بزرگ.

منابع

- Parekh, O., Wendt, J., Shulenburger, L., Landahl, A., Moussa, J., & Aidun, J. (2016). Benchmarking adiabatic quantum optimization for complex network analysis. arXiv preprint arXiv:1604.00319.
- Mei, P., Ding, G., Jin, Q., Zhang, F., & Chen, Y. C. (2021). Reconstruction and Optimization of Complex Network Community Structure under Deep Learning and Quantum Ant Colony Optimization Algorithm. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 27(1).
- Li, L., Jiao, L., Zhao, J., Shang, R., & Gong, M. (2017). Quantum-behaved discrete multi-objective particle swarm optimization for complex network clustering. *Pattern Recognition*, 63, 1-14.
- Yuanyuan, M., & Xiyu, L. (2018). Quantum inspired evolutionary algorithm for community detection in complex networks. *Physics Letters A*, 382(34), 2305-2312.
- Colucci, G., van der Linde, S., & Phillipson, F. (2023). Power network optimization: a quantum approach. *IEEE Access*, 11, 98926-98938.
- Njeri, N. (2023). Quantum computing algorithms for solving complex optimization problems. *Journal of Advanced Technology and Systems*, 1(1), 24-34.
- Schulte-Herbrüggen, T., Spörl, A., Khaneja, N., & Glaser, S. J. (2005). Optimal control-based efficient synthesis of building blocks of quantum algorithms: A perspective from network complexity towards time complexity. *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 72(4), 042331.
- Fan, L., & Han, Z. (2022). Hybrid quantum-classical computing for future network optimization. *IEEE Network*, 36(5), 72-76.
- Biamonte, J., Faccin, M., & De Domenico, M. (2019). Complex networks from classical to quantum. *Communications Physics*, 2(1), 53.
- Duong, T. Q., Nguyen, L. D., Narottama, B., Ansere, J. A., Van Huynh, D., & Shin, H. (2022). Quantum-inspired real-time optimization for 6G networks: Opportunities, challenges, and the road ahead. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 1347-1359.

Paparo, G. D., Müller, M., Comellas, F., & Martin-Delgado, M. A. (2014). Quantum Google algorithm: Construction and application to complex networks. *The European Physical Journal Plus*, 129(7), 150.