دانشکده فیزیک

گروه فیزیک نظری و اخترفیزیک

پایان‌نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک نظری

عنوان:

انتقال حالات کوانتومی با استفاده از بیت‌های کلاسیکی با در نظر گرفتن کانال‌های نویزی و شبکه‌های پروانه‌ای

استاد راهنما:

دکتر محمود مهدیان

استاد مشاور:

دکتر رحیمه صوفیانی

پژوهشگر:

مرضیه یحیوی

شهریور ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیتان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای **دکتر محمود مهدیان** که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

معلما مقامت ز عرش برتر باد همیشه توسن اندیشه ات مظفر باد

همچنین از پدر و مادر، برادر و خواهران عزیز، دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم؛ سپاسگزاری می نمایم.

از خانم دکتر رحیمه صوفیانی برای همراهی و مشاوره در به سرانجام رساندن این پایان نامه تشکر می نمایم؛ و نیز جادارد از دکتر تقی بهزادی به خاطر اینکه داوری این پایان نامه را به عهده گرفتند قدردانی نمایم.

مرضیه یحیوی

نام‌خانوادگی دانشجو: یحیوی **نام:** مرضیه

عنوان پایان‌نامه: انتقال حالات کوانتومی با استفاده از بیت‌های کلاسیکی با در نظر گرفتن کانال‌های نویزی و شبکه‌های پروانه‌ای

استاد راهنما: دکتر محمود مهدیان

استاد مشاور: دکتر رحیمه صوفیانی

مقطع: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** نظری **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: فیزیک **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** شهریور ۱۳۹۲ **تعداد صفحه:** ۱۵۵

کلید واژه: انتقال کوانتومی، وفاداری، درهم‌تنیدگی، کوانتوم دیسکورد، شبکه پروانه‌ای

چکیده:

انتقال کوانتومی (ارتباط از راه دور کوانتومی) به طور قابل توجهی ویژگی‌های عجیب جهان کوانتومی را نشان می‌دهد. در این فرآیند به حالت کوانتومی ناشناخته اجازه داده می‌شود که از یک فرستنده (آلیس) به یک گیرنده (باب) انتقال یابد. برای انجام این فرآیند، باید قبلاً بین آلیس و باب یک حالت درهم‌تنیده که تحت عنوان کانال کوانتومی نام برده می‌شود، به اشتراک گذاشته شود.

در این پروژه، به بررسی انتقال حالات کوانتومی توسط کانال‌های مختلف پرداخته‌ایم. این کانال‌ها ممکن است تحت تأثیر نویزهای مختلف قرار گیرد. این نویزها باعث کاهش در میزان موفقیت فرآیند انتقال کوانتومی می‌شود که به بررسی این نویزها پرداخته‌ایم. ما کانال‌های GHZ و W را برای انتقال حالات کوانتومی استفاده کرده‌ایم و نشان داده‌ایم اینکه در حفظ اطلاعات در طی فرآیند انتقال، کدام یک از دو حالت GHZ و W قویتر است، به نوع کانال نویزی وابسته است. ما کلی‌ترین کانال کوانتومی را در نظر گرفته‌ایم و همبستگی‌های کوانتومی موجود در این کانال را بررسی کرده‌ایم و نشان داده‌ایم که تنها زمانی فرآیند انتقال کوانتومی به صورت کامل انجام خواهد گرفت که این کانال دارای ماکسیمم درهم‌تنیدگی باشد. اثرات اندازه‌گیری ضعیف، اندرکنش DM، نویز OU و سرعت مشاهده‌گرها را در فرآیند انتقال بررسی کرده‌ایم و دریافته‌ایم همانطور که همبستگی‌های کوانتومی تحت اثر این عوامل قرار می‌گیرند، فرآیند انتقال هم این ویژگی را حفظ خواهد کرد. بعلاوه، ما به این نتیجه رسیده‌ایم که کوانتوم دیسکورد هم مانند درهم‌تنیدگی می‌تواند در فرآیند انتقال نقش مهمی داشته باشد. همچنین کاربرد انتقال کوانتومی را در شبکه خاصی به نام شبکه پروانه‌ای بررسی کرده‌ایم و در این شبکه نشان داده‌ایم که توسط فرآیند انتقال می‌توانیم همزمان دو حالت کوانتومی را انتقال دهیم و در خروجی آن‌ها را به صورت کراس دریافت کنیم.

فهرست مطالب:

مقدمه ۱

فصل ۱ بررسی منابع ۵

مقدمه ۵

۱-۱ درهم‌تنیدگی کوانتومی ۵

۱-۲ کوانتوم دیسکورد ۶

۱-۳ انتقال حالت کوانتومی تک‌کیوبیتی ۸

۱-۴ انتقال حالت کوانتومی تک کیوبیتی با در نظر گرفتن نویزهای کوانتومی ۱۱

۱-۵ کاربرد انتقال حالات کوانتومی در شبکه پروانه‌ای ۱۲

فصل دوم مبانی و روش‌ها ۱۵

مقدمه ۱۵

۲-۱ مفاهیم اساسی ۱۵

۲-۱-۱ برهم‌نهی کوانتومی ۱۵

۲-۱-۲ مفهوم کیوبیت ۱۶

۲-۱-۳ حالات بل ۱۶

۲-۲ مقایسه سیستم‌های کلاسیکی و کوانتومی با یک مثال ساده ۱۸

۲-۲-۱ حالات کوانتومی خالص و مخلوط ۱۸

۲-۲-۲ راهنمای تشخیص حالات خالص و مخلوط از هم : ۱۸

۲-۲-۴ مثال‌هایی از حالات خالص و مخلوط: ۱۹

۲-۳ انواع همبستگی‌ها ۲۰

۲-۳-۱ درهم‌تنیدگی کوانتومی ۲۳

۲-۳-۲ کوانتوم دیسکورد ۲۵
۲-۴ انتقال کوانتومی ۲۸
۲-۴-۱ مفهوم انتقال کوانتومی ۲۸
۲-۴-۲ مدارهای کوانتومی و گیت های کوانتومی ۳۱
۲-۴-۳ قضیه عدم-شبیه‌سازی ۳۴
۲-۴-۴ انتقال حالت کوانتومی تک کیوبیتی با استفاده از جفت EPR ۳۵
۲-۵ کانال‌های کوانتومی ۳۸
۲-۵-۱ کانال واقطبنده ۳۸
۲-۵-۲ کانال میرایی دامنه ۴۰
۲-۵-۳ کانال میرایی فاز ۴۱
۲-۶ انتقال نویزی حالت کوانتومی تک کیوبیتی توسط حالات GHZ و W ۴۲
۲-۶-۱ اثر کانال میرایی دامنه روی انتقال کوانتومی: ۴۲
۲-۶-۲ اثر کانال میرایی فاز روی انتقال کوانتومی: ۵۵
۲-۷ عملگرهای لیند بلاد: ۶۰
۲-۷-۱ اثر کانال نویزی $(L_{2,z}, L_{3,z}, L_{4,z})$ روی انتقال کوانتومی ۶۰
۲-۷-۲ اثر کانال نویزی $(L_{2,x}, L_{3,x}, L_{4,x})$ روی انتقال کوانتومی ۶۲
۲-۷-۳ اثر کانال نویزی $(L_{2,y}, L_{3,y}, L_{4,y})$ روی انتقال کوانتومی ۶۴
۲-۸ انتقال کوانتومی در شبکه پروانه‌ای ۷۰
فصل سوم نتایج و بحث ۷۸
مقدمه ۷۸
۳-۱ کانال دو کیوبیتی مناسب برای انتقال حالت کوانتومی تک کیوبیتی ۷۸
۳-۲ کانال سه کیوبیتی مناسب برای انتقال حالت کوانتومی تک‌کیوبیتی ۸۶
۳-۳ اثر اندازه‌گیری ضعیف روی انتقال کوانتومی ۹۰

۳-۴ دینامیک همبستگی‌های کوانتومی دو کیوبیتی در مدل XXZ با اندرکنش DM که به محیط نانمارکوی کوپل شده است و بررسی انتقال کوانتومی توسط این کانال ۹۶
۳-۴-۱ مدل و حل آن ۹۷
۳-۴-۲ دینامیک همبستگی‌های کوانتومی ۱۰۲
۳-۴-۳ انتقال حالت کوانتومی تک‌کیوبیتی با استفاده از کانال (۳-۵۱) ۱۰۷
۳-۵ دینامیک همبستگی‌های سیستم سه کیوبیتی تحت محیط نویزی کلاسیکی و بررسی انتقال حالت کوانتومی توسط این کانال ۱۱۰
۳-۵-۱ مدل Ornstein-Uhlenbeck (OU) ۱۱۱
۳-۵-۲ معیار درهم‌تنیدگی ۱۱۳
۳-۵-۳ معیار کوانتوم دیسکورد ۱۱۵
۳-۵-۴ کوانتوم دیسنشن ۱۲۳
۳-۵-۵ انتقال حالت کوانتومی تک کیوبیتی با استفاده از کانال GHZ و W تحت نویز OU ۱۲۸
۳-۶ اثر سرعت مشاهده گرها روی همبستگی کوانتومی دو ذره نسبیتی تحت کانال‌های نویزی و بررسی اثرات آن روی انتقال حالت کوانتومی تک کیوبیتی ۱۳۱
۳-۶-۱ دو ذره نسبیتی ۱۳۲
۳-۶-۲ تحول زمانی همبستگی‌های کوانتومی حالت دو ذره نسبیتی انتقال‌یافته توسط کانال‌های نویزی ۱۳۵
۳-۶-۳ انتقال حالت کوانتومی تک‌کیوبیتی توسط کانال‌های معرفی شده در بخش (۳-۶-۲) ۱۴۰
۳-۷ بررسی اثر کوانتوم دیسکورد روی انتقال کوانتومی ۱۴۲
نتایج و بحث ۱۴۷
پیشنهادات ۱۴۹
پیوست ۱۵۰
منابع: ۱۵۲

فهرست شکل‌ها و نمودارها

شکل (۱-۱): فرایند انتقال حالت کوانتومی تک‌کیوبیتی ۹

شکل (۲-۱) : مؤلفه‌های همبستگی ۲۱

شکل(۲-۲): رابطه بین آنتروپی‌های مختلف ۲۲

شکل (۲-۳): انتقال کوانتومی ۳۰

شکل (۲-۴): انتقال از طریق فکس معمولی ۳۱

شکل(۲-۵): گیت‌های کوانتومی متوالی ۳۴

شکل(۲-۶): گیت‌های کوانتومی موازی ۳۴

شکل (۲-۷): مدار کوانتومی برای انتقال حالت کوانتومی توسط جفت EPR ۳۶

شکل (۲-۸): کانال واقطبنده، کره بلوخ اصلی را از هر طرف منقبض می‌کند. ۴۰

شکل (۲-۹): اثر کانال میرایی دامنه روی کره بلوخ ۴۱

شکل (۲-۱۰): اثر کانال میرایی فاز روی کره بلوخ ۴۱

شکل (۲-۱۱): مدار کوانتومی برای انتقال حالت کوانتومی تک کیوبیتی توسط حالت GHZ ۴۲

شکل (۲-۱۲): مدار کوانتومی برای انتقال حالت کوانتومی ناشناخته توسط حالت W ۴۵

نمودار(۲-۱): میانگین وفاداری کوانتومی با کانال میرایی دامنه به ازای تابعی از مقیاس زمانی برای حالت اول (a)، حالت دوم (b)، حالت سوم (c). ۵۴

نمودار(۲-۲): میانگین وفاداری کوانتومی با کانال میرایی فاز به ازای تابعی از مقیاس زمانی برای حالت اول (a)، حالت دوم (b)، حالت سوم (c). ۵۹

نمودار(۲-۳): میانگین وفاداری کوانتومی به ازای تابعی از مقیاس زمانی برای (L_{2x},L_{3x},L_{4x}) (a)، (L_{2y},L_{3y},L_{4y})(b)، (L_{2z},L_{3z},L_{4z})(c). ۶۸

نمودار(۲-۴): وفاداری کوانتومی به ازای تابعی از θ و φ برای (L_{2x},L_{3x},L_{4x}) (a)، (L_{2y},L_{3y},L_{4y})(b)، (L_{2z},L_{3z},L_{4z})(c). در هر نمودار منحنی آبی حالت GHZ و منحنی قرمز حالت W را نشان می‌دهد. ۶۹

شکل (۲-۱۳): شبکه پروانه‌ای کلاسیکی ۷۱

شکل (۲-۱۴): شکل بالا: مدار کوانتومی برای پیاده‌سازی عملگر جانشین روی کیوبیت اول و ششم. شکل پایین: شبکه پروانه‌ای متناظر با مدار کوانتومی ۷۲

نمودار (۳-۱): وفاداری انتقال وقتی که اندازه گیری روی کیوبیت آلیس یا باب انجام می‌شود..... ۹۴

نمودار (۳-۲): وفاداری انتقال وقتی که اندازه گیری روی هر دو کیوبیت آلیس و باب انجام می‌شود. ۹۶

نمودار (۳-۳): تحول زمانی تابع تلاقی برحسب t برای حالت دو کیوبیتی اولیه $\left|\psi_s(0)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\left|00\right\rangle+\left|11\right\rangle)$ به ازای D_z های مختلف ۱۰۳

نمودار (۳-۴): تحول زمانی QD برحسب t برای حالت دو کیوبیتی اولیه $\left|\psi_s(0)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\left|00\right\rangle+\left|11\right\rangle)$ به ازای D_z های مختلف ۱۰۶

نمودار (۳-۵): تحول زمانی QD برحسب t برای حالت دو کیوبیتی اولیه $\left|\psi_s(0)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\left|00\right\rangle+\left|11\right\rangle)$ به ازای gهای مختلف ۱۰۷

نمودار (۳-۶): تحول زمانی QD برحسب t و T برای حالت دو کیوبیتی اولیه $\left|\psi_s(0)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\left|00\right\rangle+\left|11\right\rangle)$ ۱۰۷

نمودار (۳-۷): وفاداری کوانتومی برحسب t برای حالت دو کیوبیتی اولیه $\left|\psi_s(0)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\left|00\right\rangle+\left|11\right\rangle)$ به ازای D_z های مختلف ۱۰۹

نمودار (۳-۸): وفاداری کوانتومی برحسب t برای حالت دو کیوبیتی اولیه $\left|\psi_s(0)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\left|00\right\rangle+\left|11\right\rangle)$ به ازای gهای مختلف ۱۰۹

نمودار (۳-۹): وفاداری کوانتومی برحسب t برای حالت دو کیوبیتی اولیه $\left|\psi_s(0)\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\left|00\right\rangle+\left|11\right\rangle)$ به ازای Tهای مختلف. ۱۱۰

نمودار (۳-۱۰): درهم تنیدگی برحسب Γt برای حالت GHZ تحت نویز OU. ۱۱۹

نمودار (۳-۱۱): کوانتوم دیسکورد برحسب Γt برای حالت GHZ تحت نویز OU. ۱۱۹

نمودار (۳-۱۲): درهم تنیدگی برحسب Γt برای حالت W تحت نویز OU. ۱۲۲

نمودار (۳-۱۳): کوانتوم دیسکورد برحسب Γt برای حالت W تحت نویز OU. ۱۲۳

نمودار (۳-۱۴): کوانتوم دیسنشن برحسب Γt برای حالت GHZ تحت نویز OU. ۱۲۵

نمودار (۳-۱۵): کوانتوم دیسنشن ($D_1(\rho)$) برحسب Γt برای حالت W تحت نویز OU ۱۲۸

نمودار (۳-۱۶): کوانتوم دیسنشن ($D_2(\rho)$) برحسب Γt برای حالت W تحت نویز OU ۱۲۸

نمودار (۳-۱۷): میانگین وفاداری انتقال حالت کوانتومی تک‌کیوبیتی برحسب Γt توسط کانال GHZ تحت نویز OU ۱۳۰

نمودار (۳-۱۸): میانگین وفاداری انتقال حالت کوانتومی تک‌کیوبیتی برحسب Γt توسط کانال W تحت نویز OU ۱۳۱

نمودار (۳-۱۹): تابع تلاقی برحسب Γt و به ازای سرعت‌های مختلف مشاهده‌گرها برای کانال میرایی دامنه ۱۳۷

نمودار (۳-۲۰): QD برحسب Γt و به ازای سرعت‌های مختلف مشاهده‌گرها برای کانال میرایی دامنه ۱۳۷

نمودار (۳-۲۱): تابع تلاقی برحسب Γt و به ازای سرعت‌های مختلف مشاهده‌گرها برای کانال واقطبیده . ۱۳۹

نمودار (۳-۲۲): QD برحسب Γt و به ازای سرعت‌های مختلف مشاهده‌گرها برای کانال واقطبیده ۱۴۰

نمودار (۳-۲۳): وفاداری کوانتومی برای انتقال برحسب Γt و به ازای سرعت‌های مختلف مشاهده‌گرها توسط کانال میرایی دامنه ۱۴۱

نمودار (۳-۲۴): وفاداری کوانتومی برای انتقال برحسب Γt و به ازای سرعت‌های مختلف مشاهده‌گرها توسط کانال واقطبیده ۱۴۲

نمودار (۳-۲۵): QD برحسب c_3 . ..... ۱۴۵

نمودار (۳-۲۶): وفاداری انتقال کوانتومی برحسب θ و φ به ازای $c_3 = 0$. ۱۴۶

فهرست جدول‌ها

جدول (۲-۱): خلاصه مقادیر وفاداری انتقال (F) و میانگین آن (F_{av}) وقتی که درهم‌تنیدگی توسط کانال میرایی دامنه توزیع شده است. ۵۳

جدول (۲-۲): خلاصه مقادیر وفاداری انتقال (F) و میانگین آن (F_{av}) وقتی که درهم‌تنیدگی توسط کانال میرایی فاز توزیع شده است. ۵۸

جدول (۲-۳): خلاصه مقادیر وفاداری انتقال (F) و میانگین آن (F_{av}) به ازای کانال‌های نویزی X و Y و Z ۶۷

مقدمه

علم اطلاعات کوانتومی، مطالعه براساس این ایده است که اطلاعات به اثرات کوانتومی در فیزیک وابسته باشد. اگرچه بسیاری از نتایج کوانتومی مشابه با نتایج کلاسیکی آن‌ها است، تفاوت‌های قابل توجه زیادی بین آن‌ها وجود دارد. در گذشته تصور می‌شد که مکانیک کوانتومی ابزاری برای تمام فرآیندهای کلاسیکی است. خود اطلاعات به طور وسیعی در عبارات کلاسیکی بیان می‌شد و مکانیک کوانتوم در کمک به طراحی تجهیزات مورد استفاده برای پردازش و کنترل میزان اطلاعات فرستاده‌شده، نقش حمایتی داشت. اما اکنون نظریه اطلاعات کوانتومی و پردازش اطلاعات، علاوه بر مزیت‌های دیگر، در رمزنگاری کوانتومی که باعث امنیت در ارسال اطلاعات می‌شود و نیز امید ساخت کامپیوترهای کوانتومی که به طور چشمگیری حل مسائل ریاضی را تسریع می‌بخشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاهکارهای کوانتومی به خواصی مانند عدم قطعیت، درهم‌تنیدگی و تداخل وابسته است. در سطح بنیادی‌تر، روشن شده است که نظریه اطلاعات براساس اصول کوانتومی، نظریه اطلاعات کلاسیکی را کامل می‌کند، همان‌طور که اعداد مختلط، اعداد حقیقی را کامل می‌کنند. این نظریه شامل تعمیم کوانتومی مفاهیم کلاسیکی مانند منابع، کانال‌ها، کدها، و هم‌چنین تعیین انواع اطلاعات (اطلاعات کلاسیکی و درهم‌تنیدگی کوانتومی) می‌باشد. عملیات کلاسیکی، درهم‌تنیدگی را از بین می‌برد اما عملیات کوانتومی مناسب می‌تواند از درهم‌تنیدگی برای اهداف خاص استفاده کند، بخصوص درهم‌تنیدگی در بالا بردن سرعت محاسبات و کمک در انتقال حالات کوانتومی از یک فرستنده به دریافت‌کننده نقش بسزایی دارد. این پایان‌نامه در موضوع انتقال حالات کوانتومی تدوین شده است.

انتقال کوانتومی[1] که به یک حالت کوانتومی ناشناخته اجازه می‌دهد از یک فرستنده (آلیس[2]) به یک دریافت کننده (باب[3]) انتقال یابد، یک پروتکل اساسی و مهم برای علم اطلاعات کوانتومی محسوب می‌شود. انتقال اطلاعات کوانتومی در ابتدا به صورت یک روشی که چگونه بتوان یک کیوبیت را از یک سیستم A به سیستم دیگر B بدون حرکت یا بدون جریان یافتن اطلاعات موجود در کیوبیت انتقال داد، توسط بنت و همکارانش در سال ۱۹۹۳ [۱] مطرح شد. از آن به بعد، برخی از دانشمندان

1. Quantum teleportation
2. Alice
3. Bob

روی این نکته متمرکز شدند که چرا با وجود آنکه برای شناسایی یک کیوبیت به مقدار بی‌نهایتی از اطلاعات کلاسیکی لازم است، برای انتقال یک کیوبیت تنها دو بیت کلاسیکی کافی است؟ گروه دیگری از فیزیکدانان روی چگونگی انتقال اطلاعات در این فرآیند متمرکز شدند.

آلیس و باب سال‌ها قبل همدیگر را ملاقات کرده‌اند. در این ملاقات یک حالت در هم تنیده را با هم به اشتراک گذاشته‌اند. سپس از هم جدا شده‌اند، حال ماموریت آلیس این است که یک حالت کوانتومی ناشناخته را به باب بفرستد. این حالت حتی برای خود آلیس هم ناشناخته است و قوانین مکانیک کوانتوم هم اجازه شناسایی حالت را به آلیس نمی‌دهد. آلیس حالتی را که قرار است به باب بفرستد، با نصفی از جفت به اشتراک گذاشته شده، اندرکنش می‌دهد و سپس حالت تحت مالکیت خودش را اندازه می‌گیرد، او این اطلاعات را به باب می‌فرستد. بسته به پیام کلاسیکی آلیس، باب یکی از معیارهای کوانتومی (X، Z و یا I) را روی نیمی از جفت به اشتراک گذاشته‌شده که در مالکیت خودش است، تشکیل می‌دهد. با انجام این کار او می تواند حالت مورد نظر را به دست آورد. در طی این فرایند ممکن است نویزهای مختلفی روی انتقال حالت کوانتومی تاثیر بگذارد. کمیت وفاداری[1] معرفی می‌شود. این کمیت مقدار اطلاعاتی را اندازه می‌گیرد که در طی این فرایند ثابت مانده است یا به عبارت بهتر میزان نزدیکی حالتی که قصد انتقال آن را داشتیم و حالتی که در این فرایند در نهایت بدست آمده است. ما در این پایان‌نامه اثر نویزهای مختلف را در فرآیند انتقال بررسی خواهیم کرد. همچنین کاربرد فرایند انتقال کوانتومی را در شبکه بررسی خواهیم کرد. در شبکه، چندین حالت کوانتومی به طور همزمان انتقال می‌یابند. در این شبکه‌ها ممکن است با این مشکل مواجه شویم که ظرفیت در بعضی مناطق کمتر از مقدار لازم برای انجام کامل پروتکل باشد. شبکه‌های خاصی به نام شبکه پروانه‌ای را بررسی می‌کنیم. در این شبکه‌ها چندین حالت کوانتومی، به طور همزمان انتقال می‌یابند و در انتها خروجی ها به صورت کراس دریافت می‌شوند.

ما پایان‌نامه را در سه فصل کلی زیر تدوین کرده‌ایم:

- فصل اول (بررسی منابع)
- فصل دوم (مبانی و روش‌ها)
- فصل سوم (نتایج و بحث)

در فصل اول به بررسی منابع و تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال اطلاعات کوانتومی می‌پردازیم.

1. Fidelity

در فصل دوم به بررسی مبانی مورد نیاز برای فرآیند انتقال کوانتومی و شرایط لازم برای اینکه فرایند انتقال به طور کامل انجام شود، خواهیم پرداخت.

و بالاخره در فصل سوم نتایج پایان‌نامه را بررسی خواهیم کرد.

فصل اول:

بررسی منابع

فصل ۱ بررسی منابع

مقدمه

در این فصل به معرفی بررسی‌های انجام شده در زمینه انتقال حالات کوانتومی می‌پردازیم که شامل مقالات چاپ شده یا کتاب می‌باشد. در این بررسی‌ها از کانال‌های نویزی مختلف برای انتقال حالات کوانتومی استفاده شده است و میزان موفقیت هر کانال در انتقال کوانتومی را محاسبه نموده‌اند. از طرفی چون برای فرآیند انتقال کوانتومی، همبستگی‌های کوانتومی مانند درهم‌تنیدگی کوانتومی و کوانتوم دیسکورد[1] لازم است، بنابراین در ابتدا چند منبع در مورد همبستگی‌های کوانتومی معرفی می‌کنیم.

۱-۱ درهم‌تنیدگی کوانتومی

تعیین همبستگی‌های کوانتومی نقش مهمی در توسعه علم اطلاعات کوانتومی دارد. درهم‌تنیدگی کوانتومی به عنوان یک نوع از این همبستگی‌ها، یکی از اصول اساسی فیزیک کوانتوم است که در ابتدا توسط انیشتین، پودولسکی، روزن[2][۲] و شرودینگر[3] [۳] به عنوان یک پدیده عجیب در مکانیک کوانتوم مطرح شد. با ظهور نظریه اطلاعات کوانتومی، درهم‌تنیدگی به عنوان یک منبعی که قادر به انجام اموری مانند رمزنگاری کوانتومی[4] [۴]، انتقال کوانتومی و ... باشد، به رسمیت شناخته شد. رمزنگاری قسمتی از نظریه اطلاعات است و امروزه به عنوان سیستمی تعریف می‌شود که به حدی پیچیده است که برای کسانی که می‌خواهند به آن دسترسی داشته باشند، غیرقابل استفاده است. انتقال کوانتومی هم که موضوع این پایان‌نامه است، به انتقال حالات کوانتومی از یک فرستنده به یک گیرنده می‌پردازد.

درهم‌تنیدگی برای توصیف حالتی به‌کار می‌رود که در آن ذرات می‌توانند با هم ارتباط داشته باشند حتی اگر از هم خیلی دور باشند. ذراتی مثل فوتون‌ها، الکترون‌ها یا کیوبیت‌ها که با همدیگر

1. Quantum discord
2. Einstein, Podolsky, Rosen
3. Schrödinger
4. Quantum cryptography

تعامل دارند، می‌توانند با همدیگر درهم‌تنیده باشند. دانستن اسپین یکی از ذرات درهم‌تنیده، (اینکه اسپین آن رو به پایین است یا رو به بالا) به ما اجازه می‌دهد که بدانیم اسپین همبسته‌اش در جهت مخالف است. نکته شگفت‌انگیزتر در این مورد این است که به علت پدیده برهم‌نهی[۱]، قبل از اندازه‌گیری، ذره هیچ جهت مرجحی ندارد بلکه به‌طور همزمان در هر دو حالت اسپینی بالا و پایین قرار دارد. حالت اسپین ذره اندازه‌گیری‌شده در زمان اندازه‌گیری به ذره همبسته‌اش تعیین و ابلاغ می‌کند که به‌طور همزمان در جهت مخالف اسپین ذره اندازه‌گیری‌شده قرار بگیرد. درهم‌تنیدگی کوانتومی به کیوبیت‌ها اجازه می‌دهد در حالیکه با فاصله باورنکردنی از هم دور هستند، بصورت آنی با هم ارتباط داشته باشند. مهم نیست که فاصله بین ذرات چقدر بزرگ است، آنها تا زمانی که از محیط اطراف ایزوله هستند، درهم‌تنیده باقی می‌مانند.

درهم‌تنیدگی یک پدیده واقعی است (انیشتین آن را عمل شبح‌وار در فاصله[۲] نامیده است.) که بارها و بارها توسط آزمایشات نشان داده شده است. در سال ۱۹۹۷ نیکلاس گیسین[۳] و همکارانش در دانشگاه ژنو از فوتون‌های درهم‌تنیده برای فعال کردن ارتباطات با فاصله بیش از هفت مایلی استفاده کردند.

این سؤال که آیا حالت کوانتومی داده شده، درهم‌تنیده است یا جداپذیر، یک چالش عمده در میان دانشمندان است. یکی از مؤثرترین شرایط درهم‌تنیدگی بر پایه شرط PPT[۴] است و آن به این صورت است که اگر ترانهاد جزئی[۵] یک حالت کوانتومی، یک ویژه مقدار منفی داشته باشد، آنگاه حالت کوانتومی درهم‌تنیده است. شرط PPT یک شرط لازم و کافی برای سیستم‌های کوچک (کیوبیت-کیوبیت یا کیوبیت-کیوتریت) است در حالیکه برای سیستم‌های بزرگتر شرط PPT همه حالات درهم‌تنیده را نمی‌تواند شناسایی کند و باید از شرایط دیگر درهم‌تنیدگی استفاده کرد [۵،۶،۷].

۱-۲ کوانتوم دیسکورد

برای یک سیستم کوانتومی دوقسمتی[۶]، مهم است که بدانیم آیا حالت موردنظر درهم‌تنیده، جداپذیر یا دارای همبستگی کلاسیکی و یا همبستگی کوانتومی است. تلاش‌های زیادی در تقسیم حالات کوانتومی به حالات جداپذیر و درهم‌تنیده انجام شده است که نمونه‌ای از آنها در بخش قبل

1. Superposition
2. Spooky action at a distance
3. Nicholas Gisin
4. Positivity of the Partial Transpose
5. Partial transpose
6. Bipartite quantum system

معرفی شد. درهم‌تنیدگی تنها نوع همبستگی مفید برای تکنولوژی کوانتومی نیست. برخی همبستگی‌های کوانتومی غیر از درهم‌تنیدگی وجود دارند که مزیت‌های زیادی دارند. برای مثال، به‌صورت نظری [۸،۱۰،۹] و بعداً به‌صورت تجربی [۱۱] نشان دادند که برخی حالات جداپذیر نیز ممکن است امور خاصی را بیش از همتایان کلاسیکی خود سرعت ببخشند. بنابراین بهتر است که همبستگی‌های کوانتومی به طور گسترده‌تر بررسی، توصیف و تعیین شوند. در نظریه اطلاعات کوانتومی، کوانتوم دیسکورد یک معیاری از همبستگی‌های غیرکلاسیکی بین دو زیرسیستم یک سیستم کوانتومی است. کوانتوم دیسکورد توسط الیویر و زیرک[1] [۱۲] و به طور مستقل توسط هندرسون و ودرال[2] [۱۳] معرفی شد. الیویر و زیرک از آن به عنوان کوانتومی بودن همبستگی‌ها یاد کردند. از کار این دو گروه تحقیق این نتیجه گرفته شد که همبستگی‌های کوانتومی می‌تواند در برخی از حالات جداپذیر وجود داشته باشد. به عبارت بهتر، جداپذیری به تنهایی به غیاب اثرات کوانتومی اشاره نمی‌کند. بنابراین مفهوم کوانتوم دیسکورد فراتر از تمایزی است که در اوایل بین حالات کوانتومی درهم‌تنیده و حالات جداپذیر(نا-درهم‌تنیده) بیان می‌شد.

یک حالت کوانتومی دوقسمتی، شامل هردوی همبستگی کلاسیکی و کوانتومی می‌باشد. این همبستگی‌ها به طور مشترک توسط « اطلاعات متقابل کوانتومی[3]» تعیین می‌شود. در حالت خاص اگر ρ^{AB} بیانگر ماتریس چگالی یک سیستم دوقسمتی مرکب AB، ρ^{A} و ρ^{B} ماتریس‌های چگالی زیرسیستم‌های این سیستم باشند، آنگاه اطلاعات متقابل کوانتومی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I(\rho^{AB})=S(\rho^{A})+S(\rho^{B})-S(\rho^{AB})$$

که $S(\rho)=-tr(\rho Log_2\rho)$ آنتروپی وان‌نویمن است. اطلاعات متقابل کوانتومی می‌تواند به‌صورت جمع همبستگی کلاسیکی $C(\rho^{AB})$ و همبستگی‌های کوانتومی $Q(\rho^{AB})$ نوشته شود: $I(\rho^{AB})=C(\rho^{AB})+Q(\rho^{AB})$. بخش کوانتومی، کوانتوم دیسکورد نامیده می‌شود و چون حالات جداپذیر(بدون درهم‌تنیدگی) می‌توانند کوانتوم دیسکورد مخالف صفر داشته باشند، این نوع از همبستگی کوانتومی متفاوت از درهم‌تنیدگی کوانتومی است. محاسبه کوانتوم دیسکورد مشکل است و تاکنون توانسته‌اند فقط برای موارد خاصی از ماتریس‌های چگالی این نوع همبستگی را بدست آورند [۱۴،۱۵].

1. Ollivier and Wojciech H. Zurek
2. L. Henderson and Vlatko Vedral
3. Quantum mutual information