دانشکده : فیزیک
گروه : ذرات بنیادی

پایان نامه کارشناسی ارشد

درهم تنیدگی و ناموضعیت

معصومه ولی پور

استاد راهنما :
دکتر حسین موحدیان

بهمن ماه ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده : فیزیک
گروه : ذرات بنیادی

درهم تنیدگی و ناموضعیت

دانشجو : معصومه ولی پور

استاد راهنما :
دکتر حسین موحدیان

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
بهمن ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : فیزیک

گروه : ذرات بنیادی

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم معصومه ولی پور

تحت عنوان:

درهم تنیدگی و ناموضعیت

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : دکتر حسین موحدیان		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

تقدیم به پدر و مادرم که به من فرصت دادند تا بیاموزم.

و تقدیم به تمام کسانی که به من آموختند.

آفریننده گیتی خداوند سبحان را سپاس.

قادر متعال را که قدرت عطا کرد تا در سایه الطاف بی دریغش توان به سرانجام رساندن این دوره تحصیلی را بیابم شاکرم. امید است آنچه که تحت عنوان پایان نامه ارائه گردیده است، آغازگر پویایی اندیشه هایی گردد که در رشد و تکاپوی علمی کشور مؤثر واقع شوند.

از استاد بزرگوار، جناب آقای دکتر حسین موحدیان که با راهنمایی ها و همراهی های ارزشمند خود مرا یاری نمودند، بسیار سپاسگزارم.

همچنین از کلیه اساتید محترم، آقایان دکتر ایزدی فرد ریاست محترم دانشکده، دکتر رجبی ودکتر بی‌تقصیر که درطی این دوره توفیق بهره مندی از توان علمی ایشان را داشتم، متشکرم.

از کلیه دوستانی که در طی این دوره مرا یاری نمودند نیز سپاسگزارم. در پایان بر خود واجب می دانم از خانواده محترم که با صبر و حوصله، در طول این مدت مرا همراهی نمودند و سختی ها و دشواریهای زیادی را متحمل شدند تشکرنمایم.

معصومه ولی پور

بهمن ماه ۱۳۸۸

چکیده

اساس و پایه‌ی ناموضعیت برای یک سیستم کوانتومی مرکب، حالات درهم تنیده است. با داشتن یک حالت درهم تنیده، می‌توانیم کارهایی را در مکانیک کوانتومی انجام دهیم که به صورت کلاسیکی انجام دادن آنها پیچیده یا غیرممکن خواهد بود. در مکانیک کوانتومی امکان تشخیص دادن حالات نامتعامدِ ناشناخته وجود ندارد و هم چنین کپی کردن چنین حالاتی امکان‌پذیر نیست. اما این گونه رفتارها در مکانیک کلاسیک دیده نمی‌شود. از این رو چنانچه یک سیستم کوانتومی را بر حسب چندین حالت درهم ناتنیده‌ی متعامد آماده کنیم، آن‌گاه سیستم کوانتومی می‌تواند به صورت کلاسیکی رفتار نماید و هیچ گونه رفتار ناموضعی از خود نشان ندهد [۱،۲]. به عبارتی می‌بایستی این حالات درهم ناتنیده‌ی متعامد از سیستم کوانتومی را بتوانیم بر اساس عملکردهای موضعی و ارتباطات کلاسیکی تشخیص دهیم و همچنین امکان کپی کردن آنها وجود داشته باشد. در این پایان نامه برای یک سیستم کوانتومی مرکب دو قسمتی، با حضور دو مشاهده‌گر آلیس و باب، آنسامبلی از ۱۶ حالت درهم ناتنیده‌ی متعامدی را در فضای هیلبرت ۴×۴ بدست می‌آوریم که این حالات دو به دو بر هم متعامد و چنانچه توسط آلیس یا باب به تنهایی مشاهده بشوند، دیگر متعامد نخواهند بود. با انجام محاسبات ریاضی و کوانتومی برای این آنسامبل از حالات، می‌توانیم معیارهای کمی، مانند اطلاعات متقابل قابل حصول، آنتروپی تولید شده به هنگام آماده سازی و اندازه گیریِ حالات و کمیت " آگاهی از اندازه گیری " را به خوبی محاسبه کنیم که هرکدام به نوعی، رفتار جدیدی از ناموضعیت را نشان می‌دهند. سپس با مقایسه کردن نتایج بدست آمده از این آنسامبل با نتایج مربوط به آنسامبل ۹ حالتی (حالات درهم ناتنیده در فضای هیلبرت ۳×۳) [۲۴]، می‌توان نتیجه گرفت که در مورد آنسامبل حالات در فضای هیلبرت بزرگتر، نتایج بهتری به همراه احتمال مؤفقیت بیشتر نسبت به آنسامبل حالات در فضای هیلبرت کوچکتر، بدست خواهد آمد. از این رو پیشنهاد می‌کنیم که اگر فضای هیلبرتی که آلیس و باب در آن قرار می‌گیرند را بزرگتر از حالت قبلی در نظر بگیریم، به نتایج بهتری دست پیدا خواهیم کرد که می‌توانند از هر لحاظ بهینه تر از نتایج قبلی باشند.

کلمات کلیدی: ناموضعیت کوانتومی، درهم تنیدگی کوانتومی، حالات درهم ناتنیده، اطلاعات متقابل بدست آمدنی، آنتروپی حاصل از آماده سازی و اندازه گیری حالات، آگاهی از اندازه گیری.

فهرست مطالب

چکیده ..... ز
فهرست مطالب ..... ح
فهرست اشکال ..... ک
فهرست جداول ..... م.

فصل اول : مقدمه‌ای بر محاسبات کوانتومی

۱-۱مقدمه ۲
۱-۲ گیتهای منطقی کلاسیکی ۴
۱-۲-۱ گیتهای تک ورودی ۴
۱-۲-۲ گیتهای دو ورودی ۵
۱-۳ اصل لاندؤر ۷
۱-۴ محاسبات برگشت پذیر ۸
۱-۴-۱ گیت برگشت پذیر *Toffoli* ۹
۱-۵ گیتهای کوانتومی ۱۰
۱-۵-۱ گیتهای تک کیوبیتی ۱۱
۱-۵-۲ گیتهای دو کیوبیتی ۱۳
۱-۶ قضیه‌ی *No- Cloning* ۱۴
۱-۷ نمودار مدارهای اصلی کوانتومی ۱۶

فصل دوم : ماتریس چگالی و نظریه‌ی کوانتومی فرایند اندازه گیری

۲-۱ مقدمه ۱۹
۲-۲ عملگر چگالی ۲۰
۲-۲-۱ عملگر چگالی برای یک حالت خالص ۲۲
۲-۲-۲ عملگر چگالی برای یک حالت آمیخته ۲۴
۲-۳ عملگرهای *Kraus* ۲۶
۲-۴ کانالهای کوانتومی ۲۷
۲-۵ کانالهای کلاسیکی ۲۸
۲-۶ نظریه‌ی اندازه گیری کوانتومی ۲۹
۲-۷ عملکردهای کوانتومی و اَبَرعملگرها ۳۱
۲-۸ تمییز پذیر بودن حالات کوانتومی و فرایند اندازه گیری ۳۴

۲-۹ اندازه گیری‌های تصویری..... ۳۵
۲-۱۰ اندازه گیری‌های $POVM$ ۳۸
۲-۱۱ اندازه گیری های ضعیف و قوی..... ۴۱

فصل سوم : درهم تنیدگی کوانتومی

۳-۱ مقدمه..... ۴۳
۳-۲ سیستمهای دو قسمتی و پایه‌های بِل..... ۴۴
۳-۳ اندازه گیری‌های همبستگی اسپین و نامساوی بِل..... ۴۶
۳-۳-۱ همبستگی در حالتهای یگانه‌ی اسپینی..... ۴۶
۳-۳-۲ اصل موضعیت اینشتین و نامساوی بِل..... ۵۰
۳-۴ مدل ریاضی درهم تنیدگی کوانتومی..... ۵۳
۳-۵ ناموضعیت و درهم تنیدگی حالات کوانتومی..... ۵۶
۳-۶ ضریب اطمینان درهم تنیدگی..... ۵۸
۳-۷ تجزیه‌ی اشمیت..... ۵۸
۳-۸ خالص سازی درهم تنیدگی..... ۶۰
۳-۹ تابع آنتروپی و درهم تنیدگی کوانتومی..... ۶۱
۳-۱۰ کاربردهای درهم تنیدگی..... ۶۴
۳-۱۰-۱ فرابرد کوانتومی..... ۶۴

فصل چهارم : ناموضعیت کوانتومی بدون درهم تنیدگی

۴-۱ مقدمه..... ۷۱
۴-۲ اجرا نشدن اَبَرعملگر تفکیک پذیر با عملکردهای دو موضعی..... ۷۲
۴-۳ تحلیل نظری - اطلاعاتی از پروتکل اندازه گیری دو مرحله‌ای..... ۸۱
۴-۴ بهینه کردن اندازه گیری‌های موضعی..... ۹۳
۴-۵ درک اَبَرعملگر تفکیک‌پذیر به همراه کیوبیتهای تسهیم شده..... ۱۰۱
۴-۶ ارتباط ترمودینامیک با اندازه گیری های موضعی..... ۱۰۴
۴-۶-۱ اندازه گیری حالات به صورت برگشت ناپذیر..... ۱۰۴
۴-۶-۲ فراهم سازی حالات به صورت برگشت ناپذیر..... ۱۰۸
۴-۷ و اما آنسامبل پیشنهادی..... ۱۱۵
۴-۸ نتیجه گیری و بحث..... ۱۳۳

پیوست الف..... ۱۳۵
پیوست ب ۱۴۳
منابع..... ۱۴۶

فهرست اشکال

فصل اول

شکل (۱-۱) : مدار کلاسیکی برای کپی کردن بیت نا شناخته‌ی x ۱۵
شکل (۱-۲) : نمایش نموداری مدارهای کوانتومی عملگرهای پاؤلی و عملکرد آن‌ها ۱۷
شکل (۱-۳) : گیت هادامارد و عملکرد آن ۱۷
شکل (۱-۴) : نمایش فرایند اندازه گیری در یک مدار کوانتومی ۱۷

فصل دوم

شکل (۲-۱) : نمایشی از عملگرهای *Kraus* و عملکردهای کوانتومی ۲۶
شکل (۲-۲) : کانال کلاسیکی متقارن ۲۸
شکل (۲-۳) : تمامی اعمالی که آلیس روی سیستم خود انجام می‌دهد با یک نگاشت مثبت قابل بیان است ۳۳

فصل سوم

شکل (۳-۱) : مدار کوانتومی بوجود آورنده‌ی حالت بِل ۵۳
شکل (۳-۲) : مراحل انجام پروتکل فرابرد کوانتومی ۶۵
شکل (۳-۳) : آلیس روی کیوبیتهای A و B ، یک اندازه گیری بِل را خلق می‌کند و باب را از راه کلاسیکی (تلفن) باخبر می‌سازد. ۶۵

فصل چهارم

شکل (۴-۱) : نمایش دومینوای از آنسامبلی با ۹ حالت درهم ناتنیده‌ی متعامد ۷۴
شکل (۴-۲) : مقایسه‌ی واحدهای اندازه گیری اطلاعات : بیت، تریت، بَن و... ..... ۸۲
شکل (۴-۳) : نمودار آنتروپی شانن بر حسب احتمال ۸۴
شکل (۴-۴) : نمایش دو مینوای از آنسامبلِ ۹ حالتی، بدون در نظر گرفتن حالت $\psi_۴$ ۹۵
شکل (۴-۵) : نمایش درختی (فرکتالی) از مراحل پروتکل اندازه گیری برای تشخیص حالات (بدون حالت $\psi_۴$) ۹۵

شکل (۴-۶) : نمایش بهینه‌ای از شکل (۴-۵) که به همراه ارتباطات کوانتومی از آلیس به باب است. ۱۰۲
شکل (۴-۷) : نمایش دومینوای از چهار حالتی که توسط آلیس و باب به صورت موضعی و برگشت پذیر آماده می‌شوند. ۱۰۹
شکل (۴-۸) : نمایش دومینوای از ۱۶ حالت درهم ناتنیده‌ی متعامد ۱۱۶
شکل (۴-۹) : نمایش دومینوای از اندازه گیری آنسامبل ۱۶ حالتی برای زمانی که $p(\phi_{\varepsilon})=$ ۰ و $p(\phi_{۱۲})=$ ۰ می باشد. (خطوط خط-چین نشان دهنده‌ی اندازه گیری فون نیومن و خطوط خط-چین و نقطه، اندازه گیری در پایه های چرخش داده شده می‌باشد و همچنین اعداد پررنگ، مراحل اندازه گیری را نشان می‌دهند.) ۱۲۹
شکل (۴-۱۰): نمایش درختی از اندازه گیری آنسامبل ۱۶ حالتی (البته زمانی که $p(\phi_{\varepsilon})=$ ۰ و $p(\phi_{۱۲})=$ ۰) ۱۳۰
شکل (۴-۱۱) : نمایش درختی از آنسامبل ۱۶ حالتی به همراه گذار کوانتومی (زمانی که احتمال بوجود آمدن تمامی حالات است.) ۱۳۱

فهرست جداول

فصل اول

جدول (۱-۱) : جدول دوارزشی گیتهای *AND* ، *OR* و *XOR* ۶
جدول (۱-۲) : جدول دوارزشی گیت *Toffoli* ۱۰

فصل سوم

جدول (۳-۱) : همبستگی اندازه گیری‌های اسپین ۴۹
جدول (۳-۲) : هماهنگی مؤلفه‌های اسپینی در نظریه‌های جایگزین ۵۲

فصل چهارم

جدول (۴-۱) : معیارهای گوناگون برای سنجیدن ناموضعیت ۱۱۴
جدول (۴-۲) : مقایسه‌ی کسری اطلاعات متقابل بدست آمدنی برای دو آنسامبل ۹ و ۱۶ حالتی... ۱۲۶
جدول (۴-۳) : مقایسه‌ی آنتروپی آماده سازی و اندازه‌گیری برای دو آنسامبل ۹ و ۱۶ حالتی ۱۲۸

فصل ۱:
مقدمه‌ای بر محاسبات کوانتومی

- مقدمه
- گیت‌های منطقی کلاسیکی
- اصل لاندؤر
- محاسبات برگشت پذیر
- گیت‌های کوانتومی
- قضیه‌ی *No-Cloning*
- نمودار مدارهای اصلی کوانتومی

۱-۱ مقدمه

رایانه تنها بخشی از دنیایی است که ما آنرا دنیای دیجیتالی می‌نامیم. پردازش ماشینی اطلاعات، در هر شکلی بر مبنای دیجیتال و محاسبات کلاسیک انجام می‌شود. اما کمتر از یک دهه است که روش بهتر و قدرتمندتر دیگری برای پردازش اطلاعات پیش روی ما قرار گرفته که بر اساس مکانیک کوانتومی می‌باشد. این روش جدید با ویژگی‌هایی همراه است که آن را از محاسبات کلاسیک بسیار متمایز می‌سازد. اگر چه محاسبات دانشی است که اساس تولد آن ریاضیات می‌باشد، اما رایانه‌ها سیستم‌های فیزیکی هستند و فیزیک در آینده این دانش نقش تعیین کننده‌ای خواهد داشت. البته وجود تفاوت بین این دو به معنای حذف یکی و جایگزینی دیگری نیست. به قول « نیلس بور » گاهی ممکن است خلاف یک حقیقت انکارناپذیری منجر به حقیقت انکارناپذیر دیگری شود. بنابراین محاسبات کوانتومی را به عنوان یک زمینه و روش جدید و بسیار کارآمد در نظر می‌گیریم. وجود چند پدیده‌ی مهم که مختص فیزیک کوانتومی است، آن را از دنیای کلاسیک جدا می‌سازد. این پدیده‌ها عبارتند از : برهم نهی[۱]، تداخل[۲]، درهم تنیدگی[۳]، عدم موجبیت [۴]، ناموضعیت و تکثیر ناپذیری[۵] [۱،۲].
در این جا بهتر است واحد اطلاعات کوانتومی را معرفی کنیم. هر سیستم محاسباتی دارای یک پایه‌ی اطلاعاتی است که نماینده کوچکترین میزان اطلاعات قابل نمایش است. در محاسبات کلاسیک این واحد ساختاری را بیت می‌نامیم که گزیده‌ی واژه‌ی « عدد دودویی » است، زیرا می‌تواند تنها یکی از دو رقم مجاز ۰ و ۱ را در خود نگه دارد. هم چنین در محاسبات کوانتومی، پایه‌ای معرفی می‌شود که آن را کیوبیت یا بیت کوانتومی می‌نامیم. اما این تعریف کیوبیت نیست و باید آن را همراه با مفهوم و نمونه‌های واقعی و فیزیکی درک کرد. در ضمن فراموش نمی‌کنیم که کیوبیت‌ها سیستم‌های فیزیکی

[۱] Superposition
[۲] Interference
[۳] Entanglement
[۴] Non Determinism
[۵] Non Locality & Non Clonability

هستند، نه مفاهیم انتزاعی و اگر هم برای توصیف آن‌ها از ریاضیات کمک می‌گیریم، تنها به دلیل ماهیت کوانتومی آن‌ها است.

در فیزیک کلاسیک برای نگه داری یک بیت، از حالت یک سیستم فیزیکی استفاده می‌شود. در سیستم‌های کلاسیکی اولیه (رایانه های مکانیکی) از موقعیت مکانی دندانه‌های چرخ دنده برای نمایش اطلاعات استفاده می‌شد. از زمانی که حساب دودویی برای محاسبات پیشنهاد شد، از بین تمام کاندیداها، سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی برای این کار انتخاب شدند. به این شکل، هر بیت کلاسیکی، یک مدار الکتریکی است که یا در آن جریان وجود دارد یا ندارد.

از طرفی هر بیت کوانتومی یا کیوبیت عبارت است از یک سیستم دودویی که می‌تواند دو حالت مجزا داشته باشد. به عبارت کلی‌تر، کیوبیت یک سیستم دو بعدی کوانتومی با دو پایه به شکل $|0\rangle$ و $|1\rangle$ است. البته نمایش پایه‌ها یکتا نیست. اولین کاندید برای نمایش کیوبیت استفاده از مفهوم اسپین است که معمولاً برای آن، اتم هیدروژن به کار می‌رود. علاوه بر اسپین، از وضع قطبش یک پرتو فوتونی و نیز سطوح انرژی مجزای یک اتم دلخواه نیز می‌توان به عنوان سیستم کیوبیتی استفاده کرد.

مهمترین تفاوت بیت و کیوبیت این می‌باشد که هرگاه بخواهیم، می‌توانیم مقدار یک بیت را تعیین کنیم، اما این کار را در مورد یک کیوبیت نمی‌توان انجام داد و حاصل اندازه گیری یک کیوبیت با احتمال بدست می‌آید.

یک رایانه کوانتومی به کمک اصل برهم نهی، این امکان را می‌یابد که مانند یک رایانه کلاسیکی بسیار پر قدرت عمل کند که در یک لحظه روی چندین مسیر، اطلاعاتی را پردازش می‌کند. البته مشاهده و متمایز کردن تک تک این محاسبه‌گرهای کوانتومی غیرممکن است. بنابراین با طراحی زیرکانه‌ی الگوریتم‌ها و تدابیر کوانتومی در رایانه‌های کوانتومی قادر به حل کردن مسائلی خواهیم بود که در غیر این صورت بسیار مشکل خواهند بود. ورود به دنیای محاسبات کوانتومی نیازمند دو پیش فرض مهم است. اولاً باید اصول اساسی و برخی تعابیر مکانیک کوانتومی را به طور دقیق بررسی کرد و ثانیاً مفهوم اطلاعات در فیزیک، چه به صورت کلاسیک و چه در معنای کوانتومیِ آن باید درک شود [۳].

در این فصل مفاهیم هم ارز مدارها و گیتهای منطقی را در یک رایانه کوانتومی معرفی خواهیم کرد. در ابتدا نگاهی مختصر به گیتهای منطقی کلاسیکی داریم.

۱-۲ گیتهای منطقی کلاسیکی

محاسبات کلاسیکی شامل پردازش یا تبدیلات اطلاعات نمایش داده شده توسط بیتهای کلاسیکی می‌شوند. واحدهای اصلی و مقدماتی که بیتهای کلاسیکی را پردازش می‌کنند، گیت[۱] نامیده می‌شوند. پردازشگرهای استفاده شده در رایانه‌های مدرن الکترونیکی از صدها شاید هزارها میلیون گیت استفاده می‌کنند [۴]. به عبارتی می‌توان گفت :

- هدف اصلی یک گیت منطقی کلاسیکی تحریف کردن یا پردازش کردن اطلاعات در سطح بیت می‌باشد.

گیتهای کلاسیکی در مدارهای الکتریکی بر اساس تعداد بیتهای ورودی به صورت زیر دسته بندی می‌شوند:

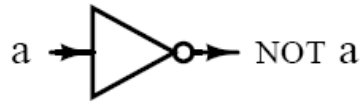
۱-۲-۱ گیتهای تک ورودی

الف) **گیت *NOT*** : این گیت به آسانی مقدار بیت ورودی را از ۰ به ۱ و بالعکس تغییر می‌دهد.

به زبان ریاضی : $a \oplus NOTa = ۱$

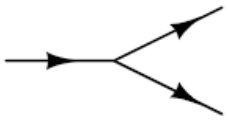
به عنوان مثال : $NOT\ ۰ = ۱ \oplus ۰ = \mathrm{mod}(\frac{۱ + ۰}{۲}) = ۱$

که نماد $\oplus$ نشان دهنده‌ی جمع به پیمانه‌ی ۲ می‌باشد.



[۱] Gate

ب) **گیت *FANOUT* (کپی)** : این گیت به آسانی، یک بیت ورودی را می‌پذیرد و سپس دو بیت خروجی را منشعب می‌شود که مشابه بیت ورودی هستند.



ج) **گیت *ERASE*** : این گیت اثر بیت ورودی را با مقدار ۰ از بین می‌برد و یا با مقدار صفر جـایگزین می‌کند.

۱-۲-۲ گیتهای دو ورودی

الف) **گیت *AND*** : این گیت دو بیت ورودی را می‌پذیرد و یک بیت خروجی را نتیجه می‌دهد. اگر هر دو بیت ورودی، ۱ باشند، نتیجه نیز مقدار ۱ خواهد بود و در غیر این صورت، خروجی ۰ است.

به زبان ریاضی : $a\ AND\ b = ab$

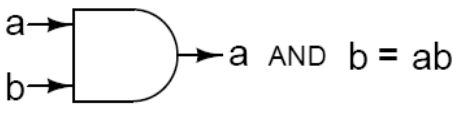
مثال :

$۱\ AND\ ۱ = ۱$

$۱\ AND\ ۰ = ۰$

$۰\ AND\ ۰ = ۰$

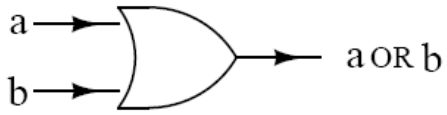
$۰\ AND\ ۱ = ۰$



ب) **گیت *OR*** : در مورد این گیت، اگر هر دو بیت ورودی، ۰ باشند، خروجی نیز ۰ خواهـد بـود و در غیر این صورت نتیجه‌ی تأثیر گیت، ۱ می‌باشد.

مثال : $۰\ OR\ ۰ = ۰$

$OR \circ \ 1 = 1$

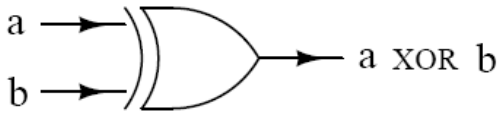


ج) **گیت *XOR*** : در این مورد چنانچه یکی از بیتهای ورودی، ۱ باشد، آنگاه بیت خروجی هم ۱ خواهد بود، در غیر این صورت نتیجه ۰ است.

به زبان ریاضی : $b \oplus a \ XOR \ b = a$

مثال : $1 \ XOR \circ = 1$

$\circ \ XOR \circ = \circ$



گیتهای دو ورودی را می‌توان به طور قراردادی، توسط جدول دوارزشی[۱] که بیت خروجی را برای بیتهای ورودی ممکن نمایش می‌دهد، توصیف کرد. جدول دوارزشی از گیتهای *AND*، *OR* و *XOR* در جدول (۱-۱) نشان داده شده است.

جدول ۱-۱ : جدول دوارزشی گیتهای *AND* ، *OR* و *XOR*

a	b	AND	OR	XOR
۰	۰	۰	۰	۰
۰	۱	۰	۱	۱
۱	۰	۰	۱	۱
۱	۱	۱	۱	۰

بهتر است بدانید که گیت *OR* ترکیبی از گیتهای *AND* و *XOR* می باشد. به عبارتی از مقادیر جدول بالا پیدا است که:

[۷] Truth Table

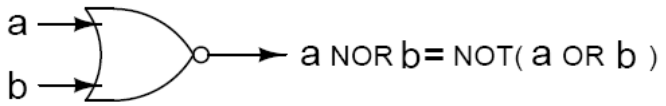
$$a\ OR\ b = (a\ AND\ b)\ XOR\ (a\ XOR\ b). \qquad (۱-۱)$$

در قسمت بعدی دو گیت جدید دیگری را معرفی می‌کنیم که از ترکیب گیت *NOT* با هر یک از گیتهای *AND* و *OR* بدست می‌آیند.

د) **گیت *NAND*** :

یک ویژگی جالب این گیت فراگیر بودن آن است. به عبارت دیگر تمامی عملکردهای محاسباتی می‌توانند با استفاده از این گیت به تنهایی اجرا بشوند. در حقیقت می‌توانیم یک رایانه‌ی کلی تعبیه کنیم که تنها شامل گیتهای منطقی *NAND* یا ترکیبی از گیتهای *NOT* و *AND* باشد.

ه) **گیت *NOR*** :



به همین ترتیب تمامی محاسبات کلاسیکی توسط یک مدار الکتریکی که از مجموعه گیت‌های تک ورودی و دو ورودی معرفی شده در بالا ساخته شده است، اجرا می‌شوند [۴].

۱-۳ اصل لاندؤر[۲]

در سال ۱۹۶۱ رولف لاندؤر خاطر نشان کرد که محو شدن اطلاعات[۳] ضرورتاً یک فرایند اتلافی است و به نوعی باعث فشردگی فضای فاز می‌شود. این فرایند یک فرایند برگشت ناپذیر است.

به عنوان نمونه، می‌توانیم یک بیت اطلاعات را با قرار دادن یک مولکول گاز درون جعبه‌ای که توسط دیواره‌ای به دو قسمت راست و چپ تقسیم شده است، ذخیره کنیم. محو شدن اطلاعات به این

[۸] Landauer`s principle
[۹] Erasure of information