
آشنایی با کامپیوترهای کوانتومی

دیوید مک ماهون

دکتر داریوش شیری

نیاز دانش

فهرست مطالب

خلاصه	۴۴
تمرین‌ها	۴۴

فصل ۳

ماتریس‌ها و آپراتورها	۴۷
مشاهده‌پذیرها	۴۸
آپراتورهای پاولی	۴۸
ضرب‌های خارجی	۴۹
روابط بسته بودن	۵۰
نمایش آپراتورها با ماتریس	۵۰
ضرب‌های خارجی و نمایش ماتریسی آنها	۵۱
نمایش ماتریسی آپراتورها در فضای دو بعدی	۵۱
تعریف: ماتریس‌های پاولی	۵۲
آپراتورهای هرمیتی، یکانی و نُرمال	۵۳
تعریف: آپراتور هرمیتی	۵۵
تعریف: آپراتور یکانی	۵۵
تعریف: آپراتور نُرمال	۵۵
مقادیر ویژه و بردارهای ویژه	۵۶
معادلهٔ مشخصه	۵۶
تجزیه طیفی	۶۰

فصل ۱

درآمدی کوتاه بر نظریهٔ اطلاعات	۱۳
اطلاعات کلاسیک	۱۳
محتوای اطلاعاتی یک سیگنال	۱۵
آنتروپی و نظریهٔ اطلاعات شانون	۱۵
مبانی احتمالات	۱۸
تمرین‌ها	۲۰

فصل ۲

کیوبیت و حالت‌های کوانتومی	۲۱
کیوبیت	۲۱
فضاهای برداری	۲۴
ترکیب خطی بردارها	۲۶
یکتایی مجموعهٔ پرکننده (پایه)	۲۸
پایه و بُعد	۲۹
ضرب‌های داخلی	۳۰
ارتونرمال بودن	۳۳
متعامدسازی گرام - اشمیت	۳۵
فرمالیزم برا - کت	۳۷
نابرابری کوشی - شوارتز و نابرابری مثلثی	۴۰

تعریف: یافتن مقدار چشم داشتی با اپراتور	۶۱
چگالی ۹۶	۶۳
گذار زمانی اپراتور چگالی ۹۸	۶۴
تعریف: گذار زمانی اپراتور چگالی ۹۸	۶۶
اپراتور چگالی برای حالت آمیخته ۹۹	۶۷
ویژگی های کلیدی اپراتور چگالی ۱۰۰	۶۹
مقادیر چشم داشتی ۱۰۲	۷۲
احتمال به دست آوردن یک نتیجه اندازه گیری	۷۳
معین ۱۰۲	۷۵
تشخیص حالت های آمیخته ۱۰۶	۷۵
احتمال یافتن عنصری از توده آماری در یک	۷۶
حالت معین ۱۱۵	۷۶
حالت های کاملاً آمیخته ۱۱۸	۷۷
رد جزئی و اپراتور چگالی کاهش یافته ۱۱۸	گزاره ۱: حالت یک سیستم ۷۷
اپراتور چگالی و بردار بلوخ ۱۲۲	گزاره ۲: کمیت های مشاهده پذیر که با اپراتور
تمرین ها ۱۲۵	نشان داده می شوند ۷۷
	گزاره ۳: اندازه گیری ۷۷
	گزاره ۴: روند زمانی یک سیستم ۷۷
	تمرین ها ۷۸

فصل ۶

نظریه اندازه گیری کوانتومی ۱۲۹
تمایز حالت های کوانتومی و اندازه گیری ۱۲۹
اندازه گیری های نگاشتی ۱۳۱
اندازه گیری سیستم های مختلط ۱۴۰
اندازه گیری های تعمیم یافته ۱۴۶
اندازه های مثبت با مقدار اپراتوری ۱۴۸
تمرین ها ۱۵۲

فصل ۷

درهم تافتگی ۱۵۵
قضیه بل ۱۵۹
سیستم های دو بخشی و پایه بل ۱۶۴
چه وقت یک حالت درهم تافته است؟ ۱۶۶
نمایش پاولی ۱۷۰

فصل ۴

ضرب تانسوری ۸۱
نمایش حالت های ترکیبی در مکانیک کوانتومی ۸۱
محاسبه ضرب های داخلی ۸۳
ضرب تانسوری بردارهای ستونی ۸۵
اپراتورها و ضرب تانسوری ۸۶
ضرب تانسوری ماتریس ها ۹۰
تمرین ها ۹۱

فصل ۵

اپراتور چگالی ۹۳
اپراتور چگالی برای حالت سره ۹۴
تعریف: اپراتور چگالی برای حالت سره ۹۵

فصل ۱۰

۲۳۳	کاربردهای درهم تافتگی
۲۳۳	تراسانی و کدینگ ابرفشرده
۲۳۳	تراسانی
۲۳۷	شرط پرز برای ترانهادگی پاره‌ای
۲۴۲	جابه‌جا کردن درهم تافتگی
۲۴۴	کدینگ ابرفشرده (چگال)
۲۴۶	تمرین‌ها

فصل ۱۱

۲۴۷	رمزنگاری کوانتومی
۲۴۸	مرور کوتاهی بر رمزنگاری RSA
۲۵۱	رمزنگاری کوانتومی پایه
۲۵۴	یک مثال از حمله: حمله با NOT کنترل شده
۲۵۵	پروتکل B92
۲۵۶	پروتکل E91
۲۵۷	تمرین‌ها

فصل ۱۲

۲۵۹	نویز کوانتومی و اصلاح خطا
۲۵۹	خطاهای تک کیوبیت
۲۶۱	عملیات کوانتومی و اپراتور کراوس
۲۶۸	کانال یاد قطیده
۲۶۹	کانال‌های وارونش بیت و وارونش فاز
۲۷۰	افت دامنه
۲۷۷	افت فاز
۲۷۹	اصلاح خطای کوانتومی
۲۸۴	تمرین‌ها

فصل ۱۳

۲۸۷	ابزارهای نظریه اطلاعات کوانتومی
۲۸۷	قضیه منع همانند سازی

۱۷۴	همان‌دهی درهم تافتگی
۱۷۵	نمایش اپراتور چگالی با حالت‌های بل
۱۷۶	تجزیه آشمت
۱۷۸	پالایش
۱۷۸	تمرین‌ها

فصل ۸

۱۸۱	گیت‌ها و مدارهای کوانتومی
۱۸۱	گیت‌های منطقی کلاسیک
۱۸۴	گیت‌های یک کیوبیتی
۱۸۷	انواع دیگر از گیت‌های تک کیوبیتی
۱۹۰	تابع نمایی
۱۹۲	تجزیه Z-Y
۱۹۲	نمودار مدارهای ساده کوانتومی
۱۹۳	گیت‌های کنترل شونده
۱۹۹	تجزیه گیت‌ها
۲۰۲	تمرین‌ها

فصل ۹

۲۰۵	الگوریتم‌های کوانتومی
۲۰۶	گیت‌های هادامارد
۲۰۹	گیت فاز
۲۰۹	نمایش ماتریسی عملیات سری و موازی
۲۱۰	تداخل کوانتومی
۲۱۱	موازی بودن کوانتومی و ارزیابی تابع
۲۱۴	الگوریتم دوچ - جوزا
۲۱۸	تبدیل فوری کوانتومی
۲۲۱	تخمین فاز
۲۲۳	الگوریتم شر
۲۲۶	جستجوی کوانتومی و الگوریتم گراور
۲۲۹	تمرین‌ها

فصل ۱۵

محاسبه کوانتومی با حالت‌های خوشه‌ای ..	۳۲۱
حالت‌های خوشه‌ای ..	۳۲۲
آماده کردن حالت خوشه‌ای ..	۳۲۲
ماتریس‌های همسایگی ..	۳۲۵
حالت‌های پایدار ساز ..	۳۲۵
پیوست: شاهد (معیار) درهم‌تافتگی ..	۳۲۸
پردازش حالت خوشه‌ای ..	۳۲۹
تمرین‌ها ..	۳۳۲

فاصله رد ..	۲۸۸
همان‌دهی ..	۲۹۳
درهم‌تافتگی تشکیل و Concurrence ..	۲۹۷
محتوای اطلاعاتی و آنتروپی ..	۳۰۲
تمرین‌ها ..	۳۰۹

فصل ۱۴

کامپیوترهای کوانتومی آدیباتیک ..	۳۱۱
فرآیندهای آدیباتیک ..	۳۱۴
محاسبه کوانتومی آدیباتیک ..	۳۱۵
تمرین‌ها ..	۳۱۸

پیشگفتار نویسنده

منطقی است که یکی از مهمترین پیشرفت‌های دانش و مهندسی نتیجه‌ی پژوهش‌های میان رشته‌ای در "قرن بیست و یکم" باشد. یکی از جالب‌ترین و مهیج‌ترین این پیشرفت‌ها که به زودی شاهد پیاده‌سازی آن خواهیم بود کامپیوتر کوانتومی است. محاسبه (رایانش) کوانتومی که آمیزه‌ی دانش فیزیک و کامپیوتر است از این مکتب فکری سرچشمه می‌گیرد که می‌گوید اطلاعات ماهیت فیزیکی دارد یعنی اطلاعات را نمی‌توان بدون یک محیط (رسانه‌ی) مادی بوجود آورد یا پردازش کرد.

کامپیوترهای کوانتومی از نظر تئوری نشان داده‌اند که می‌توانند در بسیاری از موارد از کامپیوترهای کلاسیک سریع‌تر باشند. برای مثال الگوریتم تجزیه‌ی اعداد به عامل‌های اول آن، یعنی الگوریتم Shor را می‌توان روی کامپیوترهای کوانتومی طوری پیاده کرد که به سرعت کد اطلاعات رمز شده را بازگشایی کنند. سیستم‌های پردازش داده‌ی کوانتومی، می‌توانند کارهایی انجام دهند که از عهده‌ی کامپیوترهای کلاسیک خارج است، مثلاً تراسپورت (teleportation) حالت یک ذره از یک مکان به مکان دیگر و نیز ساختن رمزهای غیرقابل شکستن برای سیستم‌های رمزنگاری داده.

روش ارائه مطلب در این کتاب به دلایل زیر جزئی و عمیق نیست. این کتاب برای دو دسته از خوانندگان نوشته شده است. گروه نخست دانشجویان دوره‌ی کارشناسی فیزیک، ریاضی و علوم کامپیوتر هستند. بیشتر کتاب‌هایی که درباره‌ی کامپیوترها و نظریه‌ی اطلاعات کوانتومی نگاشته شده‌اند برای این دسته از خوانندگان دشوار هستند. این کتاب خلأ موجود را با ارائه یک متن ساده پر می‌کند و کمک می‌کند تا این دانشجویان مفاهیم اساسی دانش اطلاعات کوانتومی را فراگیرند.

در درجه‌ی دوم برای خوانندگانی نوشته شده است که در رشته‌های دیگر تخصص دارند مثلاً مهندسان، شیمی‌دانان و زیست‌شناسان. این خوانندگان ممکن است به اندازه‌ی متخصصان کامپیوترهای کوانتومی، در فیزیک کوانتومی و ریاضی پیش‌زمینه‌ی کافی نداشته باشند. این کتاب به اصطلاح "دست خواننده را می‌گیرد" تا علاوه بر مفاهیم پایه‌ای، مقداری هم محاسبه‌ی تئوری انجام دهد.

سرانجام این که کتاب برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی فیزیک و کامپیوتر که درس کامپیوترهای کوانتومی می‌گذرانند، می‌تواند یک مرجع کمکی با مثال‌های عددی فراوان باشد در کنار متن اصلی و جزوه‌ی درسی‌شان.

هدف این کتاب بازکردن موضوع و آشنا کردن خواننده‌ی غیرمتخصص با کامپیوترهای کوانتومی است. بنابراین سطح آن ساده‌تر از کتاب‌های استاندارد موجود در بازار است. نحوه‌ی ارائه مطالب هم، نحوه‌ی مرسوم آن نیست، برای این که خواننده با مفاهیم پایه‌ای آشنا شود و آن‌ها را با حل مثال‌های عددی فرا گیرد. بعضی از موضوعات را در این کتاب نگنجانده‌ام یا خیلی عمیق بررسی نکرده‌ام، چون فرض شده که خواننده می‌تواند آن‌ها را در کتاب‌های سطح کارشناسی ارشد پیدا کند. مثلاً بررسی دقیق کامپیوترهای کوانتومی بی‌دررو (adiabatic) و حالت خوشه‌ای (cluster state) فراتر از سطح این کتاب است. بنابراین نمی‌توان گفت که کتاب از هر جهت کامل است. ولی به خوانندگانی که به تازگی وارد این رشته شده‌اند به اندازه‌ی کافی اطلاعات و [انگیزه] می‌دهد که بر پایه‌ی آن مطالعات خود را ادامه بدهند.

گرچه تلاش شده که کتاب زمینه‌ی وسیعی را دربرگیرد ولی نحوه‌ی ارائه کمی گرایش فیزیکی دارد.

دیوید مک ماهون

آزمایشگاه‌های ملی سندیا- نیو مکزیکو

پیشگفتار مترجم

کتاب‌های بسیاری دربارهٔ محاسبات و پردازش اطلاعات کوانتومی نوشته شده‌اند که دارای درجات مختلف پیچیدگی هستند و بسته به این که تخصص نویسنده چیست، به زمینه خاصی از این رشته تأکید دارند. نویسنده کتابی که در دست دارید¹ فرض کرده که خواننده پیش زمینهٔ کافی دربارهٔ مکانیک کوانتومی (جبر دیراک و مکانیک ماتریسی) و نظریهٔ اطلاعات ندارد. به همین دلیل با زبانی ساده و با تمرین‌ها و مثال‌های گوناگون خواننده را با مفاهیمی مثل فضای هیلبرت، برهم نهی، ضرب تانسوری، ماتریس چگالی، درهم تافتگی و آنتروپی آشنا می‌کند و پس از آن خواننده را به دنیای گیت‌های کوانتومی، الگوریتم‌های کوانتومی، رمزنگاری، اصلاح خطا و نویز کوانتومی رهنمون می‌شود. از این رو این کتاب را برای ترجمه برگزیدم تا دانشجویان و مهندسان برق و کامپیوتر و حتی دانش‌آموزان علاقه‌مند دبیرستانی هم بتوانند با این رشته به صورت خودآموز آشنا شوند و چه بسا با ادامهٔ مطالعه به فکر کار و پژوهش در این رشته بیفتند.

هنگام ترجمه متوجه چند اشتباه تایپی در فرمول‌های اصل کتاب شدم که آنها را اصلاح کرده‌ام. هر جا که احساس کردم جمله‌بندی کتاب به اندازهٔ کافی ساده یا رسا نیست، توضیحاتی را در [] افزوده‌ام یا در پاورقی نوشته‌ام. اگرچه سعی کرده‌ام برای واژگان تخصصی این رشته معادل فارسی پیدا کنم ولی در اولین برخورد با واژه در متن، معادل انگلیسی را در () آورده‌ام تا بدانید اصل واژه چه بوده است و اگر خواستید بیشتر بدانید، آنها را در جستجوگرهای اینترنتی پیدا کنید. اگر معادل فارسی

¹ David McMahon, Quantum Computing Explained, Wiley-IEEE Computer Society Press, 2008

را نمی‌پسندید به کتاب واژگان فیزیک مرکز نشر دانشگاهی و یا جزوه‌های درسی استادان این رشته در ایران مراجعه کنید.

به خواننده گرامی توصیه می‌کنم با شکیبایی و علاقه فصل ۱ تا ۸ را بخواند و مثال‌ها و تمرین‌های کتاب را خودش با مداد و کاغذ حل کند. به قول ریچارد فاینمن (Richard Feynman)، فیزیکدان و معلم افسانه‌ای فیزیک، هیچ چیز جای مسأله حل کردن را برای یادگیری نمی‌گیرد. بعد از فصل ۸ می‌توانید تصمیم بگیرید که به کدام کاربرد پردازش اطلاعات کوانتومی علاقه دارید و از میان فصل‌های ۹ تا ۱۵ هر کدام را دوست داشتید برگزینید.

اگر هم با احتمالی اندک بعد از خواندن این کتاب دریافتید که به "کامپیوتر کوانتومی" علاقه‌ای ندارید، نه تنها چیزی را از دست نداده‌اید بلکه مقدار زیادی مبانی مکانیک کوانتومی، نظریه اطلاعات و رمزنگاری فرا گرفته‌اید که می‌توانید از آن به عنوان پیش‌نیاز یا شروع برای زمینه‌های دیگر بهره ببرید. برای مثال مفهوم درهم تافتگی و حالت‌های خوشه‌ای را برای حل مسائل سیستم‌های بس ذره‌ای در فیزیک ماده چگال بکار ببرید یا رمزنگاری کلاسیک را دنبال کنید و یا کاربرد مفهوم ضرب تانسوری را در مسائل ریاضی کاربردی جستجو کنید.

درضمن، دیوید مک ماهون کتاب‌های دیگری هم به زبان ساده و با مثال‌های فراوان در زمینه مکانیک کوانتومی و نظریه میدان‌های کوانتومی نگاشته است که آنها هم شروع خوبی برای مطالعه جدی در نظریه کوانتومی هستند.

می‌توانید کتاب‌های پیشرفته‌تر زیر را هم بخوانید، مثل کتاب دانش کامپیوتر کوانتومی نوشته دیوید مرمین^۱، کتاب درسی نیلسن و چوانگ^۲ و اگر می‌خواهید روش ساخت و پیاده‌سازی گیت‌ها و مدارهای کوانتومی را ببینید به کتاب ناکاهارا و اُمی^۳ نگاه کنید.

ترجمه این کتاب سال ۲۰۱۳ انجام شد و پس از آن در جستجوی ناشری بودم تا اینکه همکار پیشین بنده، خانم مهندس سیده مهتا جنابی از شرکت کاوش کام آسیا، انتشارات نیاز دانش را به بنده معرفی کردند. بعد از تماس با این انتشارات، مدیریت محترم آن جناب آقای مهندس حمیدرضا شیرازی به گرمی پذیرای چاپ کتاب شدند و با تلاش همکاران گرامی ایشان کتاب به سرعت آماده چاپ شد.

از همگی این بزرگواران نامبرده سپاسگزارم. از پدر و مادر، همسر و برادرانم که مشوق و پیگیر روند ترجمه و انتشار این کتاب بودند سپاسگزارم. از پروفیسور جان مارتینیس (John Martinis)، از دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا که اجازه دادند شکل تراشه پردازنده چهار کیوبیتی آزمایشگاه ایشان را

¹ Quantum Computer Science, N. David Mermin, 1st Edition, Cambridge University Press, 2007

² Quantum Computation and Quantum Information, 10th Edition, Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang, Cambridge University Press, 2010

³ Quantum Computing: From Linear Algebra to Physical Realizations, Mikio Nakahara, Tetsuo Ohmi, CRC Press, 2008

برای طرح روی جلد بکار ببرم نیز سپاسگزارم. در پایان این ترجمه را تقدیم می‌کنم به همه دانش‌آموزان و دانش‌جویان امیدوار ایران زمین که سرمایه‌ای جز توکل به خدا و اعتماد به نفس، و تفریحی جز کتاب و کتابخوانی ندارند.

داریوش شیری
بهار ۱۳۹۶ - سوئد