

آشنایی با الگوریتم‌ها

ویراست سوم - ژانویه ۲۰۱۱
(جلد اول)

نوشته‌ی

تامس اچ. کورمن / چارلز ای. لایرسون
رانلد ال. روست / کلیفورد استاین

ترجمه‌ی

حسین ابراهیمزاده قلزم



انتشارات کتاب آوا

دانشجویان رشته‌ی کامپیوتر خوب می‌دانند که مسایل علمی یا حتی غیرعلمی، معمولاً با دو روش الگوریتمی و مکاشفای حل می‌شوند و الگوریتم چیزی نیست جز حل یک مسأله به صورت قانونمند و مرحله به مرحله، با جزئیات کافی و مستقل از مقادیر ورودی خاص، که امروزه مستقل از ماشین نیز باید باشد، که در نهایت باید منتهی به جواب و نتیجه‌ی درست شود و این، همان روشی است که خوارزمی (۱۵۸-۲۲۹ شمسی، حدود 780-850 میلادی) ریاضیدان و ستاره‌شناس قرن سوم ایران ارائه داده است. وی این روش را در محاسبات چهار عمل اصلی خود، در دستگاه شمار دهگانی، که امروزه جهانیان از آن استفاده می‌کنند در کتاب‌های الجبر و المقابله، الجمع و التفریق و زیج خوارزمی یا زیج سند هند (SindHind) و کتاب الحساب الهندی که راجع به محاسبات با روش‌های هندی است بیان کرده است و دانشمندان علوم کامپیوتر، نام الگوریتم (Algorithm) را به افتخار و به یاد او (اواخر سال‌های 1950، با شروع انقلاب کامپیوتری) بر روی این علم نهاده‌اند و ریاضیدانان نیز با استفاده از عنوان کتاب الجبر و المقابله‌ی او، با انتخاب "Algebra" از او و کارهایش که حل کامل معادلات جبری درجه اول و درجه دوم با روش امروزی است تقدیر نموده‌اند. خوارزمی کتاب جبر و مقابله را در سن ۵۰ سالگی خود تألیف کرده بود. کتاب‌های خوارزمی در قرن 12 میلادی در اروپا به زبان لاتین ترجمه شد و تحول و انقلاب عظیمی در اروپا برپا کرد و Algebra از همان هنگام در ادبیات و فرهنگ اروپاییان وارد شد. لازم به ذکر است که کتاب جبر و مقابله خوارزمی، سال‌ها پیش با ترجمه‌ی دکتر حسین خدیوچ توسط انتشارات خوارزمی و انتشارات علمی چاپ و منتشر شده است. توصیه می‌کنم کتاب التفهیم ابوریحان بیرونی با تصحیح جلال‌الدین همایی را که نشر هما منتشر کرده است نیز مطالعه کنید. بیرونی کتاب التفهیم خود را حدود ۱۰۰۰ سال پیش برای مبتدیان و نوآموزان، به‌خصوص برای یک دختر نوآموز ایرانی، ریحانه، به صورت سؤال و جوابی نوشته بود. او هم خوارزمی است. آن اولی از درون خوارزم است و این دومی از بیرون آن. کتاب علم الهمیة بیرونی از شاهکارهای ریاضی او و درباره‌ی علم مثلثات کروی است. بیرونی ۱۴ سال از عمر خود را در هندوستان به تحقیق و پژوهش گذرانیده است. بیرونی هم عصر ابوعلی سینا و بوزجانی است.

الگوریتم‌های کامپیوتری علاوه بر ویژگی‌های بالا باید خصوصیت صحیح و کارا بودن و سهولت در پیاده‌سازی را نیز دارا باشند. در تحلیل الگوریتم‌ها که در آن، راه حل مسأله و درستی الگوریتم بحث و بررسی می‌شود زمان مورد نیاز اجرای الگوریتم‌ها نیز مورد توجه قرار می‌گیرد و هرگاه نتوان زمان اجرای دقیق یک الگوریتم را تعیین کرد معمولاً از کران بالا و در پارامترهای از موارد، از کران پائین زمان اجرا استفاده می‌شود.

حل مسائل در این کتاب، از طریق طراحی الگوریتم‌ها به صورت استقرایی و تقسیم و غلبه (تقسیم و حل) که روش‌هایی از بالا به پائین هستند و همچنین با روش برنامه‌ریزی پویا که روشی از پائین به بالا است، صورت می‌گیرد. علاوه بر این، از الگوریتم حریصانه، که روشی بسیار ساده اما جالب برای مسأله‌هاست برای بهینه‌سازی راه حل مسأله‌ها در این درس استفاده می‌کنیم و نیز بررسی مقدار حافظه‌ی مصرفی یک الگوریتم، بدون توجه به حافظه‌ی مورد نیاز ورودی و خروجی، موضوع اصلی این درس را تشکیل می‌دهد. ما در این درس، در جستجوی زمان اجرای پائین (یعنی خطی)، حتی لگاریتمی، و مصرف حافظه‌ی کمتر در اجرای الگوریتم‌ها هستیم.

در این کتاب، روش‌های حل رابطه‌های بازگشتی با استفاده از استقرا، با روش جانشینی، درخت

بازگشتی، روش اصلی، تغییر متغیر و تابع مولد به طور کامل بحث و بررسی شده است و با الگوریتم جدید و بازگشتی استراسین برای ضرب ماتریس‌های $n \times n$ با زمان اجرای جالب $O(n^{\lg 7})$ نیز آشنا می‌شوید. در این کتاب می‌بینید که چگونه مرتب‌سازی n عدد صحیح در زمان $O(n \sqrt{\lg n})$ انجام می‌شود. عملیات اصلی درخت جستجوی دودویی با ارتفاع h ، از مرتبه‌ی $O(h)$ است اما اگر h یعنی ارتفاع درخت بزرگ باشد با استفاده از ایده‌ی جدید درخت قرمز - سیاه، یک درخت n گره‌ای به راحتی متوازن می‌شود که عملیات مختلف اصلی آن از مرتبه‌ی $O(\lg n)$ هستند.

با روال‌ها و درخت‌های جدید van Emde Boas نیز در این درس آشنا می‌شوید که ملاحظه خواهید کرد چگونه با استفاده از یک بردار بیتی، عملیات مختلف خود را در زمان $O(\lg \lg n)$ انجام می‌دهد و با همین زمان اجرای کوچک، n عدد مرتب می‌شود.

در ترجمه‌ی این کتاب، فراخوانی و فراخواندن یا صدا کردن زیربرنامه‌ها را احضار به معنی به حضور پذیرفتن ترجمه کرده‌ام که معادل invoking و calling است. برای procedure نیز معادل روال را برگزیده‌ام که گاهی رویه نیز ترجمه شده است و نیز sibling را هم‌زاد ترجمه کرده‌ام که می‌توان آن را برادر یا خواهر نیز ترجمه کرد چرا که گره‌های یک پدر هستند. ضمناً برای هر اصطلاح کامپیوتری مهم که دانشجو برای اولین بار در کتاب با آن آشنا و روبرو می‌شود معادل انگلیسی آنها را نیز آورده‌ام که این نیز به درخواست دانشجویان بوده است تا دانشجو هم با معادل انگلیسی اصطلاحات کامپیوتری و الگوریتمی آشنا شود تا کمکی باشد به زبان تخصصی او و هم ممکن است اساتید محترم دانشگاه‌های مختلف از معادل‌های دیگری برای بعضی از این کلمات استفاده کنند، که به این ترتیب دانشجو کمتر دچار مشکل می‌شود.

این کتاب در دو جلد منتشر می‌شود. جلد اول آن شامل ۲۶ فصل است و بقیه‌ی فصل‌های کتاب به انضمام پیوست‌ها در جلد دوم ارائه می‌شود. دانشجویان کارشناسی و کارشناسی ارشد و نیز اساتید محترم می‌توانند از این کتاب برای درس "ساختمان داده‌ها و الگوریتم‌ها"، درس "اصول طراحی الگوریتم‌ها" یا "طراحی و تحلیل الگوریتم‌ها" استفاده کنند.

کتاب حاضر را به بیان دانشجویی، الگوریتم CLRS را به طور کامل طی اوقات فراغت در ایام سکونت چندین ساله‌ی خود در مونترال و تورنتو، که همیشه چه در ایران و چه در کانادا، پیش از آنکه، شب از خواب بیدار شود و چشمش را به روشنایی روز باز کند نظاره‌گر بیدار شدن شب بودم و سحرخیزی روز را مشاهده کردم در تورنتوی کانادا ترجمه کرده‌ام.

در پایان، ترجمه‌ی حاضر را با یاد خدا و یاد پدر و مادر فقیدم، محمد اسماعیل و عزیزه شروع کرده و به پایان رسانده‌ام و آن را به پدر و مادر خانم، سلطانعلی و فاطمه، و نیز به همسرم بهناز، و فرزندانمان سحر دانشجوی سال دوم پزشکی دانشگاه تورنتو، سینا و بهار که متولد تورنتو است تقدیم می‌کنم که مدت‌هاست به خاطر مشغله‌ی کاری نتوانستم در کنار آنها باشم.

حسین ابراهیم‌زاده قلزم

ساعت ۴/۱۵ صبح روز سه‌شنبه

۱۴ / دی / ۱۳۸۹ - ۴ / ژانویه / ۲۰۱۱

تورنتو - نورث یورک - کانادا

Gholzom@Gmail.com

پیش‌گفتار مؤلفین

الگوریتم حتی پیش از اختراع کامپیوتر وجود داشت. اما اکنون که کامپیوتر وجود دارد شمار الگوریتم‌ها حتی بیشتر هم شده‌اند، و الگوریتم قلب محاسبات کامپیوتری را تشکیل می‌دهد. این کتاب به صورت جامع، دانشجو را با مطالعات نوین الگوریتم‌های کامپیوتری آشنا می‌کند. با ارائه کامپیوتر متعدد در این کتاب، آنها را در سطح قابل توجهی پوشش داده‌ایم و الگوریتم‌ها را طوری تجزیه و تحلیل کرده‌ایم که هر خواننده‌ی کتاب، با هر سطح از معلومات کامپیوتری می‌تواند از آنها استفاده کند. توضیحات را ساده بیان کرده‌ایم بدون این که مطلبی از دست داده باشیم و یا زیاد در ریاضیات غرق شویم.

در هر فصل، حداقل یک الگوریتم، روش طراحی و کاربرد و مباحث مرتبط با آن ارائه شده است. الگوریتم‌ها را به صورت شبه‌کد و به زبان انگلیسی بیان کردیم تا هر دانشجو که اندک تجربه‌ای در برنامه‌نویسی دارد به راحتی بتواند آن را بخواند. این کتاب 244 شکل و تصویر دارد که بسیاری از آنها چند قسمتی هستند. شکل‌ها در مورد چگونگی کار الگوریتم‌ها توضیح می‌دهند.

از آنجا که کارایی، معیاری بسیار مهم در طراحی الگوریتم‌هاست از این‌رو تحلیل‌های مفصل و مفید و دقیقی از زمان اجرای تمام الگوریتم‌ها در کتاب گنجانده شده است.

هدف از تألیف این کتاب در وهله‌ی اول برای درس الگوریتم‌ها یا ساختمان‌داده‌های دوره‌ی کارشناسی و کارشناسی ارشد است. و چون در کتاب، موضوعات مهندسی طراحی الگوریتم‌ها و نیز مفاهیم ریاضی مرتبط با آن به قدر کافی بحث و بررسی شده است از این‌رو برای افراد حرفه‌ای و فنی، برای خودآموزی الگوریتم‌ها، کاملاً مناسب است.

در این ویرایش که ویرایش سوم کتاب است بار دیگر، تمام کتاب را به روز رسانده‌ایم. این تغییرات شامل مجموعه گسترده‌ای از موضوعات و نیز اضافه شدن فصل‌های جدید، تجدیدنظر در شبه‌کدها، و هم‌چنین سبک نوشتاری فعال و مؤثر است.

به استادان دانشگاه

این کتاب به گونه‌ای تألیف شده است که هم فراگیر باشد و هم کامل. از این کتاب می‌توانید برای درس‌های مختلف مانند درس ساختمان داده‌های دوره‌ی کارشناسی تا درس الگوریتم‌های کارشناسی ارشد استفاده کنید. از آنجا که مطالب به مراتب بیشتر از آنچه که در یک درس یک ترمی ارائه می‌شود در این کتاب گنجانده شده است از این‌رو می‌توانید این کتاب را یک کتاب مرجع و جامع در نظر بگیرید طوری که به راحتی می‌توانید موضوعات موردنظر خود را از آن میان انتخاب و تدریس کنید.

سازمان‌دهی فصل‌های موردنیاز خود را در آن می‌توانید به سادگی انجام دهید. فصل‌های کتاب نسبتاً مستقل هستند از این‌رو نباید نگران وابستگی مطالب یک فصل به فصل دیگر باشید. در هر فصل، ابتدا مطالب ساده‌تر و به دنبال آن، مطالب دشوارتر ارائه شده است. برای درس‌های کارشناسی می‌توانید تنها از بخش‌های ابتدایی هر فصل استفاده کنید و برای کارشناسی ارشد می‌توانید تمام مطالب هر فصل را در برنامه‌ی کاری خود بگنجانید.

این کتاب شامل 957 تمرین و 158 مسأله است. هر بخش با چند تمرین، و هر فصل با چند مسأله به پایان می‌رسد. تمرین‌ها معمولاً با پرسش‌های کوتاهی همراه هستند که میزان تسلط دانشجو را بر مطالب می‌سنجند. بعضی از مسأله‌ها، تمرین‌های خودآزمایی ساده هستند حال آن که بعضی دیگر، خیلی اساسی و مهم، و نیازمند صرف وقت و کار بر روی آنها هستند. مسأله‌ها، مطالعات موردی بسیار جالبی هستند که غالباً مطالب جدیدی در دل آنها معرفی می‌شود. اغلب اوقات این مسایل با چند پرسش شروع می‌شوند که دانشجو با طی چند مرحله، برای رسیدن به جواب مطلوب راهنمایی می‌شود. با توجه به تجربه‌مان از ویرایش‌های قبلی، جواب بعضی از مسایل و تمرین‌ها، نه اساساً همه‌ی آنها، را در دسترس عموم قرار داده‌ایم. وب سایت ما یعنی

<http://mitpress.mit.edu/algorithms>

پیوندی (link) است برای شما به این جواب‌ها. از شما می‌خواهیم از این سایت دیدن کنید تا مطمئن شوید جواب تمرین یا مسأله‌ای که به عنوان تکلیف به دانشجو می‌دهید در این سایت نباشد. هدف نهایی ما، ارائه‌ی تمام جواب‌ها به مرور زمان و نیز در ویرایش‌های بعدی است به همین خاطر، لازم است هر چند وقت یکبار از این سایت دیدن کنید.

بخش‌ها و تمرین‌های ستاره‌دار، بیشتر برای دانشجویان کارشناسی ارشد مناسب هستند تا دانشجویان کارشناسی. بخش ستاره‌دار لزوماً به معنی مشکل‌تر بودن از بی‌ستاره‌ها نیست، اما ممکن است نیازمند دانش کافی از ریاضیات پیشرفته باشند به همین ترتیب، تمرین‌های ستاره‌دار ممکن است نیازمند پیش زمینه‌ای قبلی و پیشرفته، با خلاقیتی بیش از حد متوسط باشد.

به دانشجویان

امیدواریم این کتاب شروعی خوب و لذت‌بخش برای دانشجویان رشته‌های الگوریتم باشد. تلاش کرده‌ایم هر الگوریتم را قابل دسترس و جالب سازیم. هنگام روبرو شدن با الگوریتم‌های ناآشنا و دشوار، برای کمک به دانشجو، هر الگوریتم را به صورت مرحله‌به‌مرحله توضیح داده‌ایم. علاوه بر این، توضیحات دقیقی از ریاضیات موردنیاز، به منظور درک بهتر تحلیل الگوریتم‌ها فراهم آورده‌ایم. چنانچه پیشاپیش با عنوان فصلی آشنایی دارید، فصل‌های کتاب را طوری سازماندهی کرده‌ایم که می‌توانید از بخش‌های ابتدایی آن صرف‌نظر کنید و کار خود را به سرعت و با مطالب پیشرفته‌تر ادامه دهید.

کتاب حاضر، کتاب نسبتاً پر حجمی است از این‌رو احتمالاً، در درسی که گرفته‌اید این کتاب تنها می‌تواند بخش‌هایی از آن را پوشش دهد با وجود این، تلاش کرده‌ایم آن را به گونه‌ای تألیف کنیم که هم برای درس ساختمان داده‌ها و الگوریتم‌ها و تحلیل آنها، یک کتاب درسی و هم بعد از فارغ‌التحصیلی، یک مرجع یا کتاب بالینی کامپیوتر خوب برایتان باشد.

خوانندگان این به چه پیش‌نیازهایی احتیاج دارند؟

- باید اندکی تجربه در برنامه‌نویسی داشته باشید. به ویژه این که باید با روال‌های بازگشتی و ساختمان داده‌های ساده‌ای مانند آرایه‌ها و لیست‌های پیوندی آشنا باشید.
- باید از دانش کافی برای اثبات‌های ریاضی، و به ویژه اثبات از طریق استقرای ریاضی برخوردار باشید. چند بخش از کتاب، به اندک دانشی از حسابان مقدماتی نیاز دارد. جدای از این‌گونه مسایل، در قسمت‌های I و VIII از کتاب، تمام روش‌های ریاضی موردنیاز به شما آموزش داده می‌شود.

به صورت صریح و روشن به ما گفته‌اند که حل مسائل و حل تمرین‌های کتاب را چاپ کنیم. وب‌سایت ما به آدرس

<http://mitpress.mit.edu/algorithms/>

پیوندی است به جواب تعدادی از مسائل و تمرین‌ها. مسایل و تمرین‌های کتاب را حل کنید و جواب‌های خود را با جواب ما مقایسه کنید. اما خواهشی که از شما داریم آن است که جواب‌های خود را برایمان نفرستید.

به افراد حرفه‌ای

تنوع زیاد مطالب و گستردگی مباحث مطرح شده در این کتاب آن را به یک کتاب مرجع و عالی در زمینه‌ی الگوریتم‌ها تبدیل کرده است. از آنجا که مطالب هر فصل مستقل و خود شمول از فصل‌های دیگر است از این‌رو می‌توانید بر روی مباحثی تمرکز کنید که مورد علاقه و نیاز شماست. اکثر الگوریتم‌هایی که در این کتاب بحث و بررسی شده است در عمل، کاربردهای زیادی دارند. بنابراین، دغدغه و نگرانی ما بر پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و دیگر موضوعات مهندسی است. اغلب اوقات، جایگزین‌های عملی برای تعدادی از الگوریتم‌ها که از دیدگاه نظری قابل توجه و مهم هستند فراهم ساخته‌ایم.

اگر بخواهید هر یک از الگوریتم‌ها را پیاده‌سازی کنید، کافی است شبه‌کد ما را به زبان برنامه‌نویسی موردنظر خود تبدیل کنید که کاری نسبتاً ساده و روان است. شبه‌کد را طوری طراحی کرده‌ایم تا الگوریتم را به صورت روشن و ساده ارائه دهد. در نتیجه، مدیریت خطا و دیگر موضوعات مهندسی نرم‌افزار را مطرح نساختم که نیازمند فرضیاتی مشخص در ارتباط با محیط برنامه‌نویسی است. تلاش کرده‌ایم تا هر الگوریتم را ساده و به صورت مستقیم، بدون توجه به ملاحظات مربوط به یک زبان برنامه‌نویسی خاص بنویسیم.

متوجه شده‌ایم که اگر از این کتاب در محیطی غیر از یک کلاس دانشگاهی استفاده کنید، در آن صورت احتمالاً نمی‌توانید جواب مسایل و تمرین‌های خود را با جواب‌هایی که یک استاد دانشگاه ارائه می‌دهد مقایسه و کنترل کنید. وب‌سایت ما یعنی

<http://mitpress.mit.edu/algorithms/>

پیوندی به جواب‌های بعضی از مسایل و تمرین‌هاست طوری که می‌توانید نتیجه‌ی کار خود را با جواب‌های ارائه شده کنترل نمایید. خواهشمندیم جواب‌های خود را برایمان نفرستید.

به همکارانمان

فهرست کاملی از اسامی کتاب‌ها و مراجعی به ادبیات کامپیوتری معاصر در انتهای کتاب ارائه داده‌ایم. هر فصل با یک مجموعه از یادداشتهای فصل به پایان می‌رسد که شرحی تاریخی از موضوعات و کتاب‌های مرجع به دست می‌دهد. با وجود این در یادداشتهای فصل، مراجع کاملی در زمینه‌ی الگوریتم‌ها فراهم نساختم. برای کتابی با این حجم، با محدودیت جا به ما این اجازه داده نشد تا الگوریتم‌های جالب زیادی را در آن مطرح سازیم.

علیرغم درخواست‌های فراوانی که از دانشجویان برای ارائه‌ی جواب مسایل و تمرین‌ها داشته‌ایم، به عنوان یک سیاست کلی در کار، حتی از راهنمایی‌های مربوط به تمام مسائل و تمرین‌ها خودداری کرده‌ایم تا دانشجو خود در پی حل مسایل باشد و به جواب‌های ما بسنده نکند.

تغییرات ویرایش سوم

چه مطالبی بین ویرایش دوم و سوم این کتاب تغییر کرده است؟ میزان تغییرات ویرایش سوم، به اندازه‌ی تغییرات در بین ویرایش اول و دوم است همان‌گونه که در مورد تغییرات ویرایش دوم گفتیم، بسته به این که چگونه به آن نگاه کنید، کتاب نه زیاد تغییر کرده است و نه کم. نگاهی سریع به فهرست مطالب نشان می‌دهد که اکثر فصل‌ها و بخش‌های ویرایش دوم در ویرایش سوم آمده است. دو فصل و یک بخش از ویرایش دوم را حذف کرده‌ایم اما سه فصل جدید و نیز دو بخش جدید به کتاب افزوده‌ایم.

سازمان‌دهی کتاب و ترکیب دو ویرایش اول را حفظ کرده‌ایم. به جای سازمان‌دهی فصل‌ها تنها براساس دامنه‌ها یا تنها بر طبق روش‌ها، این کتاب حاوی اجزایی مانند هر دو ویرایش بالاست. سازمان آن شامل فصل‌های مبتنی بر روش تقسیم و غلبه، برنامه‌ریزی پویا، الگوریتم‌های حریصانه، تحلیل سرشکن شده، کامل بودن NP و الگوریتم‌های تقریبی است. اما کتاب هم‌چنان حاوی تمام قسمت‌های مربوط به مرتب‌سازی، مطالبی از ساختمان داده‌های مجموعه‌ی پویا، و نیز الگوریتم‌های مربوط به مسائل گراف است. دریافته‌ایم اگر چه دانشجو نیازمند آن است از چگونگی استفاده از روش‌های طراحی و تحلیل الگوریتم‌ها آگاهی داشته باشید، اما مسائل به ندرت به شما می‌گویند کدام روش برای حل مسأله‌ی موردنظر، مناسب‌تر است.

در زیر به اختصار تغییرات مهم ویرایش سوم ارائه شده است:

- فصل‌های جدیدی که مربوط به درخت‌های *van Emde Boas* و الگوریتم‌های چندبندی است را به کتاب افزوده‌ایم و مطلب مربوط به سبانی ماتریس‌ها را به پیوست منتقل کرده‌ایم.
- فصل مربوط به رابطه‌های بازگشتی را اصلاح کرده‌ایم تا کاملاً شامل روش تقسیم و غلبه باشد، و نیز در دو بخش اول با استفاده از تقسیم و غلبه، دو مسأله را حل می‌کند. بخش دوم از این فصل، الگوریتم استراسن برای ضرب ماتریس‌ها را ارائه می‌دهد که از فصل مربوط به عملیات ماتریسی جابه‌جا شده است.
- دو فصلی را که به ندرت تدریس می‌شد حذف کرده‌ایم: *Heap* های دوجمله‌ای و شبکه‌های مرتب‌سازی. یک ایده‌ی کلیدی در فصل شبکه‌های مرتب‌سازی، اصل $0-1$ ، در این ویرایش در مسأله‌ی $8-7$ به صورت لم مرتب‌سازی $0-1$ برای الگوریتم‌های مقایسه - جابه‌جایی آمده است. بررسی *Heap* های فیبوناچی، دیگر نیازمند *Heap* های دوجمله‌ای به عنوان پیش‌نیاز نیست.
- در بررسی خود از برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم‌های حریصانه تجدیدنظر کرده‌ایم. اکنون برنامه‌ریزی پویا را با یک مسأله‌ی جالب‌تر به نام برش میله در مقایسه با مسأله‌ی زمان‌بندی خط تولید از ویرایش دوم شروع کرده‌ایم. علاوه بر این، بر روی یادداشت برداری اندکی بیشتر از ویرایش دوم تأکید و تمرکز کرده‌ایم و نیز با مفهوم گراف زیرمسأله به عنوان روشی برای

درک زمان اجرای یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا آشنا می‌شود. در مثال بازار الگوریتم‌های حریصانه، مسأله‌ی انتخاب فعالیت، به الگوریتم حریصانه بیش‌تر از آنچه که در ویرایش دوم عمل کرده‌ایم پرداخته‌ایم.

- روش حذف یک گره از درخت‌های جستجوی دودویی (که شامل درخت‌های قرمز - سیاه است) اکنون تضمین می‌کند که گره‌ی درخواستی برای حذف، همان گره‌ای است که واقعاً حذف می‌شود. در دو ویرایش اول، در بعضی از موارد، یک گره دیگر باید حذف می‌شد. با توجه به این که مقدارش به گره‌ای انتقال می‌یابد که برای حذف به روال حذف منتقل شد. با روش جدیدمان برای حذف گره‌ها، اگر مؤلفه‌های دیگر یک برنامه، اشاره‌گرها به گره‌های درخت را حفظ کنند، به اشتباه با اشاره‌گر پایدار به گره‌هایی پایان نمی‌یابد که حذف شده است.
- مطالب مربوط به شبکه‌های جریان اکنون پایه‌ای برای جریان‌هایی، تماماً بر روی یال‌هاست. این روش شهودی‌تر از شبکه‌های محض به کار گرفته شده در دو ویرایش قبلی است.
- با انتقال مطالب مربوط به مبانی ماتریس‌ها و الگوریتم استراسن به فصل‌های دیگر، فصل‌های مربوط به عملیات ماتریسی را نسبت به ویرایش دوم کوچک‌تر کرده‌ایم.
- بررسی الگوریتم تطبیق رشته‌ی کُوت - مورس - پرات را اصلاح کرده‌ایم.
- چندخطای ویرایش قبل را تصحیح کرده‌ایم. اکثر این خطاها در وب سایت ما در بخش خطاهای ویرایش دوم بجز تعداد اندکی آمده است.
- با توجه به درخواست‌های متعدد، ساختار دستوری شبه‌کدها (ی ویرایش دوم) را تغییر داده‌ایم. در این ویرایش، از "=" برای "جایگزینی" و از "==" برای آزمایش برابری، درست مانند زبان‌های C، C++، Java، و Python استفاده کرده‌ایم. به صورت مشابه، کلمه‌های کلیدی do و then را حذف کرده‌ایم و از "//" برای توضیح یک خطی استفاده کرده‌ایم. علاوه بر این، در این ویرایش از نماد نقطه برای بیان صفات شیء استفاده می‌کنیم. شبه‌کدها به عوض شیء‌گرا بودن، رویه‌ای یا به صورت روال هستند. به بیان دیگر، به عوض روش‌های اجرا بر روی اشیاء، تنها روال‌ها را احضار و اشیاء را به عنوان پارامتر به آن منتقل می‌کنیم.
- 100 تمرین جدید و 28 مسأله‌ی جدید به این ویرایش اضافه کرده‌ایم. علاوه بر این، فهرست اسامی کتاب‌ها را به روز ساخته‌ایم و چند اسم کتاب جدید به آن اضافه کرده‌ایم.
- در پایان، تمام کتاب را به‌طور کامل مرور کرده‌ایم و جمله‌ها، بندها، و بخش‌هایی را بازنویسی نموده‌ایم تا بیان مطالب را روشن‌تر و فعال‌تر سازیم.

وب سایت

برای دریافت دریافت اطلاعات تکمیلی می‌توانید مورد نیاز خود از وب سایت ما با آدرس <http://mitpress.mit.edu/algorithms/> استفاده کنید و با این وب سایت می‌توانید با ما مکاتبه کنید. این وب سایت، پیوندی (link) به فهرستی از خطاهای پیدا شده، جواب تمرین‌های منتخب و مسأله‌ها، و (البته) فهرستی توضیحی از پرسش‌های

قلابی داخل کتاب، و نیز مطالب دیگری است که می‌توانست به کتاب اضافه شود. به کمک این وب سایت می‌توانید خطاها را به ما گزارش کنید یا پیشنهادهایی ارائه دهید.

نرم‌افزارهای مورد استفاده برای نوشتن این کتاب

ویرایش سوم مانند ویرایش دوم با $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}2_{\epsilon}$ حروف چینی شده است. از قلم (فونت) Times و نیز حروف چینی ریاضی با استفاده از فونت‌های Math Time Pro 2 سود جستیم. شکل‌ها و تصاویرهای ویرایش سوم را با استفاده از Macro Draw Pro رسم کرده‌ایم و عبارت‌های ریاضی داخل تصاویر را با بسته Psfrag سیستم حروف چینی $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}2_{\epsilon}$ نوشته‌ایم.

تشکر ویژه به خاطر ویرایش سوم

نویسندگان از چندین نفر و به ویژه از Erik Demaine به خاطر ارائه‌ی درخت‌های van Emde Boas و نیز از Harald Prokop به خاطر نوشتن چندبندی، و نیز افراد دیگر از MIT تشکر کرده‌اند که ذکر اسامی آنها، برای دانشجو جعبه‌ی آموزشی ندارد از این رو مترجم آنها را در ترجمه نیآورده است. در پایان، از همسرانمان نیکول کورمن، وندی لایرسون، جل روست و ربکا آیوری، و بچه‌هایمان ریکی، ویل، ذبی، و کتی لایرسون، آکس و کریستوفر روست، و نیز مولی، نوآ، و بنجامین استاین برای عشق و پشتیبانی‌شان از ما هنگام تهیه‌ی این کتاب تشکر می‌کنیم. صبر و تشویق اعضای خانواده‌مان، انجام این پروژه‌ی بزرگ را برایمان ممکن ساخت. ما مهربانانه و از صمیم قلب این کتاب را به آنها تقدیم می‌کنیم.

تامس اچ. کورمن	لبنان، ایالت نوهامپشایر
چارلز ای. لایرسون	کمبریج، ایالت ماساچوست
راندل ال. روست	کمبریج، ایالت ماساچوست
کلیفورد استاین	نیویورک، ایالت نیویورک
فوریه ۲۰۰۹	

فهرست مطالب

۳	مقدمه‌ی مترجم
۵	پیش‌گفتار مؤلفین
۱۷	۱ اصول و مبانی الگوریتم‌ها
۱۸	مقدمه
۲۱	۱- نقش الگوریتم‌ها در محاسبات
۲۱	۱-۱ الگوریتم‌ها
۲۷	۲-۱ الگوریتم‌ها به عنوان یک فناوری
۳۰	مسئله‌ها
۳۳	۲- شروع کنید
۳۳	۲-۱ مرتب‌سازی درجی
۳۹	۲-۲ تحلیل الگوریتم‌ها
۴۶	۲-۳ طراحی الگوریتم‌ها
۴۶	۲-۳-۱ روش تقسیم و غلبه
۵۱	۲-۳-۲ تحلیل الگوریتم‌های تقسیم و غلبه
۵۵	مسئله‌ها
۵۹	۳- رشد تابع‌ها
۵۹	۳-۱ نماد مجانبی
۶۹	۳-۲ نمادهای استاندارد و تابع‌های مشترک
۷۵	مسئله‌ها
۸۱	۴- تقسیم و غلبه
۸۴	۴-۱ مسئله‌ی زیر آرایه‌ی ماگزیم
۹۱	۴-۲ الگوریتم استراسن (Strassen's algorithm) برای ضرب ماتریس‌ها
۹۸	۴-۳ روش جانشینی برای حل رابطه‌های بازگشتی
۱۰۲	۴-۴ روش درخت بازگشتی برای حل رابطه‌های بازگشتی
۱۰۸	۴-۵ روش اصلی برای حل رابطه‌های بازگشتی
۱۱۱	۴-۶ اثبات قضیه‌ی اصلی
۱۱۲	۴-۶-۱ اثبات توان‌های کامل
۱۱۷	۴-۶-۲ کف‌ها و سقف‌ها
۱۲۰	مسئله‌ها

۱۲۷	۵- تحلیل احتمالاتی و الگوریتم‌های تصادفی
۱۲۷	۵-۱ مسأله استخدام
۱۳۰	۵-۲ متغیرهای تصادفی شاخص
۱۳۴	۵-۳ الگوریتم‌های تصادفی
۱۴۲	۵-۴ * تحلیل احتمالاتی و کاربردهای دیگر متغیرهای تصادفی شاخص
۱۴۲	۵-۴-۱ باطل‌نمای روز تولد
۱۴۵	۵-۴-۲ توپ‌ها و سبدها
۱۴۶	۵-۴-۳ نوار روها
۱۵۰	۵-۴-۴ مسأله‌ی استخدام فوری
۱۵۳	مسأله‌ها
۱۵۷	II مرتب‌سازی و آمارهای ترتیبی
۱۵۸	مقدمه
۱۶۳	۶- HeapSort
۱۶۳	۶-۱ Heap ها
۱۶۶	۶-۲ حفظ ویژگی Heap
۱۶۸	۶-۳ ساختن Heap
۱۷۰	۶-۴ الگوریتم HeapSort
۱۷۳	۶-۵ صف‌های اولویت
۱۷۷	مسأله‌ها
۱۷۹	۷- QuickSort
۱۷۹	۷-۱ تشریح QuickSort
۱۸۳	۷-۲ کارایی QuickSort
۱۸۷	۷-۳ نسخه‌ی تصادفی QuickSort
۱۸۸	۷-۴ تحلیل QuickSort
۱۸۸	۷-۴-۱ تحلیل بدترین حالت
۱۸۹	۷-۴-۲ امید ریاضی زمان اجرا
۱۹۳	مسأله‌ها
۱۹۹	۸- مرتب‌سازی با زمان خطی
۱۹۹	۸-۱ کران‌های پائین برای مرتب‌سازی
۲۰۲	۸-۲ مرتب‌سازی شمارشی
۲۰۵	۸-۳ مرتب‌سازی مینایی
۲۰۸	۸-۴ مرتب‌سازی پیمانه‌ای
۲۱۲	مسأله‌ها

۲۲۱	۹- میانه‌ها و آمارهای ترتیبی
۲۲۲	۹-۱ مینیمم و ماکزیمم
۲۲۳	۹-۲ انتخاب امید ریاضی زمان خطی
۲۲۷	۹-۳ انتخاب بدترین حالت در زمان خطی
۲۳۰	مسئله‌ها

۲۳۵	III ساختمان داده‌ها
۲۳۶	مقدمه
۲۳۹	۱۰- ساختمان داده‌های ساده
۲۳۹	۱۰-۱ پشته‌ها و صف‌ها
۲۴۲	۱۰-۲ لیست‌های پیوندی
۲۴۷	۱۰-۳ پیاده‌سازی اشاره‌گرها و اشیاء
۲۵۱	۱۰-۴ نمایش درخت‌های ریشه‌دار
۲۵۳	مسئله‌ها

۲۵۹	۱۱- جدول درهم‌ساز
۲۶۰	۱۱-۱ جدول‌های آدرس مستقیم
۲۶۱	۱۱-۲ جدول‌های درهم‌ساز
۲۶۷	۱۱-۳ تابع‌های درهم‌ساز
۲۶۹	۱۱-۳-۱ روش تقسیم
۲۶۹	۱۱-۳-۲ روش ضرب
۲۷۰	۱۱-۳-۳ درهم‌ساز جامع
۲۷۵	۱۱-۴ آدرس‌دهی باز
۲۸۳	۱۱-۵ درهم‌ساز کامل
۲۸۸	مسئله‌ها

۲۹۱	۱۲- درخت‌های جستجوی دودویی
۲۹۲	۱۲-۱ یک درخت جستجوی دودویی چیست؟
۲۹۴	۱۲-۲ پرس‌وجو در یک درخت جستجوی دودویی
۲۹۸	۱۲-۳ اضافه و حذف کردن گره‌ها (عضوها)
۳۰۳	۱۲-۴ * درخت‌های جستجوی دودویی به تصادف ساخته شده
۳۰۷	مسئله‌ها

۳۱۳	۱۳- درخت‌های قرمز-سیاه
۳۱۳	۱۳-۱ ویژگی‌های درخت‌های قرمز-سیاه
۳۱۷	۱۳-۲ دوران‌ها

۳۱۹.....	۱۳-۳ اضافه کردن گره
۳۲۶.....	۱۳-۴ حذف کردن گره
۳۳۳.....	مسئله‌ها

۳۴۱.....	۱۴-۱ ارتقاء ساختمان داده‌ها
۳۴۱.....	۱۴-۱-۱ آمار ترتیبی پویا
۳۴۶.....	۱۴-۲ چگونه یک ساختمان داده را ارتقاء دهیم؟
۳۴۹.....	۱۴-۳ درخت‌های بازه‌ای
۳۵۵.....	مسئله‌ها

۳۵۷.....	۱۷ روش‌های طراحی و تحلیل پیشرفته
۳۵۸.....	مقدمه
۳۶۱.....	۱۵-۱ برنامه‌ریزی پویا
۳۶۲.....	۱۵-۱-۱ برش میله
۳۷۱.....	۱۵-۲ ضرب زنجیره‌ای ماتریس‌ها
۳۷۹.....	۱۵-۳ عناصر برنامه‌ریزی پویا
۳۸۹.....	۱۵-۴ طولانی‌ترین زیردنباله‌ی مشترک
۳۹۵.....	۱۵-۵ درخت‌های جستجوی دودویی بهینه
۴۰۲.....	مسئله‌ها

۴۱۱.....	۱۶-۱ الگوریتم‌های حریصانه
۴۱۲.....	۱۶-۱-۱ مسئله‌ی انتخاب یک فعالیت
۴۱۹.....	۱۶-۲ عناصر روش حریصانه
۴۲۴.....	۱۶-۳ کدهای هافمن
۴۳۳.....	۱۶-۴ Matroid ها و روش‌های حریصانه
۴۳۹.....	۱۶-۵ یک مسئله‌ی زمان‌بندی کار به صورت یک matroid
۴۴۳.....	مسئله‌ها

۴۴۷.....	۱۷-۱ تحلیل سرشکن شده
۴۴۸.....	۱۷-۱-۱ تحلیل تجمعی
۴۵۲.....	۱۷-۲ روش حسابداری
۴۵۴.....	۱۷-۳ روش پتانسیل
۴۵۸.....	۱۷-۴ جدول‌های پویا
۴۵۹.....	۱۷-۴-۱ ببط جدول
۴۶۲.....	۱۷-۴-۲ بزرگ و کوچک کردن جدول
۴۶۶.....	مسئله‌ها

۴۷۳	 ۷ ساختمان داده‌های پیشرفته
۴۷۴	 مقدمه
۴۷۷	 Tree - B - ۱۸ ها
۴۸۱	 ۱-۱۸ تعریف Tree-B ها
۴۸۴	 ۲-۱۸ عملیات اصلی بر روی Tree - B ها
۴۹۱	 ۳-۱۸ حذف یک کلید از Tree - B
۴۹۵	 مسأله‌ها
۴۹۹	 ۱۹- Heap های فیبوناچی
۵۰۱	 ۱-۱۹ ساختار Heap های فیبوناچی
۵۰۴	 ۲-۱۹ عملیات Heap ادغام‌پذیر
۵۱۲	 ۳-۱۹ کاهش یک کلید و حذف یک گره
۵۱۶	 ۴-۱۹ کران‌دار کردن درجه‌ی ماگزیمم
۵۱۹	 مسأله‌ها
۵۲۵	 ۲۰- درخت‌های van Emde Boas
۵۲۶	 ۱-۲۰ روش‌های مقدماتی
۵۳۰	 ۲-۲۰ یک ساختار بازگشتی
۵۳۱	 ۱-۲-۲۰ ساختمان‌های Proto van Emde Boas
۵۳۴	 ۲-۲-۲۰ عملیات بر روی یک ساختار نخستین Proto van Emde Boas
۵۳۹	 ۳-۲۰ درخت van Emde Boas
۵۳۹	 ۱-۳-۲۰ درخت‌های van Emde Boas
۵۴۲	 ۲-۳-۲۰ عملیات بر روی یک درخت van Emde Boas
۵۴۹	 مسأله‌ها
۵۵۳	 ۲۱- ساختمان داده‌های مجموعه‌های جدا از هم
۵۵۳	 ۱-۲۱ عملیات بر روی مجموعه‌های جدا از هم
۵۵۶	 ۲-۲۱ نمایش مجموعه‌های جدا از هم به صورت لیست پیوندی
۵۶۰	 ۳-۲۱ جنگل‌هایی از مجموعه‌های جدا از هم
۵۶۴	 ۴-۲۱ تحلیل اجتماع از طریق رتبه با فشرده‌سازی مسیر
۵۷۳	 مسأله‌ها
۵۷۷	 VI الگوریتم‌های گراف
۵۷۸	 مقدمه
۵۸۱	 ۲۲- الگوریتم گراف‌های مقدماتی
۵۸۱	 ۱-۲۲ نمایش‌های گراف



۵۸۵	۲۲- جستجوی اول عرض
۵۹۴	۲۲- جستجوی اول عمق
۶۰۳	۲۲- مرتب‌سازی موضعی
۶۰۶	۲۲- مولفه‌های همبند قوی
۶۱۱	مسئله‌ها
۶۱۵	۲۲- درخت‌های پوشای مینیمم
۶۱۶	۲۲- رشد یک درخت پوشای مینیمم
۶۲۱	۲۲- الگوریتم‌های کروسکل و پریم
۶۲۸	مسئله‌ها
۶۳۳	۲۴- کوتاه‌ترین مسیرها از مبدأ واحد
۶۴۱	۲۴-۱ الگوریتم بلمن - فورد
۶۴۵	۲۴-۲ کوتاه‌ترین مسیرها از مبدأ واحد در گراف‌های بدون دور جهت‌دار
۶۴۷	۲۴-۳ الگوریتم دیکسترا
۶۵۳	۲۴-۴ شرط‌های تفاضلی و کوتاه‌ترین مسیرها
۶۵۹	۲۴-۵ اثبات ویژگی‌های کوتاه‌ترین مسیرها
۶۶۶	مسئله‌ها
۶۷۳	۲۵- کوتاه‌ترین مسیرها بین تمام جفت رأس‌ها
۶۷۵	۲۵-۱ کوتاه‌ترین مسیرها و ضرب ماتریس‌ها
۶۸۱	۲۵-۲ الگوریتم فلویید - وارشال
۶۸۸	۲۵-۳ الگوریتم جانسون برای گراف‌های خلوت
۶۹۳	مسئله‌ها
۶۹۷	۲۶- جریان ماگزیمم
۶۹۸	۲۶-۱ شبکه‌های جریان
۷۰۳	۲۶-۲ روش فورد - فولکرسون
۷۲۰	۲۶-۳ تطبیق دوبخشی ماگزیمم
۷۲۴	۲۶-۴ الگوریتم‌های راندن - برچسب‌دهی مجدد
۷۳۷	۲۶-۵ الگوریتم برچسب‌دهی مجدد به جلو
۷۴۸	مسئله‌ها
۷۵۵	واژه‌نامه‌ی الگوریتم‌ها
۷۹۵	واژه‌یاب الگوریتم‌ها