

طراحی و تحلیل الگوریتم‌ها

مؤلف:

مهندس ابوالفضل اسفندی

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد



۱۳۹۲

سرشناسه	: اسفندی، ابوالفضل
عنوان و نام پدیدآور	: طراحی و تحلیل الگوریتم ها/ مولف ابوالفضل اسفندی.
مشخصات نشر	: بروجرد: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بروجرد، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	: ۳۰۶ص.
شابک	: 978-964-10-2413-2 : ۷۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
موضوع	: الگوریتم‌های کامپیوتری
شناسه افزوده	: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بروجرد
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۲ الف ۹/۵ الف ۷۶/۹ QA
رده بندی دیویی	: ۰۰۵/۱۲۰۳۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۲۵۷۲۶۷



دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد

طراحی و تحلیل الگوریتم‌ها

مؤلف:

مهندس ابوالفضل اسفندی

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد

مدیر مسؤول: دکتر علی آریاپور

ناظر چاپ: حسام‌الدین یاریار

چاپ و صحافی: نویسنده

نوبت چاپ: اول/ ۱۳۹۲

شمارگان: ۳۰۰۰

بها: ۷۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۱۰-۲۴۱۳-۲

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

بروجرد- میدان نواب - خیابان یادگار امام - مجتمع دانشگاهی امام خمینی (ره)
تلفکس ۰۶۶۲-۳۵۱۸۰۱۳

Email: Publisher@iaub.ac.ir

سخن ناشر

به نام خداوند لوح و قلم حقیقت نگار وجود و عدم
خدایی که دانسته رازهاست نخستین سرآغاز آغازهاست

دانشگاه آزاد اسلامی، به عنوان یکی از ارکان نظام آموزش عالی کشور در چشم انداز بیست ساله خود، توسعه کیفی را به طور جدی مدنظر قرار داده است. دانشگاه آزاد اسلامی بروجرد به عنوان یکی از باسابقه ترین واحدهای دانشگاهی سطح کشور با عنایت به پتانسیل های موجود و در راستای این حرکت عظیم علمی و فرهنگی و به منظور ایجاد سرعت، دقت و هماهنگی بیشتر در اجرای کلیه امور مربوط به تأمین منابع آموزشی مورد نیاز و همچنین تشویق و ترغیب محققان، مؤلفان و مترجمان دانشگاهی به نگارش و ترجمه کتب معتبر علمی، شورای انتشارات علمی خود را تشکیل داد. بدیهی است که ورود به این عرصه خطیر جز با استمداد از خداوند متعال و چشم یاری داشتن از محققان و پژوهشگران و استادان ارجمند امکان پذیر نیست. لذا از همه صاحب نظران ارجمند دعوت می شود ما را از نقطه نظرها و راهنمایی های ارزشمند خود بهره مند سازند. در پایان بر خود لازم می دانم از جناب آقای دکتر فرهاد دانشجو ریاست دانشگاه آزاد اسلامی، معاون محترم پژوهشی دانشگاه به سبب برقراری شرایط و بستر مناسب انجام فعالیت های حوزه پژوهش واحد در بخش توسعه فعالیت های چاپ و نشر، تشکر و قدردانی نمایم. ضمناً شایسته است از فعالیت ها و تلاش های علمی آقای مهندس ابوالفضل اسفندی در تألیف کتاب طراحی و تحلیل الگوریتم ها مراتب سپاسگزاری خود را ابراز نمایم.

دکتر احمد سیف

رئیس دانشگاه آزاد اسلامی بروجرد

پیشگفتار

در دنیای امروز، نرم افزارهای رایانه‌ای بخش اعظمی از زندگی انسان‌ها را در زمینه‌های مختلف مثل صنعت، بهداشت و علوم پزشکی، امور نظامی، اتوماسیون‌های اداری و اجتماعی و در کل همه جنبه‌های زندگی آن‌ها را در بر گرفته است. به طوری که چه در سطح کلان و ملی و چه در حد زندگی روزمره افراد، نقش بسیار مهم و حساسی ایفا می‌کند و نادیده گرفتن آن تقریباً غیر ممکن شده است. حال با توجه به این اهمیت فراوان، انتظارات و توقعات افراد از سیستم‌ها و نرم افزارهای رایانه‌ای نیز روز به روز بیشتر شده است، به طوری که انتظار استفاده از سیستم‌هایی با قابلیت‌های بیشتر، کارآمد تر و امن تر را دارند و این افزایش تقاضاها باعث پیچیدگی بیشتر الگوریتم‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها می‌شود، که شاید تناقضی با نیاز زندگی‌های امروزی بشر یعنی کارایی این سیستم‌ها در بحث سرعت پردازشی و پاسخگویی برای صرف زمان کمتر خواهد بود.

پس پاسخگویی به این مشکل و رفع این تناقض و تمرکز بر آن بسیار حیاتی به نظر می‌رسد، بنابراین طراحان و سازندگان آینده این نرم افزارها، یعنی دانشجویان فعلی، می‌بایست پس از آشنایی اولیه با برنامه‌سازی و ابزارهای مورد استفاده، قبل از هر چیز دیگر، با نحوه طراحی الگوریتم‌هایی موثر و کارا که تا حد امکان علاوه بر پاسخگویی به نیاز کاربران، کارایی لازم را نیز داشته باشند، آشنا شده و بتوانند الگوریتم‌های مختلف را تحلیل و با هم مقایسه کنند.

در زمینه درس طراحی الگوریتم‌ها، مراجع و کتاب‌های بسیار عالی و معتبری مانند دو کتاب بسیار ارزشمند: [Cormen, Leiserson, Revest and Stein "Introduction to Algorithms"] و [Neapolitan and Naimipour "Foundations Of Algorithms Using C++ Pseudo code"] وجود داشته به طوری که در اکثر دانشگاه‌ها تدریس آن‌ها متداول شده است و شاید این کتاب حاضر در مقایسه با آن‌ها جای نقد بسیار دارد. اما اگر به نحوه استفاده و تدریس این مراجع در دانشگاه‌های مختلف دقت شود، می‌بینید که غالباً به دلیل حجم زیاد مطالب، بیان مسائل و فصل‌هایی که خارج از سرفصل مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در کشور ما بوده، بخش‌های اعظمی از آن‌ها هیچ‌گاه مورد استفاده و بحث قرار نمی‌گیرد.

به علاوه گاهی نبود یک روند منطقی در این کتاب‌ها و بریدگی مطالب و در برخی موارد با اضافه شدن ترجمه‌های نامناسب، بیشتر باعث سر در گمی دانشجویان و عدم بهره‌گیری مناسب و فهم درست مطالب از این کتاب‌ها شده است، به طوری که به دلیل مجموعه این عوامل گاهی دیده می‌شود که برخی دانشجویان ضعیف‌تر با وجود مطالب بسیار کامل، جامع و دقیق این کتاب‌ها از آن‌ها فراری هستند!!

بنابراین با توجه به اینکه درس طراحی الگوریتم، یکی از دروس بسیار مهم رشته کامپیوتر در مقاطع و آزمون‌های مختلف می‌باشد، بر آن شدیم که با استفاده از همین مراجع ارزشمند به خصوص با تمرکز بیشتر بر مرجع اول، یعنی کتاب "Introduction to Algorithms"، سعی در بیان مطالب آن‌ها به شیوه‌ای روان‌تر و قابل فهم‌تر کنیم، به طوری که با حفظ مطابقت با سرفصل مصوب، از بیان مطالب اضافه و شاید بی استفاده خودداری کرده و تمرکز خود را بجای افزایش تعداد صفحات کتاب، بر روی توضیح مطالب گاه‌آ پیچیده این درس به زبان ساده و کاربردی که حتی برای دانشجویان لات بخش هم باشد، قرار دادیم. در ضمن تا حد امکان از ورود و پرداختن به مباحث پیچیده ریاضی و اثبات‌های غیر ضروری، اجتناب کرده‌ایم.

کتاب "طراحی و تحلیل الگوریتم‌ها" برای دانشجویان رشته کامپیوتر و کلیه افراد دخیل در بحث برنامه‌نویسی نرم افزار و الگوریتم نویسی، نوشته شده است. در این کتاب سعی شده در کمال سادگی و مختصر گویی، کلیه مطالب مورد نیاز دانش پژوهان به همراه مثال‌هایی کاربردی ارائه گردد و کم‌ترین ارجاع به مطالب درس‌های دیگر را داشته باشد و هر جا نیز به اطلاعاتی مقدماتی نیاز بوده است، سعی شده که یادآوری از آن مطالب ذکر گردد. همچنین این کتاب برای داوطلبان کنکورهای کارشناسی ارشد و دکتری و نیز دانش آموزانی که خود را برای دوره‌های المپیاد رایانه آماده می‌کنند، می‌تواند به صورت مفید و قابل استفاده باشد. علاوه بر این ویژگی‌ها، کتاب حاضر بیش از ۹۰ درصد از مطالب درس طراحی الگوریتم‌ها، مطابق با سرفصل مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری را در بر می‌گیرد.

امید است که این کتاب بتواند در فراگیری بهتر دانشجویان و بهره‌گیری از مفاهیم بسیار جالب و زیبای این درس، تأثیری کوچک داشته باشد. البته به خوانندگان پیشنهاد می‌شود که قبل از خواندن این کتاب، مروری بر مطالب کتاب‌های ساختمان داده‌ها و زبان‌های برنامه‌سازی مانند C++ داشته باشند.

ساختار کتاب

این کتاب برای حفظ یک روند منطقی همراه با پیوستگی مطالب و بریده نشدن آن‌ها و جلوگیری از سردرگمی دانشجو در انبوهی از مطالب، در ۱۰ فصل مجزا به صورت زیر سازماندهی شده است:

- فصل اول. الگوریتم‌ها و نحوه تحلیل آن: در این فصل ابتدا به تعریف الگوریتم و مفاهیم وابسته به آن پرداخته و سپس به نحوه تحلیل و مقایسه الگوریتم‌ها از جنبه‌های مختلف می‌پردازیم. در ضمن با توجه به آنکه مهم‌ترین مسئله در بحث تحلیل الگوریتم‌ها، مسئله زمان اجرا و پیچیدگی زمانی یک الگوریتم است، به طور کامل همراه با بررسی چند الگوریتم معروف، به این بحث پرداخته می‌شود.
- فصل دوم. روابط بازگشتی و حل آن‌ها: در فصل دوم، ابتدا با روابط بازگشتی جهت یادآوری از درس ساختمان داده‌ها، آشنا شده و سپس روش‌های مختلف حل این گونه روابط را با ذکر مثال‌هایی بررسی می‌کنیم.
- فصل سوم. روش تقسیم و حل: در این فصل با ساختار کلی روش تقسیم و حل آشنا شده و با بررسی الگوریتم‌های مختلفی، مانند چندین روش مرتب‌سازی که به این روش حل می‌شوند، دانشجو را با نحوه به کارگیری آن آشنا می‌کنیم.
- فصل چهارم. مرتب‌سازی هرمی و صف اولویت: هدف از این فصل آشنایی با داده ساختار Heap و دو کاربرد آن یعنی مرتب‌سازی هرمی و صف اولویت آشنا می‌شویم، که در آن مرتب‌سازی هرمی در ادامه الگوریتم‌های مرتب‌سازی فصل سوم و صف اولویت به دلیل کاربرد بسیار زیاد در الگوریتم‌های مختلف بررسی می‌شود.
- فصل پنجم. مرتب‌سازی‌های خطی: در فصل پنجم سه الگوریتم مرتب‌سازی خاص که برخلاف الگوریتم‌های مرتب‌سازی فصل‌های قبل، با ساختاری متفاوت در زمان خطی قادر به مرتب‌سازی عناصر هستند، آشنا می‌شویم.
- فصل ششم. روش‌های مبتنی بر استقرا و برنامه‌ریزی پویا: در این فصل دو روش متداول دیگر از روش‌های طراحی الگوریتم را به صورت جداگانه بررسی می‌کنیم. در هر یک از این روش‌ها، پس از بیان روش کار هر یک، مثال‌های متنوعی را به خصوص برای روش برنامه‌ریزی پویا که نوعی روش بهینه‌سازی است، بررسی می‌دهیم.

- فصل هفتم. روش حریصانه: هدف از این فصل بررسی یکی از روش‌های ساده طراحی الگوریتم با نام روش حریصانه می‌باشد که ایده ارائه آن‌ها بسیار ساده بوده و در زندگی روزمره نیز بکار گرفته می‌شوند، اما در عین سادگی نیاز به اثبات درستی روش پیشنهادی دارند.
 - فصل هشتم. الگوریتم‌های گراف: در این فصل ابتدا به بررسی مقدماتی گراف‌ها و روش‌های نمایش گراف‌ها آشنا شده و سپس به بررسی و تحلیل الگوریتم‌های مختلف آن‌ها مانند الگوریتم‌های درخت پوشای کمینه و یافتن کوتاه‌ترین مسیرها در یک گراف می‌پردازیم.
 - فصل نهم. جستجوی فضای حالت: در فصل نهم با مجموعه روش‌هایی برای طراحی الگوریتم که در آن‌ها نحوه کار بررسی فضای حالات ممکن برای جواب است، مانند روش‌های پس‌گرد و انشعاب و تحدید آشنا می‌شویم.
 - فصل دهم. پیچیدگی محاسباتی و نظریه NP: هدف از این فصل بررسی بعضی از مفاهیم که در بحث پیچیدگی‌های الگوریتم‌ها و محاسبه زمان اجرای آن‌ها و طبقه‌بندی الگوریتم‌ها مطرح می‌شود و به خصوص نظریه NP و مفاهیم وابسته به آن می‌باشد.
- در اینجا لازم می‌دانم که از جناب آقای دکتر احمد سیف ریاست دانشگاه آزاد اسلامی بروجرد، دکتر احمد شاهسواران معاونت پژوهش و فناوری و مهندس یاریار مدیر انتشارات علمی بروجرد به خاطر همکاری‌های بی‌دریغشان قدردانی کرده و از آقای مهندس حسین عسگرپور که در نوشتن این کتاب کمک‌های شایان نمودند، تشکر ویژه‌ای داشته باشم. همچنین از داوران محترم که با نظرات اصلاحی و سازنده خود موجب ارتقای علمی این کتاب شده‌اند، سپاسگزارم و البته قدردانی و تشکری مخصوص و خاضعانه از استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر حمید ضرابی زاده دارم که همیشه خود را مدیون ایشان دانسته و آموخته‌های ناچیزم در این زمینه را از ایشان می‌دانم.
- کتاب حاضر دسترنج ۷ سال تدریس درس طراحی الگوریتم‌ها می‌باشد، لیکن نمی‌تواند خالی از ایراد و اشکال علمی و چاپی باشد. بدیهی است که فرستادن راهنمایی‌ها و انتقادات سازنده اساتید، دانشجویان و سایر دانش پژوهان به آدرس ناشر یا ایمیل اینجانب (AESfandi@IAUB.AC.IR) می‌تواند موجب تصحیح کتاب و دلگرمی نویسنده گردد.

فهرست مطالب

فصل اول: الگوریتم‌ها و نحوه تحلیل آن‌ها

۱-۱ مقدمه	۲۴
۲-۱ آشنایی با الگوریتم	۲۴
۳-۱ تحلیل الگوریتم‌ها	۲۶
۴-۱ مرتبه الگوریتم و توابع رشد	۲۷
۱-۴-۱ توابع رشد	۲۷
۲-۴-۱ قضایا و خواص مربوط به نمادها	۳۰
۵-۱ محاسبه زمان اجرا	۳۱
۶-۱ جستجوی خطی	۳۵
۷-۱ مرتب‌سازی درجی	۳۶
۸-۱ تحلیل الگوریتم	۳۸
۹-۱ تمرینات فصل اول	۴۳
۱۰-۱ تست‌های فصل اول	۴۵

فصل دوم: روابط بازگشتی و حل آن‌ها

۱-۲ مقدمه	۵۰
۲-۲ روش جایگذاری (حدس و استقرا)	۵۱
۳-۲ روش درخت بازگشت	۵۳
۴-۲ قضیه اصلی	۵۴
۵-۲ روش‌های حل رابطه‌های بازگشتی همگن و غیر همگن	۵۸
۱-۵-۲ رابطه‌های بازگشتی همگن	۵۸
۲-۵-۲ رابطه‌های بازگشتی غیر همگن	۵۹

۶۰	۶-۲ تکنیک تغییر متغیر
۶۱	۷-۲ برخی روابط ریاضی
۶۳	۸-۲ تمرینات فصل دوم
۶۵	۹-۲ تست‌های فصل دوم

فصل سوم: روش تقسیم و حل

۶۸	۱-۳ مقدمه
۶۸	۲-۳ ساختار روش تقسیم و حل
۶۹	۳-۳ جستجوی دودویی
۷۱	۴-۳ مرتب‌سازی ادغامی
۷۸	۵-۳ ضرب دو عدد n بیتی
۸۲	۶-۳ مرتب‌سازی سریع
۸۲	۱-۶-۳ نحوه کار مرتب‌سازی سریع
۹۰	۲-۶-۳ نسخه‌های دیگر مرتب‌سازی سریع (مرتب‌سازی سریع تصادفی)
۹۱	۳-۶-۳ چرا مرتب‌سازی سریع؟!
۹۳	۷-۳ یافتن مرتبه آماری k ام
۹۳	۱-۷-۳ یافتن بزرگ‌ترین عنصر
۹۴	۲-۷-۳ یافتن بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عنصر
۹۶	۳-۷-۳ یافتن دومین بزرگ‌ترین عنصر
۹۸	۴-۷-۳ یافتن k امین عنصر کوچک‌تر
۱۰۰	۸-۳ ضرب ماتریسی استراسن
۱۰۶	۹-۳ تمرینات فصل سوم
۱۱۰	۱۰-۳ تست‌های فصل سوم
۱۱۳	مرتب‌سازی هرمی و صف اولویت

فصل چهارم: مرتب‌سازی هرمی و صف اولویت

۱۱۴	۱-۴ مقدمه
۱۱۴	۲-۴ درخت Heap
۱۱۷	۳-۴ مرتب‌سازی هرمی
۱۱۷	۱-۳-۴ بازسازی مجدد heap

۱۱۹	 ۲-۳-۴ ساخت heap
۱۲۱	 ۳-۳-۴ مرتب سازی
۱۲۳	 ۴-۴ صف اولویت
۱۲۷	 ۵-۴ تمرینات فصل چهارم
۱۲۹	 ۶-۴ تست های فصل چهارم

فصل پنجم: مرتب سازی های خطی

۱۳۴	 ۱-۵ مقدمه
۱۳۵	 ۲-۵ مرتب سازی شمارشی
۱۳۷	 ۳-۵ مرتب سازی سطلی
۱۳۹	 ۴-۵ مرتب سازی مبنایی (Radix Sort)
۱۴۳	 ۵-۵ تمرینات فصل پنجم
۱۴۵	 ۶-۵ تست های فصل پنجم

فصل ششم: روش های مبتنی بر استقرا و برنامه ریزی پویا

۱۴۸	 ۱-۶ مقدمه
۱۴۸	 ۲-۶ روش مبتنی بر استقرا
۱۴۹	 ۱-۲-۶ مسئله ستاره مشهور
۱۵۴	 ۳-۶ روش برنامه ریزی پویا
۱۵۵	 ۱-۳-۶ یافتن n امین جمله فیبوناچی
۱۵۷	 ۲-۳-۶ ترکیب k از n
۱۶۰	 ۳-۳-۶ ضرب زنجیره ای ماتریس ها
۱۶۹	 ۴-۳-۶ بزرگ ترین زیر دنباله مشترک
۱۷۴	 ۵-۳-۶ مثلث بندی بهینه یک چند ضلعی محدب
۱۷۷	 ۶-۳-۶ مسئله کوله پشتی
۱۸۳	 ۴-۶ تمرینات فصل ششم
۱۸۶	 ۵-۶ تست های فصل ششم

فصل هفتم: روش حریصانه

۱۹۰	 ۱-۷ مقدمه
-----	-----------------

۱۹۰	۲-۷ خرد کردن پول
۱۹۳	۳-۷ مسئله کوله‌پشتی
۱۹۴	۱-۳-۷ روش حریصانه برای حل کوله‌پشتی صفر و یک
۱۹۵	۲-۳-۷ روش حریصانه برای حل کوله‌پشتی کسری
۱۹۶	۴-۷ مسئله زمان‌بندی کلاس‌ها
۲۰۰	۵-۷ زمان‌بندی با مهلت معین
۲۰۵	۶-۷ کد هافمن
۲۱۴	۷-۷ تمرینات فصل هفتم
۲۱۶	۸-۷ تست‌های فصل هفتم
۲۱۷	الگوریتم‌های گراف

فصل هشتم: الگوریتم‌های گراف

۲۱۸	۱-۸ مقدمه
۲۱۸	۲-۸ روش‌های نمایش گراف
۲۲۱	۳-۸ جستجوی اول عمق
۲۲۴	۴-۸ جستجوی اول سطح
۲۲۷	۵-۸ مرتب‌سازی توپولوژیکی
۲۲۸	۶-۸ درخت پوشای کمینه
۲۳۱	۱-۶-۸ الگوریتم پریم
۲۳۶	۲-۶-۸ الگوریتم کروسکال
۲۳۹	۷-۸ یافتن کوتاه‌ترین مسیر
۲۴۱	۱-۷-۸ کوتاه‌ترین مسیرها از یک مبدأ واحد (یا مقصدی واحد)
۲۴۳	۱-۱-۷-۸ الگوریتم بلمن-فورد
۲۴۶	۲-۱-۷-۸ الگوریتم دیکسترا
۲۵۰	۲-۷-۸ کوتاه‌ترین مسیر بین همه جفت راس‌ها
۲۵۱	۱-۲-۷-۸ الگوریتم فلویید-وارشال
۲۵۶	۲-۲-۷-۸ الگوریتم جانسون
۲۶۰	۸-۸ تمرینات فصل هشتم
۲۶۳	۹-۸ تست‌های فصل هشتم

فصل نهم: جستجوی فضای حالت

۲۶۶	۱-۹ مقدمه
۲۶۷	۲-۹ روش پس‌گرد
۲۶۸	۱-۲-۹ مولد ترکیبات
۲۶۹	۲-۲-۹ مسئله n وزیر
۲۷۵	۳-۹ درخت بازی
۲۷۷	۴-۹ محدود کردن فضای حالت
۲۷۸	۱-۴-۹ هرس کردن
۲۷۹	۲-۴-۹ انشعاب و تحدید
۲۸۰	۱-۲-۴-۹ فروتنده دوره گرد
۲۸۴	۵-۹ تمرینات فصل نهم
۲۸۶	۶-۹ تست‌های فصل نهم

فصل دهم: پیچیدگی محاسباتی و نظریه NP

۲۹۰	۱-۱۰ مقدمه
۲۹۰	۲-۱۰ کنترل ناپذیری
۲۹۲	۳-۱۰ نظریه NP
۲۹۳	۱-۳-۱۰ مجموعه‌های P و NP
۲۹۵	۲-۳-۱۰ مسائل NP کامل
۲۹۸	۳-۳-۱۰ تعمیم مجموعه NP
۳۰۲	۴-۱۰ تمرینات فصل دهم
۳۰۳	۵-۱۰ تست‌های فصل دهم
۳۰۵	منابع و مراجع انگلیسی
۳۰۶	منابع و مراجع فارسی

فهرست امثال

- شکل ۱-۱: نمادهای Θ , O , Ω بصورت نموداری ۲۹
- شکل ۱-۲: نمودار زمان اجرای سه الگوریتم مختلف یافتن دنباله فیبوناچی ۳۵
- شکل ۱-۳: مرتب کردن ورق‌ها با استفاده از مرتب‌سازی درجی ۳۷
- شکل ۱-۴: عملکرد الگوریتم مرتب‌سازی درجی ۳۸
- شکل ۱-۵: نمودار زمان اجرای الگوریتم مرتب‌سازی درجی ۴۱
- شکل ۳-۱: عملکرد الگوریتم MERGE ۷۴
- شکل ۳-۲: عملکرد الگوریتم مرتب‌سازی ادغامی ۷۶
- شکل ۳-۳: عملکرد الگوریتم مرتب‌سازی سریع و زیرروال PARTITION ۸۵
- شکل ۳-۴: درخت بازگشت مربوط به مرتب‌سازی سریع در حالت تقسیم‌بندی متعادل ۸۹
- شکل ۳-۵: درخت تصمیم‌گیری برای مرتب‌سازی سه عدد ۹۲
- شکل ۳-۶: ساختار تورنمنتی برای یافتن بزرگ‌ترین و دومین بزرگ‌ترین ۹۷
- شکل ۴-۱: شکل یک درخت Max-Heap و آرایه متناظر آن ۱۱۵
- شکل ۴-۲: شش درخت اول فیبوناچی ۱۱۶
- شکل ۴-۳: نحوه عملکرد زیرروال MAX-HEAPIFY ۱۱۸
- شکل ۴-۴: نحوه عملکرد زیرروال Build-Max-Heap ۱۲۰
- شکل ۴-۵: عملکرد الگوریتم مرتب‌سازی هرمی ۱۲۲
- شکل ۴-۶: عملکرد الگوریتم HEAP-INCREASE-KEY ۱۲۵
- شکل ۵-۱: نحوه عملکرد الگوریتم مرتب‌سازی شمارشی ۱۳۶

- شکل ۵-۲: نحوه عملکرد الگوریتم مرتب‌سازی سطلی ۱۳۸
- شکل ۵-۳: نحوه عملکرد الگوریتم مرتب‌سازی مبنایی ۱۳۹
- شکل ۵-۴: جدول مقایسه الگوریتم‌های مرتب‌سازی مختلف ۱۴۱
- شکل ۶-۱: سوالات مورد نیاز برای تعیین ستاره مشهور نهایی ۱۵۰
- شکل ۶-۲: سوالات لازم برای تعیین ستاره مشهور از بین x و y ۱۵۲
- شکل ۶-۳: درخت بازگشت حاصل از محاسبه جمله ششم دنباله فیوناچی ۱۵۶
- شکل ۶-۴: درخت بازگشت حاصل از محاسبه (g_5) ۱۵۹
- شکل ۶-۵: تناظر مسئله‌های ضرب زنجیره ماتریس‌ها و مثلث بندی چندضلعی محدب ۱۷۶
- شکل ۷-۱: کلاس‌های پیشنهادی برای انتخاب ۱۹۶
- شکل ۷-۲: کلاس‌های پیشنهادی برای مرتب‌سازی بر اساس زمان پایان ۱۹۸
- شکل ۷-۳: تعداد تکرار حروف و کدهای آن‌ها در دو حالت با طول ثابت و متغیر ۲۰۶
- شکل ۷-۴: درخت‌های مربوط به هر دو روش کد با طول ثابت و متغیر ۲۰۷
- شکل ۷-۵: درخت حاصل از الگوریتم هافمن ۲۱۰
- شکل ۷-۶: تشریح مراحل اصلی در اثبات لم ۷-۳ ۲۱۲
- شکل ۸-۱: دو نمایش استاندارد برای یک گراف بدون جهت ۲۱۹
- شکل ۸-۲: دو نمایش استاندارد برای یک گراف جهت‌دار ۲۱۹
- شکل ۸-۳: نحوه عملکرد مرتب‌سازی توپولوژیکی بر روی یک DAG ۲۲۸
- شکل ۸-۴: نحوه عملکرد الگوریتم پریم ۲۳۲
- شکل ۸-۵: نحوه عملکرد الگوریتم کروسکال ۲۳۷
- شکل ۸-۶: تأثیر وزن‌های منفی در گراف‌های جهت‌دار ۲۴۲
- شکل ۸-۷: یافتن مسیر کوتاه‌تر برای رأس u از طریق یال v به u ۲۴۳
- شکل ۸-۸: نحوه عملکرد الگوریتم بلمن - فورد ۲۴۵
- شکل ۸-۹: مقادیر آرایه‌های d و π در اجرای الگوریتم بلمن - فورد ۲۴۵
- شکل ۸-۱۰: نحوه عملکرد الگوریتم دیکسترا ۲۴۸
- شکل ۸-۱۱: مقادیر آرایه‌های d و π در اجرای الگوریتم دیکسترا ۲۴۸

- شکل ۸-۱۲: مقادیر آرایه‌های D و Π در اجرای الگوریتم فلوید-وارشال..... ۲۵۵
- شکل ۸-۱۳: نحوه وزن دهی مجدد گراف..... ۲۵۷
- شکل ۹-۱: درخت مربوط به مولد ترکیبات برای سه عدد..... ۲۶۹
- شکل ۹-۲: فراخوانی الگوریتم PERM برای مجموعه سه عنصری $A=\{a,b,c\}$ ۲۶۹
- شکل ۹-۳: نحوه عملکرد الگوریتم روش اول پس گرد برای چهار وزیر..... ۲۷۱
- شکل ۹-۴: درخت جستجوی مربوط به چهار وزیر..... ۲۷۳
- شکل ۹-۵: نحوه عملکرد الگوریتم روش سوم پس گرد برای چهار وزیر..... ۲۷۵
- شکل ۹-۶: ساختار کلی یک درخت بازی..... ۲۷۶
- شکل ۹-۷: بخشی از درخت بازی MIN-MAX مربوط به بازی X-O..... ۲۷۷
- شکل ۹-۸: نحوه هرس کردن شاخه‌های بیهوده..... ۲۷۸
- شکل ۹-۹: نمونه‌ای از یک هرس $\alpha-\beta$ ۲۷۹
- شکل ۹-۱۰: گراف متناظر با شهرها و راه‌های مابین..... ۲۸۰
- شکل ۹-۱۱: درخت جستجوی مربوط به مسئله فروشندگی دوره گرد..... ۲۸۲
- شکل ۹-۱۲: تور همبستگی یافت شده با حداقل هزینه..... ۲۸۳
- شکل ۱۰-۱: طبقه بندی مجموعه مسائل..... ۲۹۵
- شکل ۱۰-۲: جایگاه مجموعه NP-کامل..... ۲۹۷