

ساختمان داده ها در C++

C++



مؤلفین:

امیرامیدی عضو هیات علم دانشگاه

کیومرث عبدی مدرس مراکز آموزش عالی

سرشناسه	: امید، امیر، ۱۳۶۱ -
عنوان و نام پدیدآور	: ساختمان داده‌ها در ++C / تألیف امیر امید، کیومرث عبدی .
مشخصات نشر	: تبریز: اطرهان، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۱۸۴ ص.: مصور، جدول .
شابک	: ۸۰۰۰ ریال 9-05-7014-600-978
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
موضوع	: سی ++ (زبان برنامه نویسی کامپیوتر)
موضوع	: ساختار داده‌ها
شناسه آشنایان	: عبدی، کیومرث، ۱۳۵۱ -
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ الف۲س/۹ /QAV۶
رده بندی دیویی	: ۰۰۵/۷۳
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۴۰۳۳۷۰



انتشارات آشینا

شابک ۹۷۸ - ۶۰۰ - ۷۰۱۴ - ۵۰۹



انتشارات اطرهان

نام کتاب	: ساختمان داده‌ها در ++C - قسمت اول
مؤلفین	: امیر امید - کیومرث عبدی
ناشر	: انتشارات اطرهان
نوبت چاپ	: اول - بهار ۱۳۹۳
تعداد صفحه و قطع	: ۱۸۴ صفحه - وزیری
تیراژ	: ۱۰۰۰ نسخه
حروفچینی	: موسسه آشینا
لینوگرافی	: چاردیز
چاپ و صحافی	: لک لری
قیمت	: ۸۰۰۰ تومان

مسئولیت کلیه مطالب به عهده مؤلفین بوده و حق چاپ برای ناشر محفوظ می‌باشد. هر گونه کپی برداری پیگرد قانونی دارد

مراکز پخش:

انتشارات آشینا - انتشارات فن آذر - انتشارات اطرهان

تبریز - خیابان امام - بازار بزرگ تربیت - طبقه پائین - پلاک ۷ ■ : ۵۵۳۶۱۹۶ - ۰۳ - ۵۵۳۸۶

تبریز - خیابان جمهوری اسلامی - بن بست علیخان - پلاک ۲۰ ■ : ۵۵۶۳۱۰۳ - ۵۵۶۸۳۳۴

سخن ناشر

بنام یزدان پاک که تفکر را در جهت کسب دانش و معرفت به بشر ارزانی داشت. بسیار خوشحالیم که بار دیگر ایزد «کتا» توفیق داد تا با ارائه مجموعه ای دیگر در خدمت دانش پژوهان گرامی باشیم.

بحث «چگانه» داده یکی از مباحث مهم در علوم کامپیوتر و رشته های مرتبط بوده که در جهت سازمان دهی انواع داده ها در زمینه های مختلف کاربرد دارد.

کتاب ساختمان داده ها به زبان C++ تألیف آقایان مهندس امیدی و کیومرث عبدی بوده که شامل سر فصل های مصوب دانشگاه صنعتی اصفهان است به عنوان مرجعی کامل جهت استفاده دانش پژوهان علاقمند آماده شده است.

در این جا جا دارد از تمامی کسانی که ما را در تهیه این مجموعه یاری نمودند به خصوص آقایان مهندس امیر امیدی و مهندسی کیومرث عبدی که زحمات و وقت کتاب و نیز از موسسه سایه نو به زحمت حروف چینی و رسم اشکال کتاب را بر عهده داشتند و نیز از آقایان افشین میراب که زحمت نظارت فنی کتاب را بر عهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی نمائیم.

در خاتمه به استحضار کلیه اساتید محترم و دانشجویان عزیز این موسسه با هدف نشر و توسعه کتب فنی، مهندسی و علوم پایه از کلیه و صاحب نظران محترم دعوت به همکاری می نماید. لذا از کلیه عزیزانی که علاقمند به همکاری در زمینه های یاد شده هستند در خواست می شود این نشانی مکاتبه نمایند. امید است با همکاری و همفکری صاحب نظران محترم بتوانیم در شکوفایی استعداد های جوانان یزدان گرامی هر چند کوچک برداریم. انشاء الله

www.ashina.fannazar.com

Email: Atharanpub@gmail.com

به نام آن که هستی نام از او یافت
فلک جنبش، زمین آرام از او یافت

پیشگفتار

سپاس بی‌کران خداوند یکتا را که با رحمت بی‌حسابش مرا در پدید آوردن این اثر یاری نمود.

ساختمان داده‌ها یکی از مباحث خیلی مهم در علوم کامپیوتری و حتی در زندگی روزانه است. این مبحث آنقدر مهم است که می‌تواند کیفیت زندگی ما را بهبود بخشیده حتی جان انسان‌ها را به طور منظم نجات دهد. بسیاری از شرکت‌های چند میلیون و چند میلیارد دلاری، بر پایه همین ساختمان داده‌ها شکل گرفته‌اند. اگر اندکی تأمل کنیم، متوجه می‌شویم که خود ما به طور مداوم با ساختمان داده‌ها در تعامل هستیم. به عنوان نمونه سیج تمام از اعمال باز کردن یک فایل، جستجوی نامی در گوشی خود در دفترچه تلفن گوشی ورود به شبکه اجتماعی مورد نظر خود، انجام جستجو در اینترنت، خدشات امنیتی روزانه‌ی ما مانند (۱۱۵) برای تشخیص نزدیکترین گروه گشت برای اعزام به محل حادثه و ... ها عمل دیگر بدون استفاده از ساختمان داده‌ها امکان پذیر نخواهد بود.

کتاب حاضر حاصل تجربیاتی است که در طول سال‌ها من تدریس ساختمان داده‌ها برای بیش از سی گروه از دانشجویان کارشناسی و کارشناسی ارشد در گرایش‌های مختلف بدست آمده است. در طی این مدت مطالعه منابع موجود در تدریس آن‌ها و ارتباط دانشجویانی که از این منابع استفاده می‌کنند، کمک کرد تا بتوانم نکاتی را دریابم که عدم رعایت آن‌ها در منابع موجود کمی از اثربخشی آن‌ها برای اساتید و کلاس‌های درسی کاسته است.

در این کتاب سعی شده است که با رعایت این نکات، گامی در جهت ارائه منبعی ساده و سودمند برای دانشجویان گرایش‌های مختلف رشته کامپیوتر برداشته شود. هر چند مطالب پوششی داده شده در این کتاب نمی‌توانند مرجعی کامل برای مبحث ساختمان داده‌ها در نظر گرفته شوند لیکن می‌توانند منبعی جامع برای پوشش سرفصل‌های دوره‌های کارشناسی و کارشناسی باشند. این کتاب شامل

- برخی ساختارهای داده‌ای معمول و پرکاربرد مورد استفاده در کارهای روزمره
- روش‌های موجود برای ایجاد این ساختارها
- نحوه تحلیل کارایی آن‌ها
- نحوه استفاده از آن‌ها برای حل برخی مسائل عملی
- و نهایتاً نکاتی برای مطالعه بیشتر برای افرادی که قصد احاطه کامل به موضوع و تفکر بیشتر در این زمینه را دارند، می‌باشد.

مطالب مذکور در قالب ۷ فصل به شرح زیر قوشته شده‌اند:

۱. مقدمه درس
۲. ریاضیات برای الگوریتم‌ها
۳. آرایه‌ها
۴. صف و پشت
۵. لیست‌های پیوندی
۶. درخت‌ها
۷. مرتب‌سازی

یکی از ویژگی‌های مهم این کتاب این است که با استفاده از اشکالی سعی بر آن شده است که روند اجرایی الگوریتم‌ها توسط کامپیوتر، شبیه‌سازی شود و مراحل اجرای الگوریتم‌ها به صورت شماتیک نشان داده شود.

خوانندگان این کتاب برای درک بهتر مطالب، لازم است پیش از مقدماتی به یکی از زبان‌های برنامه‌نویسی داشته باشند. با توجه به اینکه در این کتاب از دستورات زبان C++ استفاده شده است، آشنایی قبلی با زبان C++ می‌تواند درک خوانندگان را تسهیل بخشد. داشتن مهارت برنامه‌نویسی به صورت عملی در سطح متوسط، کمک خواهد کرد که الگوریتم‌های موجود در این کتاب را بهتر درک نمایید. همچنین در فصل دوم کتاب ("پیچیدگی زمان و فضا") از برخی مباحث ریاضیات از جمله مبحث لگاریتم‌ها و دنباله‌ها و سری‌ها (فرمول‌های سیگما ($\sum$)) استفاده شده است که ضروری است که خوانندگان این کتاب، آشنایی مختصری به این مباحث داشته باشند.

علی‌رغم دقت فراوان در نگارش مطالب و بازبینی آنها، بدیهی است که این کتاب عاری از کاستی‌ها و اشتباهات نیست، بنابراین نظرات و پیشنهادات و تذکرات اساتید و همکاران ارجمند، پژوهشگران، متخصصان و دانشجویان، موجب امتنان خواهد بود. در پایان چاپ این کتاب را به پاس لایجاد محیطی سرشار از آرامش در منزل و تحمل کاستی‌های مادی و معنوی به پدر، مادر، خواهر و همسر مهربانم تقدیم می‌نمایم و لازم میدانم مراتب قدردانی و سپاسگذاری خود را نسبت به معلمان و اساتید و عزیزانی که مرا در این وادی یاری نمودند، ابراز نمایم.

تبریز - زمستان ۱۳۹۲

امیر امید

Omidi.Amir@gmail.co

www.ketab.ir

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱.۱. مقدمه ۲۱
- ۳.۱. چرا به ارزیابی نیاز داریم؟ ۲۱
- ۳.۱. انواع ساختارهای داده ۲۳
- ۴.۱. معیارهای انتخاب الگوریتم مناسب ۲۴

فصل دوم: ارزیابی کارایی الگوریتم ها

- ۱.۲. مقدمه ۲۵
- ۲.۲. عوامل موثر در زمان (سرعت) اجرای الگوریتم ۲۶
- ۳.۲. شمارش گام های برنامه ۲۶
- ۴.۲. چند فرمول ریاضی ۲۹
- ۵.۲. تعیین مرتبه اجرایی الگوریتم ها (O) ۳۰
- ۶.۲. مقایسه چند مرتبه اجرایی معروف و متداول ۳۱
- ۷.۲. الگوریتم های بازگشتی ۳۳
- ۱.۷.۲. پیچیدگی الگوریتم های بازگشتی ۳۵
- ۸.۲. تمرین های حل شده ۳۷
- ۹.۲. تمرین ها ۳۸

فصل سوم: آرایه‌ها

- ۱,۳. مقدمه ۴۱
- ۲,۳. مفهوم آرایه ۴۱
- ۳,۳. آرایه‌های یک بعدی ۴۲
- ۱,۳,۳. تعریف آرایه‌های یک بعدی ۴۲
- ۲,۳,۳. محاسبه تعداد خانه‌های آرایه‌های یک بعدی ۴۳
- ۲,۳. محاسبه آدرس هر درایه از آرایه در حافظه ۴۴
- ۴,۳. آرایه‌های دو بعدی ۴۵
- ۱,۴,۳. تعریف آرایه‌های دو بعدی ۴۵
- ۲,۴,۳. پردازش آرایه‌های دو بعدی ۴۶
- ۳,۴,۳. محاسبه تعداد عناصر آرایه M به M ۴۷
- ۴,۴,۳. محاسبه آدرس هر عنصر از آرایه M در حافظه ۴۷
- ۱,۴,۴,۳. محاسبه آدرس هر عنصر از آرایه دو بعدی در حافظه ۴۷
- ۲,۴,۴,۳. محاسبه آدرس هر عنصر از آرایه سه بعدی در حافظه ۴۸
- ۵,۳. ماتریس خلوت ۴۹
- ۶,۳. ماتریس بالا مثلثی و پایین مثلثی ۵۱
- ۱,۶,۳. ماتریس‌های بالا مثلثی ۵۱
- ۲,۶,۳. ماتریس‌های پایین مثلثی ۵۳
- ۷,۳. نمایش چند جمله‌ایها با آرایه ۵۵
- ۸,۳. مطالعه آزاد ۵۶
- ۹,۳. تمرین‌ها ۵۶

فصل چهارم: صف و پشته

۵۹	۱،۴	مقدمه
۵۹	۲،۴	پشته (stack)
۶۱	۱،۲،۴	الگوریتم درج در پشته
۶۱	۲،۲،۴	الگوریتم حذف از پشته
۶۲	۲،۴	کاربرهای پشته
۶۳	۱،۳،۴	استفاده از پشته‌ها برای محاسبه عبارت پسوندی
۶۵	۲،۳،۲،۴	استفاده از پشته‌ها برای تبدیل عبارت پسوندی به عبارت میانوندی
۶۶	۳،۳،۲،۴	تبدیل عبارت پسوندی به پسوندی
۶۹	۳،۴	صف (Queue)
۷۳	۱،۲،۴	الگوریتم اضافه کردن به صف
۷۳	۲،۳،۴	الگوریتم حذف از صف
۷۴	۳،۳،۴	صف حلقوی
۷۴	۱،۲،۳،۴	الگوریتم درج در صف حلقوی
۷۸	۲،۳،۳،۴	الگوریتم حذف از صف حلقوی
۷۸	۴،۴	مطالعه بیشتر
۷۸	۵،۴	تمرین‌ها

فصل پنجم: لیست‌های پیوندی

۸۱	۱،۵	مقدمه
۸۲	۲،۵	مروری بر اشاره‌گرها و ساختمان‌ها
۸۲	۱،۲،۵	اشاره‌گرها

- ۲,۲,۵. تخصیص حافظه پویا ۸۳
- ۳,۲,۵. ساختمان ها ۸۴
- ۳,۵. لیست های پیوندی یک طرفه ۸۵
- ۱,۳,۵. ساختمان گره های لیست یک طرفه ۸۵
- ۲,۳,۵. اضافه کردن به ابتدای لیست پیوندی ۸۷
- ۳,۵. حذف گره از ابتدای لیست پیوندی ۸۹
- ۴,۵. نمایش لیست پیوندی ۹۱
- ۵,۳,۵. افزودن گرهی به انتهای لیست پیوندی ۹۲
- ۶,۳,۵. حذف از انتهای لیست پیوندی ۹۳
- ۷,۳,۵. جستجو یک عنصر و افزودن گره جدید بعد از آن ۹۴
- ۸,۳,۵. جستجو یک عنصر و حذف آن از لیست پیوندی ۹۶
- ۹,۳,۵. معکوس کردن لیست پیوندی یک طرفه ۹۷
- ۴,۵. لیست های پیوندی یک طرفه حلقوی ۹۹
- ۵,۵. لیست های پیوندی دو طرفه یا لیست های دو پیوندی ۹۹
- ۱,۵,۵. افزودن گرهی به لیست پیوندی دو طرفه ۱۰۰
- ۲,۵,۵. حذف گرهی از لیست پیوندی دو طرفه ۱۰۲
- ۶,۵. لیست های پیوندی دو طرفه حلقوی ۱۰۳
- ۷,۵. لیست های عمومی ۱۰۴
- ۸,۵. نمایش چند جمله ایها توسط لیست های پیوندی ۱-۵
- ۹,۵: مطالعه بیشتر ۱۰۶
- ۱۰,۵: تمرین ها ۱۰۶

فصل ششم: درخت‌ها

- ۱.۶. مقدمه ۱۰۷
- ۲.۶. درخت‌های دودویی (Binary trees) ۱۰۸
- ۱.۲.۶. درخت دودویی محض ۱۰۸
- ۲.۲.۶. درخت دودویی پر ۱۰۹
- ۳.۲.۶. درخت دودویی کامل ۱۰۹
- ۴.۶. پیاده‌سازی درخت‌های دودویی ۱۱۰
- ۱.۳.۶. پیاده‌سازی درخت‌های دودویی با استفاده از لیست‌های پیوندی ۱۱۰
- ۲.۳.۶. پیاده‌سازی درخت‌ها با استفاده از آرایه‌ها ۱۱۱
- ۴.۶. پیمایش درخت‌ها ۱۱۲
- ۱.۴.۶. پیمایش میان‌وندی یا Inorder ۱۱۳
- ۲.۴.۶. پیمایش پس‌وندی یا Postorder ۱۱۵
- ۳.۴.۶. پیمایش پیش‌وندی یا Preorder ۱۱۶
- ۴.۴.۶. پیمایش سطحی یا Level order ۱۱۶
- ۵.۶. درخت‌های جستجوی دودویی یا BST ۱۱۷
- ۱.۵.۶. جستجوی مقدار در BST ۱۱۸
- ۱.۵.۶. افزودن گرهی به درخت جستجوی دودویی ۱۲۰
- ۳.۵.۶. حذف گره از درخت جستجوی دودویی ۱۲۳
- ۶.۶. درخت‌های هرم یا Heap ۱۲۵
- ۱.۶.۶. درج عنصری در heap ۱۲۶
- ۲.۶.۶. حذف عنصری از heap ۱۲۷

۷,۶	درخت‌های عمومی	۱۲۹
۱,۷,۶	پیاده‌سازی درخت‌های عمومی	۱۳۰
۳,۷,۶	تبدیل درخت‌های عمومی به درخت دودویی	۱۳۰
۳,۷,۶	پیمایش درخت‌های عمومی	۱۳۱
۸,۶	درخت‌های دودویی نخ کشی شده	۱۳۲
۱,۸,۶	اضافه کردن گرهی به درخت دودویی نخ کشی شده	۱۳۴
۱,۶	درخت‌های انتخاب (درخت بازی یا درخت اولویت دار یا درخت برنده - ازنده)	۱۳۵
۱۰,۶	درخت تصمیم‌گیری (Decision Tree)	۱۳۶
۱۱,۶	درخت متوازن (VL Tree)	۱۳۷
۱,۱۱,۶	چرخش LL	۱۳۸
۲,۱۱,۶	چرخش RR	۱۳۹
۶,۱۱,۳	چرخش RL	۱۳۹
۴,۱۱,۶	چرخش LR	۱۴۰
۱۲,۶	درخت هافمن	۱۴۱
۱,۱۲,۶	ساخت درخت هافمن	۱۴۱
۲,۱۲,۶	کدگذاری از طریق درخت هافمن	۱۴۲
۱۳,۶	جنگل‌ها	۱۴۳
۱۴,۶	مطالعه آزاد	۱۴۴
۱۵,۶	تمرین‌ها	۱۴۵

فصل هفتم: مرتب‌سازی و جستجو

۱۴۷	 ۱،۷ مقدمه
۱۴۷	 ۲،۷ روش‌های مرتب‌سازی آرایه‌ها
۱۴۷	 ۱،۲،۷ مرتب‌سازی حبابی (Bubble Sort)
۱۵۱	 ۲،۲،۷ مرتب‌سازی انتخابی (Selection Sort)
۱۵۴	 ۳،۲،۷ مرتب‌سازی سریع (Quick Sort)
۱۵۸	 ۲،۷ مرتب‌سازی ادغامی (Merge Sort)
۱۶۸	 ۲،۷ مرتب‌سازی درجی (Insertion Sort)
۱۶۳	 ۳،۷ جستجو در آرایه
۱۶۳	 ۱،۳،۷ جستجو خطی یا ترتیبی یا Linier
۱۶۴	 ۲،۳،۷ جستجوی دودویی یا Binary
۱۶۵	 ۴،۷ مطالعه آزاد
۱۶۶	 ۵،۷ تمرین‌ها

فصل هشتم: گراف

۱۶۷	 ۱،۸ مقدمه
۱۷۲	 ۳،۸ نمایش گراف
۱۷۲	 ۱،۳،۸ ماتریس مجاورت
۱۷۲	 ۲،۳،۸ لیست مجاورت
۱۷۴	 ۴،۸ پیمایش گراف
۱۷۴	 ۱،۴،۸ جستجوی اول عمق (Deep First Search)
۱۷۶	 ۲،۴،۸ جستجوی اول سطح (Breach First Sea rch)
۱۷۷	 ۵،۸ درخت پوشای حداقل

۱,۵,۸	الگوریتم کروسکال	۱۷۸
۲,۵,۸	الگوریتم پریم	۱۷۸
	مراجع	۱۸۱

فهرست اشکال

شکل ۱, ۱:	زمان جستجوی واژه Data Structures با استفاده از موتور جستجوی Google	۲۳
شکل ۲, ۱:	ساختار سلسله مراتبی ساختارهای داده‌ای	۲۴
شکل ۱, ۲:		۳۳
شکل ۲, ۲:	نحوه شکستن مسئله فاکتوریل به مسائل کوچک‌تر	۳۵
شکل ۳, ۲:	برج‌های هان	۴۰
شکل ۱, ۳:	آرایه‌ای یک‌بعدی X با ۵ عنصر	۴۱
شکل ۲, ۳:	آرایه‌های تعریف شده در مثال ۱, ۲	۴۳
شکل ۳, ۳:	آرایه تعریف شده در مثال ۲, ۳	۴۴
شکل ۴, ۳:		۴۵
شکل ۵, ۳:	شکل آرایه دو بعدی تعریف شده در مثال ۵, ۳	۴۶
شکل ۶, ۳:	نحوه جای‌گیری عنصر ۱۰ در اندیس [۳, ۲]	۴۶
شکل ۷, ۳:	نمونه‌ای از ماتریس خلوت	۴۷
شکل ۸, ۳:	ساختار کلی حالت بهینه ماتریس خلوت	۴۸
شکل ۹, ۳:	نمونه‌ای از ماتریس بالا مثلثی	۵۱
شکل ۱۰, ۳:	نمونه‌ای از ذخیره‌سازی بهینه یک ماتریس بالا مثلثی	۵۲
شکل ۱۱, ۳:	نمونه‌ای از ماتریس پایین مثلثی	۵۳

- شکل ۱۲,۳: نمونه ای از ذخیره سازی بهینه یک ماتریس پایین مثلثی..... ۵۴
- شکل ۱,۴: سکه‌های قرار گرفته روی هم به عنوان مثالی برای پشته..... ۶۰
- شکل ۲,۴: ساختار پشته پیاده سازی شده با آرایه..... ۶۰
- شکل ۳,۴: شکل ظاهری پشته استفاده شده در محاسبه عبارات پسوندی..... ۶۳
- شکل ۴,۴: شکل ظاهری پشته به کار رفته در تبدیل عبارت میانوندی به پسوندی..... ۶۷
- شکل ۵: نمونه‌ای از یک صف..... ۷۰
- شکل ۶: استفاده از آرایه برای نمایش صف..... ۷۰
- شکل ۷,۴: حالت اولیه صف..... ۷۱
- شکل ۸,۴: حالات مجتاز خالی بودن صف..... ۷۱
- شکل ۹,۴: حالت پر بودن صف..... ۷۱
- شکل ۱۰,۴: عملیات درج و حذف در صف و نمایش حالات مختلف آن..... ۷۲
- شکل ۱۱,۴: ساختاری مفهومی صف حلقوی..... ۷۴
- شکل ۱۲,۴: ساختار صف حلقوی و عملیات درج و حذف در آن..... ۷۷
- شکل ۱,۵: جزئیات حافظه در مثال ۱,۵..... ۸۳
- شکل ۲,۵: نگاشت یک آرایه در لیست پیوندی متناظر..... ۸۶
- شکل ۳,۵: ساختار یک گره از لیست پیوندی..... ۸۶
- شکل ۴,۵: ساختار یک لیست پیوندی..... ۸۷
- شکل ۵,۵: اضافه کردن گرهی به ابتدای یک لیست پیوندی یک‌طرفه..... ۸۷
- شکل ۶,۵: اضافه کردن گرهی به ابتدای یک لیست پیوندی یک‌طرفه..... ۸۸
- شکل ۷,۵: اضافه کردن گرهی به ابتدای یک لیست پیوندی یک‌طرفه..... ۸۸
- شکل ۸,۵: اضافه کردن گرهی به ابتدای یک لیست پیوندی یک‌طرفه..... ۸۸

- شکل ۹,۵ : نمونه لیستی که می‌خواهیم گرهی را از ابتدای آن حذف کنیم ۸۹
- شکل ۱۰,۵: حذف گره از ابتدای لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۰
- شکل ۱۱,۵: حذف گره ابتدای از لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۰
- شکل ۱۲,۵: حذف گره ابتدای از لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۰
- شکل ۱۳,۵ : نمونه لیستی که پیمایش خواهد شد ۹۱
- شکل ۱۴,۵: پیمایش لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۱
- شکل ۱۵,۵: حذف از انتهای لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۳
- شکل ۱۶,۵: حذف از انتهای لیست پیوندی ۹۳
- شکل ۱۷,۵: اضافه کردن بعد از گرهی که داده مورد نظر ما در آن قرار دارد ۹۵
- شکل ۱۸,۵: اضافه کردن بعد از گرهی که داده مورد نظر ما در آن قرار دارد ۹۵
- شکل ۱۹,۵: اضافه کردن بعد از گرهی که داده مورد نظر ما در آن قرار دارد ۹۵
- شکل ۲۰,۵: حذف گرهی که داده آن N است ۹۶
- شکل ۲۱,۵: حذف گرهی که داده آن N است ۹۷
- شکل ۲۲,۵: حذف گرهی که داده آن N است ۹۷
- شکل ۲۳,۵: معکوس کردن لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۸
- شکل ۲۴,۵: معکوس کردن لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۸
- شکل ۲۵,۵: معکوس کردن لیست پیوندی یک‌طرفه ۹۸
- شکل ۲۶,۵: لیست پیوندی یک‌طرفه حلقوی ۹۹
- شکل ۲۷,۵: ساختار یک گره از لیست پیوندی دوطرفه ۹۹
- شکل ۲۸,۵: ساختار یک لیست پیوندی دوطرفه ۱۰۰
- شکل ۲۹,۵: افزودن گرهی به لیست پیوندی دوطرفه ۱۰۰

- شکل ۵، ۳۰: افزودن گرهی به لیست پیوندی دوطرفه ۱۰۱
- شکل ۵، ۳۱: افزودن گرهی به لیست پیوندی دوطرفه ۱۰۱
- شکل ۵، ۳۲: حذف گره از لیست پیوندی دوطرفه ۱۰۲
- شکل ۵، ۳۳: لیست پیوندی دوطرفه حلقوی ۱۰۳
- شکل ۵، ۳۴: نمونه‌ای از لیست‌های عمومی ۱۰۳
- شکل ۵، ۳۵: ساختار یک گره از لیست عمومی ۱۰۴
- شکل ۵، ۳۶: نحوه ذخیره‌سازی لیست ارائه شده در مثال ۵، ۶ ۱۰۵
- شکل ۵، ۳۷: ساختار یک گره از لیست نمایش دهنده چندجمله‌ایها ۱۰۵
- شکل ۵، ۳۸: نحوه ذخیره‌سازی چند جمله‌ای داده شده در مثال ۵، ۷ ۱۰۵
- شکل ۶، ۱: یک درخت دودویی ۱۰۸
- شکل ۶، ۲: درخت دودویی متساوی و متض ۱۰۸
- شکل ۶، ۳: درخت دودویی پر ۱۰۹
- شکل ۶، ۴: درخت دودویی کامل ۱۰۹
- شکل ۶، ۵: پیاده‌سازی درخت‌ها با استفاده از لیست‌های پیوندی ۱۱۰
- شکل ۶، ۶: ساختار یک گره از درخت دودویی ۱۱۰
- شکل ۶، ۷: پیاده‌سازی درخت‌ها با استفاده از آرایه‌ها ۱۱۱
- شکل ۶، ۸: پیاده‌سازی درخت غیر کامل با استفاده از آرایه ۱۱۱
- شکل ۶، ۹ ۱۱۳
- شکل ۶، ۱۰ ۱۱۳
- شکل ۶، ۱۱ ۱۱۴
- شکل ۶، ۱۲: پیمایش سطحی درخت دودویی ۱۱۷

۱۱۸	شکل ۱۳,۶
۱۱۸	شکل ۱۴,۶: درخت جستجوی دودویی یا BST
۱۱۹	شکل ۱۵,۶
۱۱۹	شکل ۱۶,۶
۱۲۱	شکل ۱۷,۶
۱۲۱	شکل ۱۷,۶
۱۲۱	شکل ۱۷,۶
۱۲۲	شکل ۲۰,۶
۱۲۲	شکل ۲۱,۶
۱۲۳	شکل ۳۲,۶
۱۲۴	شکل ۲۳,۶
۱۲۴	شکل ۲۴,۶
۱۲۵	شکل ۲۵,۶
۱۲۵	شکل ۲۶,۶
۱۲۶	شکل ۲۷,۶
۱۲۸	شکل ۲۸,۶
۱۲۹	شکل ۲۹,۶
۱۳۰	شکل ۳۰,۶
۱۳۱	شکل ۳۱,۶
۱۳۱	شکل ۳۲,۶
۱۳۲	شکل ۳۳,۶

۱۳۳	شکل ۳۴,۶
۱۳۴	شکل ۳۵,۶
۱۳۵	شکل ۳۶,۶
۱۳۵	شکل ۳۳,۶
۱۳۶	شکل ۳۸,۶
۱۳۷	شکل ۳۸,۶
۱۳۸	شکل ۳۹,۶
۱۳۹	شکل ۴۰,۶
۱۳۹	شکل ۴۱,۶
۱۴۰	شکل ۴۲,۶
۱۴۰	شکل ۴۳,۶
۱۴۲	شکل ۴۴,۶
۱۴۳	شکل ۴۵,۶
۱۴۹	شکل ۱,۷: مرتب سازی حبابی
۱۵۳	شکل ۲,۷: مرتب سازی انتخابی
۱۵۱	شکل ۳,۷
۱۵۱	شکل ۴,۷
۱۵۸	شکل ۵,۷
۱۶۴	شکل ۶,۷: جستجوی دودویی
۱۶۸	شکل ۱,۸: گراف جهت دار و بدون جهت
۱۶۸	شکل ۲,۸: حلقه یا Loop

- شکل ۳,۸: گراف کاملی ۱۶۹
- شکل ۴,۸: راس چاه و راس منبع ۱۷۰
- شکل ۵,۸: مسیری از راس C به راس D ۱۷۰
- شکل ۶,۸: حالات مختلف گراف جهت‌دار ۱۷۱
- شکل ۷,۸: ماتریس مجاورت ۱۷۲
- شکل ۸,۸: لیست مجاورت ۱۷۳
- شکل ۹,۸: لیست مجاورت ۱۷۴
- شکل ۱۰,۸: عمق ۱۷۵
- شکل ۱۱,۸: سطح ۱۷۷
- شکل ۱۲,۸: درخت پوشا ۱۷۸
- شکل ۱۳,۸: درخت پوشای مینه ۱۷۹