

کدگذاری تصحیح خطا
الگوریتمها و روشهای ریاضی
جلد اول

تألیف
تاد کی مون

ترجمه (به همراه تصحیح و توضیح)
دکتر مهدی تیموری



شماره مسلسل ۹۳۶۱

شماره انتشار ۳۸۹۲

انتشارات دانشگاه تهران

سرشناسه	: مون، تاد کی، ۱۹۶۳-م. Moon, Todd K
عنوان و نام پدیدآور	: کدگذاری تصحیح خطا: الگوریتم‌ها و روش‌های ریاضی / تألیف تاد کی. مون؛ ترجمه (به همراه تصحیح و توضیح) مهدی تیموری.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ج۲: مصور.
فروست	: انتشارات دانشگاه تهران؛ شماره انتشار ۳۸۹۲.
شابک جلد اول	: 978-964-03-7168-8
شابک دوره	: 978-964-03-7167-1
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms, 2005.
یادداشت	: ج. ۲ (چاپ اول: ۱۳۹۶) (فیبا).
یادداشت	: کتابنامه.
عنوان دیگر	: الگوریتم‌ها و روش‌های ریاضی.
موضوع	: ریاضیات مهندسی
موضوع	: رمزگان تصحیح خطا
شناسه افزوده	: تیموری، مهدی، ۱۳۵۹- مترجم، مصحح
شناسه افزوده	: دانشگاه تهران. مؤسسه انتشارات
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۶ / م۸۷۴ / م۳۳۱ TA
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۱ / ۳۸۲۰۲۸۵۵۷۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۹۷۰۹۹۰

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل‌های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود و تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است.



عنوان: کدگذاری تصحیح خطا: الگوریتم‌ها و روش‌های ریاضی: جلد اول

تألیف: تاد کی مون

ترجمه، تصحیح و توضیح: دکتر مهدی تیموری

نوبت چاپ: اول

تاریخ انتشار: ۱۳۹۶

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مترجم است»

بهای دوره دوجلدی: ۹۵۰۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرشی مقدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

پست الکترونیک: press@ut.ac.ir - تارنما: <http://press.ut.ac.ir>

پخش و فروش: تلفکس ۸۸۳۳۸۷۱۲

تقدیم به همسر مہربان و صبورم

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

فهرست

xxi.....	پیشگفتار مترجم.....
xxiii.....	پیشگفتار نویسنده.....
xxxix.....	فهرست برنامه‌های رایانه‌ای.....
xxxix.....	فهرست آزمایشگاه‌های برنامه‌سازی.....
xli.....	فهرست الگوریتم‌ها.....
xliii.....	فهرست شکل‌ها.....
li.....	فهرست جدول‌ها.....
lv.....	فهرست جعبه‌ها.....

بخش اول: معرفی و مفاهیم پایه

۳.....	فصل اول: زمینه‌ای برای کدهای تصحیح خطا.....
۳.....	۱-۱ هدف این کتاب.....
۳.....	۲-۱ معرفی: کدها کجا هستند؟.....
۵.....	۳-۱ سامانه‌های مخابراتی.....
۱۵.....	۴-۱ مفاهیم پایه‌ای مخابرات دیجیتال.....
۱۵.....	۱-۴-۱ مدوله‌سازی فاز دودویی.....
۱۷.....	۲-۴-۱ مدوله‌سازی دیجیتال تعمیم‌یافته.....
۲۱.....	۵-۱ آشکارسازی سیگنال.....
۲۱.....	۱-۵-۱ کانال گوسی.....
۲۵.....	۲-۵-۱ آشکارسازی MAP و ML.....
۲۷.....	۳-۵-۱ حالت خاص: آشکارسازی دودویی.....
۲۹.....	۴-۵-۱ احتمال خطا برای آشکارسازی دودویی.....
۳۳.....	۵-۵-۱ کران‌های روی عملکرد: کران اجتماع.....
۳۵.....	۶-۵-۱ کانال متقارن دودویی.....
۳۷.....	۷-۵-۱ مدل کانال گوسی و مدل BSC.....

۳۸	۶-۱	کانال‌های بدون حافظه.....
۳۹	۷-۱	شبیه‌سازی و ملاحظات انرژی برای سیگنال‌های گذشته.....
۴۱	۸-۱	چند تعریف مهم و یک کد بدیهی: کد تکرار.....
۴۲	۱-۸-۱	آشکارسازی کدهای تکرار در BSC.....
۴۸	۲-۸-۱	کدگشایی تصمیم-نرم برای کدهای تکرار در کانال AWGN.....
۴۹	۳-۸-۱	نتایج شبیه‌سازی.....
۵۰	۴-۸-۱	خلاصه.....
۵۰	۹-۱	کدهای همینگ.....
۵۲	۱-۹-۱	کدگشایی کدهای همینگ در حضور ورودی تصمیم-سخت.....
۵۶	۲-۹-۱	سایر روش‌های نمایش برای کدهای همینگ.....
۵۶		نمایش جبری.....
۵۷		نمایش چندجمله‌ای.....
۵۸		نمایش ترلیس.....
۵۹		نمایش گراف تنر.....
۵۹	۱۰-۱	سؤال‌های پایه‌ای.....
۶۰	۱۱-۱	مراحل مهم تاریخی در نظریه کدگذاری.....
۶۰	۱۲-۱	مختصری از نظریه اطلاعات.....
۶۲	۱-۱۲-۱	تعاریف مبتنی بر نظریه اطلاعات برای متغیرهای تصادفی گسسته.....
۶۲		آنتروپی و آنتروپی شرطی.....
۶۳		آنتروپی نسبی، اطلاعات متقابل و ظرفیت کانال.....
۶۵	۲-۱۲-۱	تعاریف مبتنی بر نظریه اطلاعات برای متغیرهای تصادفی پیوسته.....
۶۷	۳-۱۲-۱	قضیه کدگذاری کانال.....
۷۰	۴-۱۲-۱	اثبات قضیه کدگذاری کانال.....
۷۵	۵-۱۲-۱	ظرفیت کانال AWGN زمان-پیوسته.....
۷۷	۶-۱۲-۱	ارسال با خطا در سقف ظرفیت.....
۷۹	۷-۱۲-۱	مفهوم قضیه کدگذاری کانال.....
۷۹		آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱: شبیه‌سازی یک کانال مخابراتی.....
۷۹		هدف.....
۷۹		پیش‌زمینه.....
۸۱		استفاده از کدگذاری در کنار BSC.....

۸۲.....	تکلیف
۸۲.....	بخش برنامه‌سازی
۸۴.....	منابع و پیشنهادهای پیاده‌سازی
۸۷.....	۱۳-۱ تمرین‌ها
۹۵.....	۱۴-۱ مراجع

بخش دوم: کدهای بلوکی

۹۹.....	فصل دوم: گروه‌ها و فضاهاى بردارى
۹۹.....	۱-۲ مقدمه
۹۹.....	۲-۲ گروه‌ها
۱۰۵.....	۱-۲-۲ زیرگروه‌ها
۱۰۷.....	۲-۲-۲ گروه‌های چرخشی و مرتبه یک عنصر
۱۰۸.....	۳-۲-۲ دسته‌ها
۱۰۹.....	۴-۲-۲ قضیه لاگرانژ
۱۱۲.....	۵-۲-۲ عملیات القایی؛ تناظر
۱۱۶.....	۶-۲-۲ هم‌ریختی
۱۱۸.....	۳-۲ میدان‌ها: پیش‌درآمد
۱۲۱.....	۴-۲ مرور جبر خطی
۱۲۸.....	۵-۲ تمرین‌ها
۱۳۳.....	۶-۲ مراجع

فصل سوم: کدهای بلوکی خطی

۱۳۵.....	۱-۳ تعاریف پایه
۱۳۶.....	۲-۳ توصیف یک کد بلوکی خطی با استفاده از ماتریس سازنده
۱۴۰.....	۱-۲-۳ پیاده‌سازی پایه
۱۴۰.....	۳-۳ ماتریس بررسی توازن و کدهای دوگان
۱۴۳.....	۱-۳-۳ چند کران ساده بر روی کدهای بلوکی
۱۴۶.....	۴-۳ تشخیص و تصحیح خطا روی کانال‌های دارای ورودی-سخت

۱۴۷	تشخیص خطا.....	۱-۴-۳
۱۴۷	تصحیح خطا: آرایه استاندارد	۲-۴-۳
۱۵۴	توزیع وزنی کدهای و دوگان آنها.....	۵-۳
۱۵۶	کدهای همینگ و دوگان آنها.....	۶-۳
۱۵۹	عملکرد کدهای خطی.....	۷-۳
۱۶۰	عملکرد تشخیص خطا.....	۱-۷-۳
۱۶۲	عملکرد تصحیح خطا.....	۲-۷-۳
۱۶۵	عملکرد کدگشایی تصمیم-نرم.....	۳-۷-۳
۱۶۶	کدگشایی پاک‌شدگی.....	۸-۳
۱۶۸	کدگشایی پاک‌شدگی دودویی.....	۱-۸-۳
۱۶۹	انواع تغییر در کدهای خطی.....	۹-۳
۱۷۲	بهترین کدهای بلوکی خطی شناخته‌شده.....	۱۰-۳
۱۷۲	تمرین‌ها.....	۱۱-۳
۱۸۱	مراجع.....	۱۲-۳

فصل چهارم: کدهای چرخشی، حلقه‌ها و چندجمله‌ای‌ها..... ۱۸۳

۱۸۳	مقدمه.....	۱-۴
۱۸۳	تعریف‌های پایه.....	۲-۴
۱۸۴	حلقه‌ها.....	۳-۴
۱۸۷	حلقه چندجمله‌ای‌ها.....	۱-۳-۴
۱۸۹	حلقه‌های خارج‌قسمت.....	۴-۴
۱۹۲	ایدئال‌ها در حلقه‌ها.....	۵-۴
۱۹۵	توصیف جبری کدهای چرخشی.....	۶-۴
۱۹۷	کدگذاری غیر سیستماتیک و بررسی توازن.....	۷-۴
۲۰۰	کدگذاری سیستماتیک.....	۸-۴
۲۰۲	پیش‌زمینه‌ای از سخت‌افزار.....	۹-۴
۲۰۲	بخش‌های پایه محاسباتی.....	۱-۹-۴
۲۰۴	رشته‌ها و سری‌های توانی.....	۲-۹-۴
۲۰۵	ضرب چندجمله‌ای.....	۳-۹-۴

۲۰۵.....	پردازش به ترتیب وارون.....
۲۰۶.....	پردازش به ترتیب.....
۲۰۷.....	تقسیم چندجمله‌ای..... ۴-۹-۴
۲۰۷.....	پردازش به ترتیب وارون.....
۲۱۰.....	ضرب و تقسیم هم‌زمان چندجمله‌ای..... ۵-۹-۴
۲۱۰.....	پردازش به ترتیب.....
۲۱۳.....	کدگذاری چرخشی..... ۱۰-۴
۲۱۷.....	کدگشایی سندرم..... ۱۱-۴
۲۲۶.....	کدهای چرخشی کوتاه‌شده..... ۱۲-۴
۲۳۱.....	کدهای CRC دودویی..... ۱۳-۴
۲۳۴.....	الگوریتم‌های کدگذاری و کدگشایی مبتنی بر بایت..... ۱-۱۳-۴
۲۳۹.....	محافظت CRC از فایل‌ها یا بسته‌های داده..... ۲-۱۳-۴
۲۴۰.....	پیوست ۴-الف: LFSRها.....
۲۴۰.....	پیوست ۴-الف-۱: مفاهیم پایه.....
۲۴۵.....	پیوست ۴-الف-۲: ارتباط با تقسیم چندجمله‌ای.....
۲۴۹.....	پیوست ۴-الف-۳: برخی خواص جبری توالی‌های انتقال.....
۲۵۰.....	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۲: تقسیم چندجمله‌ای و LFSRها.....
۲۵۰.....	هدف.....
۲۵۰.....	تمرین‌های مقدماتی.....
۲۵۱.....	بخش برنامه‌نویسی: BinLFSR.....
۲۵۲.....	منابع و پیشنهاد‌های پیاده‌سازی.....
۲۵۳.....	بخش برنامه‌نویسی: BinPolyDiv.....
۲۵۴.....	ایده‌ها و مسئله‌های مرتبط.....
۲۵۵.....	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۳: کدگذاری و کدگشایی CRC.....
۲۵۵.....	هدف.....
۲۵۵.....	پیش‌نیاز.....
۲۵۵.....	بخش برنامه‌نویسی.....
۲۵۷.....	منابع و پیشنهاد‌های پیاده‌سازی.....
۲۶۰.....	۱۴-۴ تمرین‌ها.....

۲۷۱	۱۵-۴ مراجع
۲۷۳	فصل پنجم: مقدمات نظریه اعداد و جبر
۲۷۳	۱-۵ انگیزش
۲۷۹	۲-۵ مقدمات نظریه اعداد
۲۷۹	۱-۲-۵ بخش پذیری
۲۸۲	۲-۲-۵ الگوریتم اقلیدسی و دامنه‌های اقلیدسی
۲۹۰	۳-۲-۵ یک کاربرد الگوریتم اقلیدسی: الگوریتم سوگیاما
۲۹۳	۴-۲-۵ هم‌نهشتی
۲۹۴	۵-۲-۵ تابع ϕ
۲۹۵	۶-۲-۵ استفاده در رمزگذاری
۲۹۶	قضیه کوچک فرما
۲۹۷	رمزگذاری RSA
۲۹۹	۳-۵ قضیه باقیمانده چینی
۳۰۳	۱-۳-۵ درون‌یابی و CRT
۳۰۳	هم‌ریختی ارزیابی
۳۰۳	مسئله درون‌یابی
۳۰۶	۴-۵ میدان‌ها
۳۰۸	۱-۴-۵ بررسی \mathbb{R} و \mathbb{C}
۳۱۱	۲-۴-۵ ساخت میدان‌های گالوا: یک مثال
۳۱۶	۳-۴-۵ ارتباط با LFSR ها
۳۱۷	۵-۵ میدان‌های گالوا: اصول ریاضی
۳۲۴	۶-۵ پیاده‌سازی محاسبات در میدان گالوا
۳۲۴	۱-۶-۵ لگاریتم‌های زچ
۳۲۵	۲-۶-۵ پیاده‌سازی‌های سخت‌افزاری
۳۲۶	۷-۵ زیرمیدان‌های میدان‌های گالوا
۳۲۸	۸-۵ چندجمله‌ای‌های غیر قابل تقلیل و چندجمله‌ای‌های اولیه
۳۳۲	۹-۵ عناصر مزدوج و چندجمله‌ای‌های کمین
۳۳۵	۱-۹-۵ چندجمله‌ای‌های کمین
۳۴۱	۱۰-۵ تجزیه $x^n - 1$

۳۴۴	دسته‌های سیکلوتومی..... ۱۱-۵
۳۴۵	پیوست ۵-الف: تعداد چندجمله‌ای‌های غیر قابل تقلیل چیست؟.....
۳۵۱	پیوست ۵-الف-۱: حل صریح I_m : تابع موبیوس.....
۳۵۲	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۴: برنامه‌نویسی الگوریتم اقلیدسی.....
۳۵۲	هدف.....
۳۵۲	تمرین‌های مقدماتی.....
۳۵۳	پیش‌زمینه.....
۳۵۴	بخش برنامه‌نویسی.....
۳۵۵	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۵: برنامه‌نویسی محاسبات میدان گالوا.....
۳۵۵	هدف.....
۳۵۵	تمرین‌های مقدماتی.....
۳۵۶	بخش برنامه‌نویسی.....
۳۵۹	۱۲-۵ تمرین‌ها.....
۳۷۷	۱۳-۵ مراجع.....
۳۷۹	فصل ششم: کدهای BCH و RS: کدهای چرخشی با امکان طراحی.....
۳۷۹	۱-۶ کدهای BCH.....
۳۷۹	۱-۱-۶ طراحی کدهای BCH.....
۳۸۲	۲-۱-۶ کران BCH.....
۳۸۶	۳-۱-۶ توزیع‌های وزنی برای برخی کدهای BCH دودویی.....
۳۸۷	۴-۱-۶ نتایج مجانبی برای کدهای BCH.....
۳۸۹	۲-۶ کدهای RS.....
۳۸۹	۱-۲-۶ روش ساخت اول برای کدهای RS.....
۳۹۱	۲-۲-۶ روش ساخت دوم برای کدهای RS.....
۳۹۳	۳-۲-۶ کدگذاری کدهای RS.....
۳۹۴	۴-۲-۶ کدهای MDS و توزیع‌های وزنی برای کدهای RS.....
۳۹۷	۳-۶ کدگذاری کدهای RS و BCH: طرح کلی.....
۳۹۷	۱-۳-۶ محاسبهٔ سندرم.....
۳۹۸	۲-۳-۶ چندجمله‌ای خطایاب.....
۳۹۹	۳-۳-۶ روش جستجوی شین.....

۴۰۱	یافتن چندجمله‌ای خطایاب	۴-۶
۴۰۳	ساده‌سازی برای کدهای دودویی و الگوریتم پترسون	۱-۴-۶
۴۰۵	الگوریتم برلکمپ-مسی	۲-۴-۶
۴۰۷	توصیف طول LFSR در الگوریتم مسی	۳-۴-۶
۴۱۳	ساده‌سازی‌هایی برای کدهای دودویی	۴-۴-۶
۴۱۶	کدگشایی کدهای BCH غیر دودویی و کدهای RS	۵-۶
۴۱۷	الگوریتم فورنی	۱-۵-۶
۴۲۳	الگوریتم اقلیدسی برای چندجمله‌ای خطایاب	۶-۶
۴۲۴	کدگشایی پاک‌شدگی برای کدهای BCH غیر دودویی و کدهای RS	۷-۶
۴۲۷	روش‌های تبدیل فوریه میدان‌های گالوا	۸-۶
۴۳۴	معادل بودن دو روش ساخت کدهای RS	۱-۸-۶
۴۳۵	کدگشایی حوزه فرکانس	۲-۸-۶
۴۳۶	شکل‌هایی دیگر از کدهای RS و تعمیم‌های آنها	۹-۶
۴۳۶	تغییرات ساده	۱-۹-۶
۴۳۷	کدهای RS تعمیم‌یافته و کدهای جایگزین	۲-۹-۶
۴۴۰	کدهای گاپا	۳-۹-۶
۴۴۲	کدگشایی کدهای جایگزین	۴-۹-۶
۴۴۲	ارتباط با رمزگذاری: سامانه رمزگذاری کلید عمومی مک‌الیس	۵-۹-۶
۴۴۳	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۶: برنامه‌نویسی الگوریتم برلکمپ-مسی	
۴۴۳	پیش‌زمینه	
۴۴۴	تمرین	
۴۴۴	تمرین‌های مقدماتی	
۴۴۵	بخش برنامه‌نویسی	
۴۴۶	منابع و پیشنهاد‌های پیاده‌سازی	
۴۴۸	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۷: برنامه‌نویسی کدگشای BCH	
۴۴۸	هدف	
۴۴۸	تمرین‌های مقدماتی	
۴۴۸	بخش برنامه‌نویسی	
۴۵۰	منابع و پیشنهاد‌های پیاده‌سازی	
۴۵۱	مسائل و ایده‌های مرتبط در ادامه موضوع	

۴۵۱	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۸: کدگذاری و کدگشایی کدهای RS.....
۴۵۱	هدف
۴۵۱	تمرین‌های مقدماتی.....
۴۵۱	بخش برنامه‌نویسی.....
۴۵۴	پیوست ۶-الف: اثبات تساوی‌های نیوتن
۴۵۶	۱۰-۶ تمرین‌ها
۴۶۵	۱۱-۶ مراجع
۴۶۷	فصل هفتم: روش‌های جایگزین برای کدگشایی کدهای RS.....
۴۶۷	۱-۷ مقدمه: حجم کار در کدگشایی RS.....
۴۶۸	۲-۷ استخراج معادله کلیدی ولج-برلکمپ
۴۶۸	۱-۲-۷ روش ولج-برلکمپ برای استخراج معادله کلیدی.....
۴۷۴	۲-۲-۷ استخراج معادله کلیدی از معادله کلیدی مرسوم.....
۴۷۸	۳-۷ یافتن مقادیر خطا.....
۴۷۹	۴-۷ روش‌های حل معادله کلیدی WB.....
۴۸۰	۱-۴-۷ پیش‌زمینه: مدول‌ها.....
۴۸۲	۲-۴-۷ الگوریتم ولج-برلکمپ.....
۴۹۲	۳-۴-۷ رهیافتی بر مبنای مدول برای یافتن پاسخ معادله کلیدی ولج-برلکمپ.....
۵۱۰	۵-۷ کدگشایی پاک‌شدگی با استفاده از معادله کلیدی ولج-برلکمپ.....
۵۱۰	۶-۷ الگوریتم کدگشایی گوروسوامی-سودان و کدگشایی نرم RS.....
۵۱۱	۱-۶-۷ کدگشایی فاصله محدود، کدگشایی ML و کدگشایی فهرستی.....
۵۱۲	۲-۶-۷ تصحیح خطا با درون‌یابی.....
۵۱۴	۳-۶-۷ چندجمله‌ای‌های دو متغیره.....
۵۱۴	مرتبه تک‌جمله‌ای و درجه.....
۵۱۹	صفرها و صفرهای متعدد.....
۵۲۳	۴-۶-۷ کدگشای GS: قضیه اصلی.....
۵۲۴	قضیه درون‌یابی.....
۵۲۵	قضیه عامل‌گیری.....
۵۲۷	فاصله تصحیح.....
۵۳۱	تعداد چندجمله‌ای‌ها در فهرست کدگشایی.....

۵۳۵.....	الگوریتم‌های محاسباتی برای مرحله درون‌یابی	۵-۶-۷
۵۳۶.....	یافتن ستون‌های وابسته خطی: الگوریتم فنگ-سنگ	
۵۴۳.....	یافتن اشتراک هسته‌ها: الگوریتم کاتر	
۵۵۲.....	یک حالت خاص: $m=1$ و $L=1$	۶-۶-۷
۵۵۵.....	الگوریتمی برای مرحله عامل‌گیری	۷-۶-۷
۵۶۴.....	با فهرست عامل‌ها چه باید کرد؟	
۵۶۷.....	کدگشایی تصمیم-نرم برای کدهای RS	۸-۶-۷
۵۶۷.....	نشان‌گذاری	
۵۷۰.....	یک قضیه برای عامل‌گیری	
۵۷۲.....	نگاشت قابلیت اطمینان به تعدد	
۵۷۵.....	هندسه نواحی کدگشایی	
۵۷۶.....	محاسبه ماتریس قابلیت اطمینان	
۵۷۷.....	تمرین‌ها	۷-۷
۵۸۴.....	مراجع	۱-۷

فصل هشتم: سایر کدهای بلوکی مهم..... ۵۸۷

۵۸۷.....	مقدمه	۱-۸
۵۸۷.....	ماتریس‌ها، کدها و تبدیل‌های هادامارد	۲-۸
۵۸۷.....	معرفی ماتریس‌های هادامارد	۱-۲-۸
۵۹۰.....	روش ساخت پیلی برای ماتریس‌های هادامارد	۲-۲-۸
۵۹۵.....	کدهای هادامارد	۳-۲-۸
۵۹۶.....	کدهای رید-مولر	۳-۸
۵۹۶.....	توابع بولی	۱-۳-۸
۵۹۸.....	تعریف کدهای رید-مولر	۲-۳-۸
۶۰۲.....	کدگذاری و کدگشایی برای کدهای RM مرتبه اول	۳-۳-۸
۶۰۲.....	کدگذاری کدهای $RM(1, m)$	
۶۰۲.....	کدگشایی کدهای $RM(1, m)$	
۶۰۶.....	تسریع کدگشایی با استفاده از تبدیل هادامارد سریع	
۶۰۹.....	الگوریتم کدگشایی رید برای کدهای $RM(r, m)$ با $r \geq 1$	۴-۳-۸
۶۱۰.....	جزئیات کار برای یک کد $RM(2, 4)$	

۶۱۴.....	یک دیدگاه هندسی
۶۱۹.....	۵-۳-۸ روش‌های ساخت دیگر برای کدهای رید-مولر.....
۶۲۰.....	۴-۸ تولید کدهای بلند از کدهای کوتاه: روش ساخت تربیعی
۶۲۵.....	۵-۸ کدهای ماندهٔ مربعی
۶۳۰.....	۶-۸ کدهای گولی
۶۳۲.....	۱-۶-۸ کدگشایی کد گولی.....
۶۳۲.....	کدگشای جبری برای کد گولی G_{23}
۶۳۳.....	کدگشای حسابی برای کد G_{24}
۶۳۶.....	۷-۸ تمرین‌ها
۶۴۰.....	۸-۸ مراجع

فصل نهم: کران‌های روی کدها..... ۶۴۳

۶۴۷.....	۱-۹ کران گیلبرت-وارشاموف.....
۶۴۹.....	۲-۹ کران پلاتکین
۶۵۱.....	۳-۹ کران گریزمر
۶۵۲.....	۴-۹ برنامه‌ریزی خطی و کران‌های مرتبط
۶۵۶.....	۱-۴-۹ چندجمله‌ای‌های کروچوک
۶۵۶.....	۲-۴-۹ ویژگی
۶۵۸.....	۳-۴-۹ چندجمله‌ای‌های کروچوک و ویژگی‌ها.....
۶۶۱.....	۵-۹ کران مک‌الیس-رودمیچ-رامزی-ولج
۶۶۴.....	۶-۹ تمرین‌ها
۶۷۰.....	۷-۹ مراجع

فصل دهم: کانال‌های رگباری، جایگردان‌ها و تودرتوسازی..... ۶۷۱

۶۷۱.....	۱-۱۰ معرفی کانال‌های رگباری
۶۷۲.....	۲-۱۰ جایگردان
۶۷۵.....	۳-۱۰ کاربردی از کدهای RS جایگشت‌شده: دیسک‌های فشرده
۶۷۸.....	۴-۱۰ کدهای ضربی
۶۸۰.....	۵-۱۰ کدهای رید-سالمون
۶۸۱.....	۶-۱۰ کدهای تودرتو

۶۸۳	۷-۱۰ کدهای فایر.....
۶۸۳	۱-۷-۱۰ تعریف کدهای فایر.....
۶۸۵	۲-۷-۱۰ کدگذاری کدهای فایر: کدگذاری در تله اندازی خطا.....
۶۸۸	۸-۱۰ تمرین‌ها.....
۶۸۹	۹-۱۰ مراجع.....
فصل یازدهم: الگوریتم‌های کدگذاری تصمیم - نرم.....	
۶۹۱	۱-۱۱ مقدمه و نشان‌گذاری کلی.....
۶۹۴	۲-۱۱ کدگذاری فاصله کمینه‌تعمیم‌یافته.....
۶۹۵	۱-۲-۱۱ مقیاس‌های فاصله و خواص آنها.....
۶۹۹	۳-۱۱ الگوریتم‌های کدگذاری چیس.....
۷۰۱	۴-۱۱ توقف جستجو: شرطی برای بهینگی.....
۷۰۴	۵-۱۱ کدگذاری آماره مرتب.....
۷۰۶	۶-۱۱ تمرین‌ها.....
۷۰۸	۷-۱۱ مراجع.....

بخش سوم: کدهای روی گراف

فصل دوازدهم: کدهای کانولوشنی.....	
۷۱۱	۱-۱۲ مقدمه و نشان‌گذاری پایه‌ای.....
۷۱۹	۱-۱-۱۲ حالت.....
۷۲۱	۲-۱۲ تعریف کدها و کدهای معادل.....
۷۲۵	۱-۲-۱۲ کدگذارهای فاجعه‌آفرین.....
۷۲۹	۲-۲-۱۲ کدگذارهای چندجمله‌ای و گویا.....
۷۳۱	۳-۲-۱۲ طول فید و کدگذارهای کمین.....
۷۳۶	۴-۲-۱۲ کدگذارهای سیستماتیک.....
۷۳۷	۳-۱۲ کدگذاری کدهای کانولوشنی.....
۷۳۷	۱-۳-۱۲ مقدمه و نشان‌گذاری.....
۷۴۱	۲-۳-۱۲ الگوریتم ویتربی.....
۷۵۲	۳-۳-۱۲ برخی از ملاحظات پیاده‌سازی.....

۷۵۲.....	عملیات پایه: جمع-مقایسه-انتخاب.....
۷۵۳.....	کدگشایی جریان‌های داده: اعمال پنجره بر روی ترلیس.....
۷۵۴.....	تصمیم‌های خروجی.....
۷۵۷.....	کدگشایی سخت و نرم؛ کوانتیزه‌سازی.....
۷۶۰.....	مسائل همگام‌سازی.....
۷۶۱.....	۴-۱۲ برخی نتایج عملکرد.....
۷۶۶.....	۵-۱۲ تحلیل خطا برای کدهای کانولوشنی.....
۷۷۰.....	۱-۵-۱۲ شمارش مسیرهای روی ترلیس.....
۷۷۵.....	شمارش بر روی گراف‌های پیچیده‌تر: قاعده میسون.....
۷۷۸.....	۲-۵-۱۲ توصیف احتمال خطای گره P_e و نرخ خطای بیت P_b
۷۸۱.....	۳-۵-۱۲ کرانی روی P_d برای کانال‌های گسسته.....
۷۸۴.....	کران عملکرد روی BSC.....
۷۸۴.....	۴-۵-۱۲ کرانی بر روی P_d برای کانال AWGN و مدوله‌سازی BPSK.....
۷۸۷.....	۵-۵-۱۲ بهره کدگذاری مجانبی.....
۷۸۸.....	۶-۱۲ جدول‌های کدهای خوب.....
۷۹۱.....	۷-۱۲ سوراخ‌شدگی.....
۷۹۳.....	۱-۷-۱۲ سوراخ‌شدگی برای رسیدن به نرخ متغیر.....
۷۹۴.....	۸-۱۲ الگوریتم‌های کدگشایی زیربهرینه برای کدهای کانولوشنی.....
۷۹۵.....	۱-۸-۱۲ نمایش‌های درختی.....
۷۹۷.....	۲-۸-۱۲ سنجه فانو.....
۸۰۱.....	۳-۸-۱۲ الگوریتم پشته.....
۸۰۴.....	۴-۸-۱۲ الگوریتم فانو.....
۸۱۴.....	۵-۸-۱۲ سایر مسائل مرتبط با کدگشایی ترتیبی.....
۸۱۵.....	۶-۸-۱۲ تغییری بر روی الگوریتم ویتربی: الگوریتم M
۸۱۵.....	۹-۱۲ کدهای کانولوشنی به عنوان کدهای بلوکی.....
۸۱۷.....	۱۰-۱۲ نمایش ترلیس برای کدهای بلوکی و چرخشی.....
۸۱۸.....	۱-۱۰-۱۲ کدهای بلوکی.....
۸۱۹.....	۲-۱۰-۱۲ کدهای چرخشی.....
۸۲۰.....	۳-۱۰-۱۲ کدگشایی کدهای بلوکی با استفاده از ترلیس.....
۸۲۱.....	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۹: برنامه‌نویسی کدگذارهای کانولوشنی.....

هدف.....	۸۲۱
پیش‌زمینه.....	۸۲۱
بخش برنامه‌نویسی.....	۸۲۲
آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱۰: کدگشاهای کانولوشنی: الگوریتم ویتربی.....	۸۲۴
هدف.....	۸۲۴
پیش‌زمینه.....	۸۲۴
بخش برنامه‌نویسی.....	۸۲۶
۱۱-۱۲ تمرین‌ها.....	۸۲۷
۱۲-۱۲ مراجع.....	۸۳۶
فصل سیزدهم: مدوله‌سازی کدشده ترلیس.....	۸۳۹
۱-۱۳ افزودن اضافات با استفاده از افزودن سیگنال.....	۸۳۹
۲-۱۳ پیش‌زمینه‌ای در مورد منظومه‌های سیگنال.....	۸۳۹
۳-۱۳ مثال‌هایی از TCM.....	۸۴۲
۱-۳-۱۳ چارچوب عمومی برای کدگذاری آن‌گروک.....	۸۵۱
۲-۳-۱۳ ایده‌افراز مجموعه‌ای.....	۸۵۲
۴-۱۳ تحلیل خطا برای کدهای TCM.....	۸۵۴
۱-۴-۱۳ ملاحظات عمومی.....	۸۵۴
۲-۴-۱۳ توصیفی از پیشامدهای خطا.....	۸۵۶
۳-۴-۱۳ کدهای TCM خوب شناخته‌شده.....	۸۶۲
۵-۱۳ کدگشایی کدهای TCM.....	۸۶۷
۶-۱۳ عدم حساسیت به چرخش.....	۸۶۷
کدگذاری تفاضلی.....	۸۷۲
برچسب‌های منظومه و افرازاها.....	۸۷۳
۷-۱۳ TCM چندبعدی.....	۸۷۶
۱-۷-۱۳ برخی از مزایای TCM چندبعدی.....	۸۷۷
۲-۷-۱۳ توری‌های منظم و زیرتوری‌ها.....	۸۷۸
تعریف‌های پایه.....	۸۷۸
توری‌های منظم متداول.....	۸۸۲
زیرتوری‌ها و دسته‌ها.....	۸۸۴

۸۸۶.....	ایده کد توری منظم.....
۸۸۶.....	منابع ایجاد بهره کدگذاری در کدهای توری منظم.....
۸۹۰.....	برخی از کدهای توری منظم خوب.....
۸۹۰.....	۸-۱۳ مثالی از TCM چندبعدی: استاندارد مودم V.34.....
۸۹۹.....	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱۱: کدگذاری و کدگشایی TCM.....
۸۹۹.....	هدف.....
۹۰۰.....	پیش‌زمینه.....
۹۰۰.....	بخش برنامه‌نویسی.....
۹۰۰.....	۹-۱۳ تمرین‌ها.....
۹۰۳.....	۱۰-۱۳ مراجع.....

بخش چهارم: کدهای با کدگشایی تکراری

۹۰۷.....	فصل چهاردهم: کدهای توربو.....
۹۰۷.....	۱-۱۴ مقدمه.....
۹۱۰.....	۲-۱۴ کدگذاری کدهای تودرتوی موازی.....
۹۱۴.....	۳-۱۴ الگوریتم‌های کدگشایی توربو.....
۹۱۵.....	۱-۳-۱۴ الگوریتم کدگشایی MAP.....
۹۱۶.....	۲-۳-۱۴ نشان‌گذاری.....
۹۱۸.....	۳-۳-۱۴ احتمال پسین.....
۹۲۱.....	۴-۳-۱۴ محاسبه α_t و β_t
۹۲۳.....	۵-۳-۱۴ محاسبه γ_t
۹۲۴.....	۶-۳-۱۴ نرمال‌سازی.....
۹۲۵.....	۷-۳-۱۴ خلاصه الگوریتم BCJR.....
۹۲۸.....	۸-۳-۱۴ یک فرمول‌بندی ماتریسی.....
۹۲۹.....	۹-۳-۱۴ مقایسه الگوریتم ویتربی و الگوریتم BCJR.....
۹۲۹.....	۱۰-۳-۱۴ الگوریتم BCJR برای کدهای سیستماتیک.....
۹۳۲.....	۱۱-۳-۱۴ کدگشایی توربو با استفاده از الگوریتم BCJR.....
۹۳۵.....	حالت‌های اختتام کدگذارها.....
۹۳۵.....	۱۲-۳-۱۴ کدگشایی نسبت درستی.....

نسبت پیشین لگاریتمی $\lambda_{p,t}$	۹۳۷
احتمال پسین لگاریتمی $\lambda_{s,t}^{(.)}$	۹۳۸
بیان الگوریتم کدگشایی توربو.....	۱۳-۳-۱۴
۱۴-۳-۱۴ معیار توقف کدگشایی توربو.....	۹۳۹
معیار توقف آنتروپی متقاطع.....	۹۴۰
معیار نسبت تغییر علامت (SCR).....	۹۴۲
معیار کمک از تصمیم‌های سخت (HDA).....	۹۴۲
تغییراتی در الگوریتم MAP.....	۱۵-۳-۱۴
الگوریتم Max-Log-MAP.....	۹۴۲
اصلاحاتی بر روی الگوریتم Max-Log-MAP.....	۱۶-۳-۱۴
الگوریتم ویتربی خروجی-نرم.....	۱۷-۳-۱۴
کف خطا و توزیع‌های وزنی.....	۴-۱۴
کف خطا.....	۱-۴-۱۴
نازک شدن طیفی و جایگردان‌های تصادفی.....	۲-۴-۱۴
نکاتی در مورد جایگردان‌ها.....	۳-۴-۱۴
تحلیل نمودار EXIT.....	۵-۱۴
نمودار EXIT.....	۱-۵-۱۴
کد بلوکی توربو.....	۶-۱۴
جبران‌ساز توربو.....	۷-۱۴
معرفی جبران‌ساز توربو.....	۱-۷-۱۴
چارچوب جبران‌سازی توربو.....	۲-۷-۱۴
آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱۲: کدگشایی کد توربو.....	۹۷۲
هدف.....	۹۷۲
پیش‌زمینه.....	۹۷۲
بخش برنامه‌نویسی.....	۹۷۲
تمرین‌ها.....	۸-۱۴
مراجع.....	۹-۱۴
فصل پانزدهم: کدهای بررسی توازن کم‌چگال.....	۹۸۱
مقدمه.....	۱-۱۵

۹۸۲.....	۲-۱۵ کدهای LDPC: نحوه ساخت و نشان گذاری
۹۸۹.....	۳-۱۵ گراف های تنر
۹۸۹.....	۴-۱۵ ارسال بر روی یک کانال گوسی
۹۹۱.....	۵-۱۵ کدگشایی کدهای LDPC
۹۹۳.....	۱-۵-۱۵ قدم عمودی: به روزرسانی $q_{mn}(x)$
۹۹۸.....	۲-۵-۱۵ قدم افقی: به روزرسانی $r_{mn}(x)$
۱۰۰۲.....	۳-۵-۱۵ مقداردهی اولیه و خاتمه الگوریتم کدگشایی
۱۰۰۳.....	۴-۵-۱۵ خلاصه الگوریتم
۱۰۰۵.....	۵-۵-۱۵ نقطه نظر گذر پیام
۱۰۰۶.....	۶-۵-۱۵ روابط کدگشای نسبت درستی
۱۰۱۱.....	۶-۱۵ چرا کدهای بررسی توازن کم چگال؟
۱۰۱۳.....	۷-۱۵ کدگشای تکراری بر روی کدهای بلوکی عمومی
۱۰۱۴.....	۸-۱۵ تکامل چگالی
۱۰۲۱.....	۹-۱۵ نمودارهای EXIT برای کدهای LDPC
۱۰۲۶.....	۱۰-۱۵ کدهای LDPC غیر منظم
۱۰۲۷.....	۱-۱۰-۱۵ زوج های توزیع درجه
۱۰۲۸.....	۲-۱۰-۱۵ برخی کدهای خوب
۱۰۳۰.....	۳-۱۰-۱۵ تکامل چگالی برای کدهای غیر منظم
۱۰۳۴.....	۴-۱۰-۱۵ محاسبه و بهینه سازی تکامل چگالی
۱۰۳۵.....	۵-۱۰-۱۵ استفاده از کدهای غیر منظم
۱۰۳۵.....	۱۱-۱۵ مباحث بیشتر بر روی ساخت کدهای LDPC
۱۰۳۶.....	۱-۱۱-۱۵ روش ساختی بر مبنای هندسه های متناهی
۱۰۳۶.....	۲-۱۱-۱۵ روش ساختی بر مبنای سایر اشیاء ترکیبی
۱۰۳۷.....	۱۲-۱۵ کدگذاری کدهای LDPC
۱۰۴۰.....	۱۳-۱۵ یک شکل تغییر یافته: کدهای ماتریس سازنده کم چگال
۱۰۴۰.....	۱۴-۱۵ کدهای تودرتوی سری؛ کدهای تکرار-انباشت
۱۰۴۳.....	۱-۱۴-۱۵ کدهای RA غیر منظم
۱۰۴۴.....	آزمایشگاه برنامه سازی ۱۳: برنامه نویسی یک کدگشای LDPC
۱۰۴۴.....	هدف
۱۰۴۴.....	پیش زمینه

۱۰۴۶	تکلیف
۱۰۴۸	ملاحظات عددی
۱۰۴۸	۱۵-۱۵ تمرین‌ها
۱۰۵۵	۱۶-۱۵ مراجع

فصل شانزدهم: الگوریتم‌های کدگذاری بر روی گراف‌ها ۱۰۵۷

۱۰۵۷	۱-۱۶ مقدمه
۱۰۵۸	۲-۱۶ عملیات در نیمه حلقه‌ها
۱۰۶۰	۳-۱۶ توابع بر روی دامنه‌های محلی
۱۰۶۶	۴-۱۶ گراف‌های عامل و به حاشیه رانی
۱۰۶۸	۱-۴-۱۶ به حاشیه رانی بر روی یک متغیر
۱۰۷۳	۲-۴-۱۶ به حاشیه رانی بر روی همه تک متغیرها
۱۰۷۷	۵-۱۶ کاربردها در کدگذاری
۱۰۷۷	۱-۵-۱۶ کدهای بلوکی
۱۰۷۸	۲-۵-۱۶ گذر پیام اصلاح‌شده برای متغیرهای دودویی
۱۰۸۰	۳-۵-۱۶ پردازش ترلیس و الگوریتم رو به جلو و عقب
۱۰۸۴	۴-۵-۱۶ کدهای توربو
۱۰۸۴	۶-۱۶ خلاصه‌ای از الگوریتم‌های کدگذاری بر روی گراف
۱۰۸۵	۷-۱۶ تبدیل‌های گراف‌های عامل
۱۰۸۵	۱-۷-۱۶ خوشه‌بندی
۱۰۸۷	۲-۷-۱۶ بسط گره‌های متغیر
۱۰۸۹	۳-۷-۱۶ محاسبه دقیق گراف‌های دارای دور
۱۰۹۲	۸-۱۶ تمرین‌ها
۱۰۹۵	۹-۱۶ مراجع

بخش پنجم: کدگذاری فضا-زمان

۱۰۹۹	فصل هفدهم: کانال‌های محوشدگی و کدهای فضا-زمان ۱۰۹۹
۱۰۹۹	۱-۱۷ مقدمه
۱۰۹۹	۲-۱۷ کانال‌های محوشدگی

۱۱۰۴	.....	۱-۲-۱۷	محوشدگی رایلی
۱۱۰۶	.....	۳-۱۷	ارسال و دریافت چندگانگی: کانال MIMO
۱۱۰۸	.....	۱-۳-۱۷	کانال MIMO باند باریک
۱۱۰۹	.....	۲-۳-۱۷	عملکرد چندگانگی در حضور ترکیب با نسبت بیشین
۱۱۱۱	.....	۴-۱۷	کدهای بلوکی فضا-زمان
۱۱۱۱	.....	۱-۴-۱۷	کد الموتی
۱۱۱۴	.....	۲-۴-۱۷	یک فرمول بندی کلی تر
۱۱۱۴	.....	۳-۴-۱۷	محاسبه عملکرد
۱۱۱۷	.....		طرح‌های متعامد حقیقی
۱۱۱۸	.....		کدگذاری و کدگشایی بر اساس طرح‌های متعامد
۱۱۲۰	.....		طرح‌های متعامد حقیقی تعمیم یافته
۱۱۲۲	.....	۴-۴-۱۷	طرح‌های متعامد مختلط
۱۱۲۴	.....	۵-۱۷	کدهای ترلیس فضا-زمان
۱۱۲۹	.....	۱-۵-۱۷	تودرتوسازی
۱۱۲۹	.....	۶-۱۷	چند آنتن؟
۱۱۳۲	.....	۷-۱۷	تخمین اطلاعات کانال
۱۱۳۳	.....	۸-۱۷	تمرین‌ها
۱۱۳۵	.....	۹-۱۷	مراجع
۱۱۳۷	.....		پیوست الف: جبر درست‌نمایی لگاریتمی
۱۱۴۰	.....		الف-۱ تمرین‌ها
۱۱۴۳	.....		مراجع
۱۱۶۳	.....		تصحیح‌ها
۱۱۷۷	.....		اختصارها
۱۱۸۱	.....		واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۱۲۱۵	.....		واژه‌نامه انگلیسی به فارسی
۱۲۴۹	.....		فهرست الفبایی

پیشگفتار مترجم

نظریه کدگذاری تصحیح خطا یکی از دروس مهم در رشته مهندسی برق-مخابرات است که اغلب با عنوان "تئوری کدینگ" در دانشگاه‌های مختلف ایران ارائه می‌شود. از آنجا که یکی از بخش‌های بسیار مهم هر سامانه مخابراتی دیجیتال نوینی، بخش کنترل خطا است، می‌توان گفت که فهم درست و دقیق از نظریه کدگذاری تصحیح خطا برای فارغ‌التحصیلان و محققین این رشته کاملاً ضروری است. هرچند، تعدادی از اساتید و محققان دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی کشور، گام‌هایی برای ترجمه یا تألیف کتاب‌هایی مرتبط با این زمینه برداشته‌اند، اما فقدان وجود یک کتاب نسبتاً کامل آموزشی به زبان فارسی که بتواند جنبه پژوهشی قدرتمندی نیز داشته باشد، کاملاً مشهود بوده است.

انتخاب این کتاب برای ترجمه، دلایل بسیاری داشت: اول اینکه این کتاب توازن بسیار خوبی بین مسائل نظری و عملی برقرار ساخته است. همان‌طور که در پیشگفتار نویسنده هم اشاره شده است، در ایجاد نظریه کدگذاری تصحیح خطا، حوزه‌های غنی و متنوعی از ریاضیات نقش داشته‌اند و این مسئله گاهی اوقات سبب پیچیدگی مباحث می‌شود. با در نظر گرفتن این موضوع، کتاب پیش رو تلاش می‌کند هیچ الگوریتم یا روشی را بدون دلیل و اثبات علمی ارائه نکند، با این حال نویسنده در میزان ارائه روش‌های ریاضی پیچیده دقت زیادی به خرج داده است تا بیش از نیاز خواننده (و در نتیجه مایوس کردن او از ادامه کار) نباشد. دوم اینکه در این کتاب ارائه مباحث ریاضی مرتبط با هر موضوع، در بخش مربوط به همان موضوع انجام شده است. این امر باعث می‌شود که خواننده بتواند به راحتی با مباحث ریاضی ارتباط برقرار نموده و لزوم یادگیری آنها را درک نماید. سوم اینکه حضور پررنگ پیاده‌سازی نرم‌افزاری الگوریتم‌ها در این کتاب جنبه کاربردی بودن آن را بسیار پررنگ کرده است. این موضوع از این جهت اهمیت دارد که دانشجو می‌تواند به راحتی ارتباط بین مسائل نظری و عملی را درک نماید. همچنین، این مسئله باعث می‌شود که چنین کتابی برای محققین فعال در این حوزه نیز بسیار جذاب گردد. در نهایت اینکه وجود مراجع متعدد در کتاب باعث می‌شود که یک خواننده مشتاق بتواند سرنخ مباحث را یافته و آنها را در فضای تحقیقاتی که به سرعت در حال تغییر و تحول است، دنبال نماید.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ترجمه پیش رو، وجود توضیح‌های تکمیلی مترجم (به صورت پاورقی) و همچنین تصحیح‌هایی نسبت به کتاب اصلی می‌باشد. در کتاب اصلی ایرادهایی مشاهده می‌شود که بسیاری از آنها احتمالاً اشتباه‌های تایپی هستند. با این حال، برای خواننده‌ای که چندان در این حوزه عمیق نیست، برخی از این اشتباه‌ها واضح نبوده و ممکن است او را دچار مشکل در فهم مطالب نماید. علاوه بر این، محققینی که از این کتاب استفاده می‌کنند، نیاز دارند تا مفاهیم و روابطی دقیق را در پژوهش‌های کاربردی خود به کار بندند و لذا باید با روابطی کاملاً صحیح سروکار داشته باشند. به

هنگام ترجمه کتاب و در جهت تکمیل و اصلاح آن، هر کجا در صحت مطلبی تردید می‌کردم، با مراجعه به مراجع مرتبط که در کتاب هم به آنها ارجاع داده شده، شک خود را برطرف کرده و در صورت لزوم اصلاحات را انجام می‌دادم. این اصلاحات در انتهای کتاب (و در بخش تصحیح‌ها) فهرست شده‌اند. گاهی اوقات نیز، به نظرم می‌رسید که شاید بهتر است توضیحی در جهت فهم بهتر موضوع ارائه دهم. این توضیح‌ها نیز به صورت پاورقی و تحت عنوان توضیح مترجم آورده شده است. جز در این موارد، در سایر قسمت‌ها تلاش بسیاری در رعایت امانت‌داری و حفظ ساختار کتاب اصلی در حین ترجمه شده است. بدیهی است که ترجمه پیش رو نیز عاری از اشتباه نیست، هرچند با وسواسی زیاد و دقتی مداوم، سعی شده است که نسخه‌ای بدون ایراد به خواننده ارائه شود.

پس از اتمام ترجمه کتاب که بیش از یک سال به طول انجامید، همراهانی عزیز و دوست‌داشتنی، مرا در ویرایش و آماده‌سازی کتاب یاری کردند. همسر عزیزم، خانم مهندس راحیل زرگری نژاد که همیشه همراه فوق‌العاده مهربان و صبوری برای من بوده است، بازتولید شکل‌های ۱۲ فصل ابتدایی کتاب را به عهده گرفت. یکی دیگر از کسانی که لازم است به طور ویژه از او تشکر کنم، آقای مهندس مسعود رضایی دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات دانشگاه تهران است. ایشان با وسواس و دقت زیاد تطبیق دقیق روابط ریاضی کتاب اصلی و ترجمه (و یافتن ایرادات احتمالی آن) را به عهده گرفت. در پایان نیز لازم می‌دانم که از افراد زیر که همگی از دانشجویان کارشناسی ارشد مخابرات دانشگاه تهران هستند و هرکدام در ویرایش چند فصل با من همراه بودند تشکر نمایم:

- آقای مهندس بهزاد خمیده‌ی
- آقای مهندس حسام عراقی
- آقای مهندس پیمان طهرانی

مهدی تیموری

استادیار دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

پیشگفتار نویسندگان

هدف این کتاب ارائه یک معرفی جامع از کدگذاری تصحیح خطا است به نحوی که علاوه بر پوشش کدهای کلاسیک بلوکی و مبتنی بر ترلیس توسط کتاب، خواننده بتواند با پیشرفت‌های رخ داده در کدهای مبتنی بر کدگشایی تکراری مانند کدهای توربو و کدهای LDPC آشنا گردد. روش ارائه مطالب به شکلی است که بتواند هم برای مهندسان (که نیاز به درک ساختار الگوریتمی در جهت به‌کارگیری و پیاده‌سازی کدگذاری تصحیح خطا دارند) و هم برای محققان (که نیاز به پیش‌زمینه کافی در جهت مطالعه، فهم و در نهایت تولید دانش در این زمینه دارند) مفید واقع شود. در حقیقت، جنبه‌های الگوریتمی و عملی موضوع به شکلی دقیق و انگیزشی بر مبنای یک پایه ریاضی محکم بنا نهاده شده است.

ویژگی‌های آموزشی

از همان شروع، برای ایجاد نظریه کدگذاری از حوزه‌های غنی و متنوعی از ریاضیات که در تعامل نزدیک با یکدیگر هستند، استفاده شده است. این حوزه‌ها شامل نظریه آشکارسازی، نظریه اطلاعات، جبر خطی، هندسه‌های متناهی، ترکیبیات، بهینه‌سازی، نظریه سیستم، احتمال، هندسه جبری، نظریه گراف، طراحی‌های آماری، توابع بولی، نظریه اعداد و جبر مدرن بوده است. سطح پیچیدگی در طی زمان افزایش یافته است: جبر از فضاهای برداری به سمت مدول‌ها حرکت کرده است؛ حوزه کاربرد از درون‌یابی چندجمله‌ای به سمت درون‌یابی گویا رفته است؛ الگوریتم ویتربی راهی برای ورود BCJR فراهم کرده است. این حد از غنا ممکن است دانشجویان را سردرگم نماید، به خصوص دانشجویان مهندسی که برای مواجهه با مسائل محض و حل آنها آمادگی ندارند. لذا مهم است که انگیزش حرکت به سمت ریاضیات را با دقت زیادی برای آنها فراهم نماییم.

برخی از جنبه‌های مهم آموزشی این کتاب به شرح زیر است.

- بیشتر کتاب‌های درسی حوزه کدگذاری تصحیح خطا که برای مهندس‌ها نوشته شده است، عمده مطالب ریاضی را در یک فصل متمرکز می‌کنند. با این حال در این کتاب، مفاهیم در طی چندین فصل توسعه داده می‌شوند به نحوی که بتوان بلافاصله بعد از ارائه از آنها استفاده نمود. من تلاش کرده‌ام که ریاضیات را در مواقع مناسبی که مورد نیاز هستند و انگیزه کافی برای فهم آنها وجود دارد، ارائه نمایم. جبر خطی و گروه‌ها برای توصیف کدهای بلوکی خطی کافی هستند. برای ارائه کدهای چرخشی، نیاز به فهم حلقه‌های چندجمله‌ای داریم. طراحی کدهای چرخشی، نیاز به میدان‌های متناهی و ابزارهایی مرتبط در نظریه اعداد دارد. این شکل از پراکندگی مفاهیم ریاضی که متناسب با کاربرد انجام شده است، منجر به فهمی عمیق‌تر و وسیع‌تر می‌شود.

• در شروع، برای بیشتر دانشجویان مهندسی، میدان‌های متناهی، الگوریتم برلکمپ-مسی، الگوریتم ویتربی، BCJR و سایر جنبه‌های نظریه کدگذاری، مفاهیمی انتزاعی و غیر ملموس هستند. پیاده‌سازی نرم‌افزاری این الگوریتم‌ها باعث می‌شود که این مفاهیم انتزاعی به واقعیتی معنادار تبدیل شود. این کار در مقایسه با حالتی که فقط از تمرین‌های دستی و آزمون‌های کلاسی استفاده می‌شود، درکی عمیق‌تر به دانشجو می‌دهد. حتی وقتی دانشجویان این مفاهیم را به خوبی درک کرده‌اند و آمادگی انجام تکالیف دستی را دارند، این برنامه‌ها همچنان نقشی تأکیدی دارند که می‌توانند در انجام تمرین‌ها به دانشجو کمک نمایند. با این روش، فهم دانشجو از موضوع، صرفاً مفهومی نخواهد بود و جنبه تجربی نیز پیدا می‌کند.

معمولاً زمانی که دانشجو سعی در آموزش یک موضوع به کسی (یا چیزی) دیگر را دارد، فهم خودش از آن موضوع افزایش می‌یابد. در حقیقت، برای آموزش یک مفهوم، دانشجو نیاز دارد که درکی دقیق و ویژه از آن موضوع را آماده نماید. حال در نظر بگیرید که آن چیزی که قرار است این مفاهیم به او آموزش داده شود یک رایانه باشد که علاوه بر کندذهن بودنش، باید با آن بسیار دقیق صحبت کرد. در این فرایند، رایانه می‌تواند از طریق خطایابی و آزمایش برنامه به دانشجو بازخورد دهد که این موضوع سبب تقویت یادگیری می‌شود.

در درس کدگذاری ارائه شده توسط من، دانشجویان کدگذارها و کدگشاهای متنوعی را پیاده‌سازی می‌کنند که شامل کدگذارها و کدگشاهای رید-سالمون، کدگشاهای کانولوشنی، کدگشاهای کد توربو و کدگشاهای LDPC است. در اثر این فعالیت‌های برنامه‌سازی، دانشجویان از فهم بر روی کاغذ نظریه کدگذاری، به چشم‌اندازی از قابلیت‌های نظریه کدگذاری و کاربرد عملی آن می‌رسند. مشاهده یکی از همکارانم این بود که بعد از اولین درس در زمینه نظریه کدگذاری، بسیاری از دانشجویان بیش از آنکه در این زمینه مطلع شوند، سردرگم می‌شوند. تجربه‌ای که من از این تمرین‌های برنامه‌سازی داشتم، این است دانشجویان من دست کم بسیار اعتماد به نفس دارند و آمادگی روبرو شدن با چالش‌های بیشتری را در خود می‌بینند.

در این کتاب، تمرین‌های برنامه‌سازی توسط ۱۳ آزمایشگاه برنامه‌سازی ارائه شده است. پشتوانه این تمرین‌ها، کدهایی هستند که بیشتر زیرساخت نرم‌افزاری را فراهم نموده‌اند تا از این طریق اجازه دهند دانشجویان فقط بر روی الگوریتم‌ها تمرکز نمایند.

این آزمایشگاه‌ها همچنین به پوشش مطالب درسی کمک می‌کنند. در درس خودم، من قادر هستم که برخی از مطالب آموزشی را در کلاس ارائه نکنم و مطالعه آن را به دانشجویان واگذار نمایم. دلیل این کار این است که مطمئن هستم دانشجویان برای پیاده‌سازی الگوریتم‌ها نیاز به یادگیری دقیق آنها دارند. الگوریتم اقلیدسی یک مثال از موضوعاتی است که من به این شکل ارائه می‌دهم.

از آنجا که در کدگذاری کنترل خطا، معمولاً ابزار تحلیلی کمی وجود دارد و نیاز زیادی به شبیه‌سازی داریم، وجود یک کتابخانهٔ منعطف از ابزارهای محاسباتی می‌تواند کمک شایانی به تحقیق در این حوزه نماید. آزمایشگاه‌های برنامه‌سازی ارائه‌شده در این کتاب، می‌تواند پایه‌ای را برای یک کتابخانهٔ تحقیقاتی فراهم نماید. مزیت این کتابخانه این است که اجزای اساسی برنامه‌ها نوشته شده‌اند و با توجه به این موضوع، محققین می‌توانند به سادگی آنها را تغییر داده و توسعه دهند.

در پرتوی این ویژگی‌های آموزشی است که این کتاب زیرعنوان *الگوریتم‌ها و روش‌های ریاضی را* یدک می‌کشد.

برای یک درس یک‌ترمی یا دو‌ترمی مبتنی بر این کتاب، مطالب کافی در این کتاب وجود دارد. حتی برای اساتیدی که تمایل دارند تمرکز کمتری بر روی جنبه‌های پیاده‌سازی و آزمایشگاه‌ها داشته باشند، این کتاب کافی است.

بیش از ۱۵۰ برنامه، تابع و فایل‌های دادهٔ مرتبط با کتاب وجود دارد. این برنامه‌ها در MATLAB، C و یا ++C نوشته شده‌اند. برخی از آنها قابلیت اجرا شدن دارند و می‌توانند جداول چندجمله‌ای‌ها اولیه (بر روی هر میدان اول)، دسته‌های سیکلوتومی، چندجمله‌ای‌های کمین و کدهای BCH (نه فقط با معنای محدود) را فراهم نمایند. بخش دیگری از توابع نیز شامل آنهایی است که برای محاسبهٔ نتایج و ترسیم آنها در کتاب مورد استفاده قرار گرفته است. این توابع مثالی از نحوهٔ استفادهٔ عملی از نتایج نظری است. سایر توابع نیز آنهایی هستند که برای تمرین‌های برنامه‌سازی استفاده می‌شوند. برنامه‌ها، توابع و فایل‌ها در محل مورد استفادهٔ خود و در جدول‌هایی تحت عنوان **برنامه‌های رایانه‌ای مرتبط** مشخص شده‌اند.

برنامه‌های رایانه‌ای مرتبط:

LabIntro.pdf: معرفی آزمایشگاه‌های برنامه‌سازی

این فایل‌ها در تارنمای زیر قابل دسترسی هستند:

ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/error_control

سایر جنبه‌های این کتاب به شرح زیر هستند:

- بسیاری از پیشرفت‌های اخیر در حوزهٔ کدگذاری در نتیجهٔ رسیدن به این نگاه بوده است که کدگذاری یک مسئلهٔ آشکارسازی است. به همین دلیل، کتاب با یک چارچوب مخابرات

- دیجیتال شروع می‌شود که در آن نیز گریزی به **نظریه آشکارسازی** هم داریم.
- کدهای جدید قابلیت رسیدن به نزدیکی حد ظرفیت را دارند. لذا مهم است که مفهوم ظرفیت و ارسال در حد ظرفیت را درک کنیم. فصل اول همچنین خلاصه‌ای از **نظریه اطلاعات** را ارائه می‌دهد تا بتواند کدگذاری را به زمینه‌های تاریخی و مدرنش ارتباط دهد. این بخش از نظریه اطلاعات در تحلیل نمودار EXIT برای کدهای توربو و LDPC نیز به کار می‌آید.
 - از لحاظ آموزشی، کدهای همینگ برای صحنه‌سازی اولیه در این کتاب استفاده شده‌اند تا بتوان با استفاده از آنها مفاهیم کدهای بلوکی، کدهای چرخشی، ترلیس و گراف‌های تنر را به سادگی بیان نمود.
 - تمرین‌ها از منابع متعددی گرفته شده‌اند و دارای سطوح مختلفی از سختی و پیچیدگی می‌باشند. برخی از تمرین‌ها عددی هستند که باعث می‌شوند بتوانیم درک مفاهیم پایه را مورد آزمایش قرار دهیم. سایر تمرین‌ها نیز فرصتی را فراهم می‌کنند تا بتوانیم مفاهیم را اثبات کرده و یا آنها را توسعه دهیم. به دلیل وجود تمرین‌های کامپیوتری، در تعدادی کمی از تمرین‌ها کدگشایی یک رشته مشخص مد نظر گرفته است، زیرا خود من قائل به این نظر هستم که بهتر است به کامپیوتر بگوییم چطور آن را انجام دهد تا اینکه خودمان به صورت دستی آن را انجام دهیم. در گردآوری این تمرین‌ها، علاوه بر استفاده از منابع متعدد، از مسائلی استفاده کرده‌ام که یا خود به عنوان دانشجو با آنها روبرو شده‌ام و یا آنها را در طی سالیان متمادی به عنوان تمرین و یا سؤال امتحان به دانشجویانم داده‌ام.
 - مفاهیم نظریه اعدادی مانند بخش‌پذیری، هم‌نهستی و قضیه باقیمانده چینی تشریح شده‌اند.
 - در بخش‌هایی از کتاب، ارتباط بین مفاهیم نظریه کدگذاری و سایر مباحث مرتبط مانند **رمزگذاری کلید عمومی و رشته‌های ثبات انتقال** مورد اشاره قرار گرفته است. این کار باعث افزوده شدن چاشنی و ایجاد انگیزش در دانشجویان می‌شود، زیرا به آنها می‌فهماند که مفاهیم مورد بررسی دارای کاربرد وسیع‌تری هستند.
 - با بررسی مجدد تعریف اولیه کدهای رید-سالمون، پیشرفت زیادی در کدگشایی این کدها صورت گرفته است. به همین دلیل، در این کتاب کدهای رید-سالمون هم در شکل قدیمی (تصویر یک تابع چندجمله‌ای) و هم با کمک یک چندجمله‌ای سازنده (دارای توان‌های متوالی یک عنصر اولیه به عنوان ریشه) تعریف شده‌اند. این باعث می‌شود که بتوان چندین الگوریتم کدگشایی را برای این کدها ارائه داد. این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم‌های حوزه فرکانس، **الگوریتم ولج-برلکمپ و الگوریتم گوروسوامی-سودان با ورودی-نرم** هستند.
 - **کدهای توربو**، شامل تحلیل نمودار EXIT، هم با استفاده از الگوریتم کدگشایی BCJR و هم با

- استفاده از الگوریتم کدگذاری SOVA ارائه شده‌اند. همچنین، هر دو نگاه احتمالی و درست‌نمایی برای کدگذاری مورد توجه قرار گرفته است.
- **کدهای LDPC** نیز با تأکید بر الگوریتم کدگذاری ارائه شده‌اند. علاوه بر این، تحلیل تکامل چگالی نیز مورد توجه قرار گرفته است.
- **الگوریتم‌های کدگذاری بر روی گراف‌ها** نیز مورد توجه قرار گرفته است. این الگوریتم‌ها در حقیقت شکلی کلی از الگوریتم‌هایی هستند که برای کدگذاری کدهای توربو و LDPC مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- خلاصه‌ای از **جبر درست‌نمایی لگاریتمی** نیز معرفی شده است که در کدگذاری تصمیم‌نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- **کدهای فضا-زمان** نیز معرفی شده‌اند که برای سامانه‌های چندآنتنی در کانال‌های محوشدگی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

طرح درس

طرح‌های درس مختلفی می‌توان در نظر گرفت. در یک درس یک‌ترمی، من به شکلی سبک، موضوعات پایه‌ای کدهای بلوکی، ترلیس و کدهای دارای کدگذاری تکراری را مطرح می‌کنم. یک طرح درس یک‌ترمی پیشنهادی به این شرح است:

فصل ۱: فقط مطالب اساسی.

فصل ۲: همه.

فصل ۳: مطالب اساسی.

فصل ۴: بیشتر فصل. کدهای CRC و LFSR ها را به آزمایشگاه‌های برنامه‌سازی محول کنید.

فصل ۵: بیشتر فصل. الگوریتم اقلیدسی را به آزمایشگاه برنامه‌سازی محول کنید؛ RSA و CRT را از قلم بیندازید.

فصل ۶: مباحث پایه‌ای.

فصل ۱۲: بیشتر فصل. موضوع سوراخ کردن، الگوریتم‌های مبتنی بر پشته و توصیف ترلیس برای کدهای بلوکی را از قلم بیندازید.

فصل ۱۳: بیشتر فصل. موضوع ۷.34 را از قلم بیندازید.

فصل ۱۴: تعریف پایه‌ای و الگوریتم BCJR.

فصل ۱۵: تعریف پایه‌ای و کدگذاری جمع-ضرب.

یک راهنمایی برای انتخاب مواد درس می‌تواند این باشد: آزمایشگاه‌های برنامه‌سازی را دنبال کنید.

برای تکمیل هر ۱۳ آزمایشگاه، لازم است که مطالب را گزینشی ارائه دهید. اگر بخواهید یک درس دوترمی ارائه دهید، بهتر است یک ترم را به کدهای بلوکی اختصاص دهید و ترمی دیگر را به تریس و کدهای دارای کدگشایی تکراری اختصاص دهید. با این کار می‌توان تمامی کتاب را پوشش داد و حتی شاید بتوان برخی از جدیدترین نتایج تحقیقات در این حوزه را هم به آن افزود. خواننده باید بداند که برای شماره‌گذاری قضیه‌ها، لم‌ها و نتیجه‌های مربوط به قضیه‌ها در هر فصل، فقط از یک شمارنده استفاده شده است (مثلاً لم بعد از قضیه ۱۰، لم ۱۱ است). مثال‌ها، تعریف‌ها، شکل‌ها و معادله‌ها نیز دارای شمارنده مخصوص به خود هستند. در انتهای همه تعریف‌ها، اثبات‌ها و مثال‌ها نیز از نماد □ استفاده شده است.

استفاده از رایانه

آزمایشگاه‌های مبتنی بر رایانه، ابزارهایی برای تمرین جزئیات محاسباتی هستند که در صورت عدم استفاده از آنها، نیاز به محاسبات دستی طاقت‌فرسا خواهد بود. در این راستا، ابزارهای رایگان و غیر رایگان زیادی وجود دارد. در `comptut.pdf` (قابل دریافت در تارنمای مربوط به کتاب) یک معرفی خلاصه برای نرم‌افزارهای GAP و MAGMA ارائه شده است که می‌تواند در انجام تکلیف‌ها و یا تحقیقات در این حوزه مفید باشد.

برنامه‌های رایانه‌ای مرتبط:

`comptut.pdf`: معرفی نرم‌افزارهای محاسباتی GAP و MAGMA

تشکر و قدردانی

- در ذهن من، اهداف یک کتاب درسی به این شرح است:
۱. فراهم کردن یک نقشه توپوگرافی در زمینه مورد مطالعه که بتواند قله‌ها و مسیرهای منتهی به آنها را نشان دهد. (البته در زمینه‌ای با غنای بالا، مانند نظریه کدگذاری، پوشش کامل غیر ممکن است.)
 ۲. فراهم کردن جزئیات دقیق در مورد روش‌های مهم.
 ۳. ارائه تمرین‌های چالشی که باعث تقویت فهم دانشجویان از موضوع و عرضه چشم‌اندازهای جدید به آنها شود.
 ۴. دارای ارزش ارجاعی باشد تا متخصصین به استفاده از آن ادامه دهند.
 ۵. فراهم‌سازی ارجاعاتی به منابع علمی به نحوی که خواننده بتواند کشفیات خود را داشته باشد.

(توجه داشته باشید که در زمینه کدگذاری کانال که بسیار با سرعت پیشرفت می‌کند، مراجع صرفاً می‌توانند نکات برجسته را مشخص کنند؛ جستجوی مبتنی بر اینترنت شکل کار را به کلی در سال‌های اخیر تغییر داده است. علیرغم همه اینها، داشتن یک نقطه شروع در منابع علمی، کماکان مهم است.)

مشکل بزرگی که با آن روبرو بودم، گزینش موضوعها بود. این حوزه به حدی غنی است که نمی‌توان در یک کتاب آن را منعکس نمود. هر شماره از مجله *IEEE Transactions on Information Theory* و هر کنفرانس منجر به نتایج مهم و جدیدی می‌شود. محدودیت‌های انتشارات و سایر محدودیت‌ها مانع از جامع بودن این کتاب شده است. نقش من به عنوان نویسنده فقط این بوده است که بخش‌هایی از کل نقشه را گزینش و در یک شکل آموزشی مفید ارائه نمایم. در این راستا، هدف من این بوده است که ابزارهایی را برای شاغلین این حوزه و دانشجویان انتخاب نمایم. به غیر از نقش گزینشگر، هیچ ادعایی بر نوآوری ندارم؛ امیدوارم به درستی و در جاهای مناسب، به افراد و مقالات اشاره کرده باشم.

این کتاب، نتیجه تدریس درس کدگذاری تصحیح خطا در دانشگاه ایالتی یوتا به مدت بیش از یک دهه بوده است. در طی این زمان، من از روی کتاب‌های [۳۳]، [۳۷۳] و [۲۰۳] تدریس کرده‌ام که این موضوع با توجه به متن کتاب کاملاً مشهود است. بخش‌هایی از چند فصل این کتاب، بر اساس جزوه‌های مبتنی بر این کتاب‌ها بوده است که این ارتباط نیز کاملاً مشهود است. احساس اجبار داشتم که بسیاری از تمرین‌های اولین درس را که بر اساس [۲۰۳] بوده است، در این کتاب بیاورم. این کتاب‌ها اساس فهم متون کدگذاری تصحیح خطا را برای من فراهم کردند. من همچنین خود را مدیون غنای نظری در [۲۲۰]، ارائه کدگذاری ترلیس در [۳۰۳]، بحث کران‌ها در [۳۵۰]، پوشش کامل روش‌های کدگذاری توربو در [۱۴۱] و همچنین محققین و مفسرینی می‌دانم که کار آنها منجر به فهم بیشتر من از موضوع شده است.

همچنین از محیط حمایتگر دانشگاه ایالتی یوتا سپاسگزارم که باعث شد بتوانم این مسئولیت را به عهده گرفته و آن را به اتمام برسانم. دانشجویان درس نظریه کدگذاری در طی سالیان متمادی در تولید اساس این کتاب مشارکت داشته‌اند. به خصوص دانشجویان کلاس ECE 7670 در بهار سال ۲۰۰۵ به دقت در ویرایش متن به من کمک کردند. استوارت وبر و ری رالیسون کیفیت کدهای C++ من را بهبود دادند. از اوجس چائوهان به خاطر تولید نمودارهای عملکرد کدهای کانولوشنی تشکر می‌کنم. به طور ویژه از جان کراکت تشکر می‌کنم که به دقت تحلیل نمودار EXIT برای کدهای LDPC را مطالعه کرده و مواردی را به آن اضافه نمود. او همچنین حل تمرین سه فصل اول را به عهده گرفت. با تمامی کمکی که در نوشتن این کتاب داشتم، تنها خودم را مسئول اشتباهات احتمالی آن می‌دانم.

این کتاب را به شش فرزند فوق العاده خود (لسلی، کیرا، کایلی، جنی، کیانا و اسپنسر) و همسرم باربارا تقدیم می‌کنم که برای نوشتن این کتاب مجبور بودم زمان‌های زیادی را با آنها نگذرانم. سپاسگزاری خود را برای اعتماد و صبر آنها ابراز می‌دارم. در نهایت، هر آنچه که من انجام می‌دهم برای آنها است.

تاد کی مون

لوگان، یوتا، مارس ۲۰۰۵

فهرست برنامه‌های رایانه‌ای

۳۰	.....	qf.c	تابع Q در زبان برنامه‌سازی C
۳۰	.....	qf.m	تابع Q در زبان برنامه‌سازی MATLAB
۳۰	.....	gran.c	تولید عدد تصادفی گوسی با میانگین صفر و واریانس یک
۳۰	.....	gran2.cc	تولید دو عدد تصادفی مستقل و گوسی با میانگین صفر و واریانس
۳۲	.....	bpskprobplot.m	برنامه‌ای برای ترسیم احتمال خطای BPSK
۳۲	.....	bpskprob.m	محاسبه احتمال خطای BPSK
۴۸	.....	repcodeprob.m	محاسبه احتمال خطا برای کد تکرار $(n, 1)$
۵۰	.....	testrepcode.cc	شبیه‌سازی عملکرد برای کد تکرار
۵۰	.....	repcoderes.m	ترسیم نتایج شبیه‌سازی عملکرد برای کد تکرار
۵۲	.....	mindist.m	محاسبه فاصله همینگ کمینه یک کد بلوکی خطی با استفاده از ماتریس سازنده
۵۵	.....	hamcode74pe.m	احتمال خطا برای کد همینگ $(n, 1)$
۵۵	.....	nchoosektest.m	محاسبه $\binom{n}{k}$
۶۹	.....	plotcapcmp.m	ترسیم منحنی ظرفیت کانال‌های مختلف
۶۹	.....	cawgnc2.m	محاسبه ظرفیت AWGNC
۶۹	.....	cbawgnc2.m	محاسبه ظرفیت BAWGNC
۶۹	.....	h2.m	محاسبه تابع آنتروپی دودویی
۷۹	.....	plotcbawgnc2.m	ترسیم ظرفیت برای BAWGNC و AWGNC
۷۹	.....	cbawgnc.m	محاسبه ظرفیت برای BAWGNC
۷۹	.....	cawgnc.m	محاسبه ظرفیت برای AWGNC
۷۹	.....	philog.m	محاسبه آرگومان انتگرال رابطه $(1-40)$ مربوط به BAWGNC
۷۹	.....	phifun.m	محاسبه تابع ϕ مربوط به BAWGNC
۱۴۰	.....	gaussj2.m	حذف گوسی روی میدان $GF(2)$
۱۴۵	.....	Hammsphere.m	محاسبه تعداد نقاط داخل یک کره همینگ
۱۴۹	.....	genstdarray.c	ساختن آرایه استاندارد برای یک کد
۱۶۱	.....	probdetH15.m	احتمال تشخیص خطا برای کد همینگ $(15, 11)$
۱۶۱	.....	probdet.m	احتمال تشخیص خطا برای کد $BCH(31, 21)$
۱۸۸	.....	polyadd.m	جمع دو چندجمله‌ای
۱۸۸	.....	polysub.m	تفاضل دو چندجمله‌ای

۱۸۸	.....	polymult.m	ضرب دو چندجمله‌ای
۱۸۸	.....	polydiv.m	تقسیم دو چندجمله‌ای (محاسبهٔ خارج‌قسمت و باقیمانده)
۱۸۸	.....	polyaddm.m	جمع دو چندجمله‌ای به پیمانهٔ یک عدد مشخص
۱۸۸	.....	polysubm.m	تفاضل دو چندجمله‌ای به پیمانهٔ یک عدد مشخص
۱۸۸	.....	polymultm.m	ضرب دو چندجمله‌ای به پیمانهٔ یک عدد مشخص
۲۴۳	.....	primfind.c	تابعی جهت جستجوی کامل برای یافتن چندجمله‌ای‌های اولیه
۲۴۳	.....	primitive.txt	جدول چندجمله‌ای‌های اولیه
۲۵۳	.....	BinLFSR.h	اعلان‌های مربوط به کلاس BinLFSR
۲۵۳	.....	BinLFSR.cc	تعریف‌های مربوط به کلاس BinLFSR
۲۵۳	.....	testBinLFSR.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کلاس BinLFSR
۲۵۳	.....	MakeLFSR	یک MakeFile برای کلاس BinLFSR
۲۵۴	.....	BinPolyDiv.h	اعلان‌های مربوط به کلاس BinPolyDiv
۲۵۴	.....	BinPolyDiv.cc	تعریف‌های مربوط به کلاس BinPolyDiv
۲۵۴	.....	testBinPolyDiv.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کلاس BinPolyDiv
۲۸۸	.....	gcd.c	مثالی ساده از الگوریتم اقلیدسی
۳۰۰	.....	crtgamma.m	محاسبهٔ γ_j برای CRT
۳۰۰	.....	fromcrt.m	تبدیل از نمایش CRT به عدد صحیح
۳۰۰	.....	tocrt.m	محاسبهٔ نمایش CRT یک عدد صحیح
۳۰۰	.....	testcrt.m	مثالی از حل CRT
۳۰۱	.....	crtgammapoly.m	محاسبهٔ γ_j برای CRT در حالت چندجمله‌ای
۳۰۱	.....	fromcrtpoly.m	تبدیل از نمایش CRT به عدد صحیح در حالت چندجمله‌ای
۳۰۱	.....	tocrtpoly.m	محاسبهٔ نمایش CRT یک عدد صحیح در حالت چندجمله‌ای
۳۰۱	.....	testcrtpoly.m	مثالی از حل CRT در حالت چندجمله‌ای
۳۳۱	.....	primfind.c	برنامه‌ای برای یافتن چندجمله‌ای‌های اولیه در $GF(p)[x]$
۳۴۵	.....	cyclomin.c	برنامه‌ای برای تولید دسته‌های سیکلوتومی و چندجمله‌ای‌های کمین متناظر با آن‌ها
۳۵۳	.....	ModAr.h	اعلان‌های مربوط به کلاس محاسبات به پیمانه
۳۵۳	.....	ModAr.cc	تعریف‌های مربوط به کلاس محاسبات به پیمانه
۳۵۳	.....	testmodar1.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کلاس محاسبات به پیمانه
۳۵۳	.....	ModArnew.h	قالبی برای اعلان‌های مربوط به کلاس محاسبات به پیمانه

۳۵۳	testmodarnew.cc: قالبی برای آزمایش کلاس محاسبات به پیمانانه
۳۵۳	polynomialT.h: قالبی برای اعلان‌های مربوط به کلاس محاسبات چندجمله‌ای‌ها
۳۵۳	polynomialT.cc: قالبی برای تعریف‌های مربوط به کلاس محاسبات چندجمله‌ای‌ها
۳۵۳	testpoly1.cc: قالبی برای آزمایش کلاس محاسبات چندجمله‌ای‌ها
۳۵۴	testpolygcd.cc: برنامه‌ای برای آزمایش تابع محاسبه GCD چندجمله‌ای
۳۵۴	gcdpoly.cc: تابعی (غیر کامل) برای محاسبه GCD چندجمله‌ای
۳۵۶	GF2.h: اعلان‌های مربوط به کلاس $GF(2)$
۳۵۶	GFNUM2m.h: اعلان‌های مربوط به کلاس $GF(2^m)$
۳۵۶	GFNUM2m.cc: تعریف‌های (غیر کامل) مربوط به کلاس $GF(2^m)$
۳۵۶	testgfnum.cc: آزمایش کلاس میدان گالوا
۳۸۷	bchweight.m: محاسبه توزیع وزنی کدهای BCH با استفاده از توزیع وزنی دوگان آنها
۳۸۹	bchdesigner.exe: برنامه‌ای اجرایی برای طراحی یک کد BCH دودویی با قابلیت تصحیح t خطا
۳۹۷	reedsolwt.m: محاسبه توزیع وزنی یک کد $RS(n, k)$
۴۱۱	masseymodM.m: تولید کوتاه‌ترین LFSR برای یک رشته از داده‌ها
۴۲۶	erase.mag: مثالی از کدگشایی پاک‌شدگی در نرم‌افزار MAGMA
۴۴۶	testBM.cc: برنامه‌ای برای آزمایش الگوریتم برلکمپ-مسی
۴۴۹	Chiensearch.h: اعلان‌های مربوط به کلاس جستجوی شین
۴۴۹	Chiensearch.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس جستجوی شین (ناکامل)
۴۴۹	testChien.cc: برنامه‌ای برای آزمایش کلاس جستجوی شین
۴۴۹	BCHdec.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگشای BCH
۴۴۹	BCHdec.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگشای BCH (ناکامل)
۴۴۹	testBCH.cc: برنامه‌ای برای آزمایش کلاس کدگشای BCH
۴۵۲	RSenc.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگذار RS
۴۵۲	RSenc.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگذار RS
۴۵۲	RSdec.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگشای RS
۴۵۲	RSdec.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگشای RS
۴۵۳	testRS.cc: برنامه‌ای برای آزمایش کلاس کدگشای RS
۴۵۳	rsencode.cc: برنامه‌ای برای کدگذاری یک فایل با کد RS
۴۵۳	rsdecode.cc: برنامه‌ای برای کدگشایی یک فایل کدشده با کد RS

۴۵۴	.....	bsc.c	برنامه‌ای برای شبیه‌سازی کانال متقارن دودویی
۵۱۴	.....	testpxy.cc	برنامه‌ای برای نشان دادن مفاهیم مرتبط با چندجمله‌ای‌های دو متغیره
۵۲۸	.....	computekm.m	برنامه‌ای جهت محاسبه K_m برای کدگشای گوروسوامی-سودان
۵۲۸	.....	computetm.m	برنامه‌ای جهت محاسبه t_m برای کدگشای گوروسوامی-سودان
۵۳۴	.....	computeLm.cc	برنامه‌ای برای محاسبه بیشینه طول فهرست در الگوریتم کدگشایی GS در C
۵۳۴	.....	computeLm.m	برنامه‌ای برای محاسبه بیشینه طول فهرست در الگوریتم کدگشایی GS در MATLAB
۵۴۱	.....	testft.m	برنامه‌ای برای آزمایش الگوریتم فنگ-سنگ
۵۴۱	.....	fengtzensg.m	برنامه‌ای که حاوی پیاده‌سازی الگوریتم فنگ-سنگ در MATLAB است
۵۴۱	.....	invmodp.m	تابعی برای محاسبه معکوس یک عدد به پیمانۀ p
۵۵۱	.....	testgs1.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کدگشای GS (بخش درونیابی کاتر)
۵۵۱	.....	kotter.cc	پیاده‌سازی الگوریتم درونیابی کاتر در زبان برنامه‌سازی C
۵۵۲	.....	testGS3.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کدگشای GS
۵۵۵	.....	testGS5.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کدگشای GS
۵۵۵	.....	kotter1.cc	الگوریتم کاتر برای $m=1$
۵۶۲	.....	testGS2.cc	برنامه‌ای برای آزمایش الگوریتم راث-روکنستاین
۵۶۲	.....	rothruck.cc	تعریف‌های مربوط به الگوریتم راث-روکنستاین برای یافتن ریشه y
۵۶۲	.....	rothruck.h	اعلان‌های مربوط به الگوریتم راث-روکنستاین برای یافتن ریشه y
۵۶۶	.....	Lbarex.m	محاسبه عملکرد متوسط یک کدگشای $GS(m)$
۵۶۶	.....	computeLbar.m	متوسط تعداد کلمه‌های کد داخل یک کره به مرکز یک نقطه تصادفی
۵۷۴	.....	pi2m1.m	پیاده‌سازی الگوریتم کاتر-واردی برای نگاشت از \mathbb{H} به \mathbb{M}
۵۹۸	.....	genrm.cc	تابعی برای تولید ماتریس سازنده کد رید-مولر
۶۰۶	.....	rmdecex.m	مثالی از کدگشایی $RM(1,3)$
۶۰۹	.....	hadex.m	محاسبه H_A
۶۰۹	.....	testfht.cc	برنامه‌ای برای آزمایش تبدیل هادامارد سریع
۶۰۹	.....	fht.cc	پیاده‌سازی تبدیل هادامارد سریع در زبان برنامه‌نویسی C
۶۰۹	.....	fht.m	پیاده‌سازی تبدیل هادامارد سریع در زبان برنامه‌نویسی MATLAB
۶۱۴	.....	rmdecex2.m	مثالی از کدگشایی $RM(2,4)$
۶۲۸	.....	testQR.cc	مثالی از محاسبات جهت کدگشایی کدهای QR
۶۳۳	.....	golaysimp.m	استخراج معادله‌ها برای کدگشای جبری کد گولی

۶۳۳	testGolay.cc: آزمایش کدگشای جبری کد گولی.....
۶۳۶	golayarith.m: کدگشای حسابی گولی.....
۶۴۵	plotbds.m: ترسیم کران‌ها برای کدهای دودویی.....
۶۵۳	simplex1.m: برنامه‌ای برای یافتن پاسخ برنامه‌ریزی خطی در شکل استاندارد.....
۶۵۳	pivottableau.m: تابع اصلی در برنامه simplex1.m.....
۶۵۳	reducefree.m: تابع کمکی در برنامه simplex1.m.....
۶۵۳	restorefree.m: تابع کمکی در برنامه simplex1.m.....
۶۵۶	krawtchouk.m: تابعی برای محاسبه بازگشتی چندجمله‌ای‌های کروچوک.....
۶۶۱	Lpboundex.m: مثالی از حل مسئله کران برنامه‌ریزی خطی.....
۶۹۴	utiltkm.cc: تعریف‌های مربوط به توابعی برای مرتب‌سازی بردارها و تولید اعداد تصادفی.....
۶۹۴	utiltkm.h: اعلان‌های مربوط به توابعی برای مرتب‌سازی بردارها و تولید اعداد تصادفی.....
۷۶۰	concodequant.m: محاسبه مقادیر کوانتیزه برای سنجه اقلیدسی.....
۷۸۴	chernoff1.m: کران‌های چرنوف برای عملکرد کدهای کانولوشنی.....
۷۸۷	plotconprob.m: ترسیم کران‌های عملکرد برای یک کد کانولوشنی.....
۷۹۰	finddfree.cc: برنامه‌ای برای محاسبه مقدار d_{free} برای مجموعه‌ای از ضرایب اتصال.....
۸۰۲	teststack.m: برنامه‌ای برای آزمایش الگوریتم پشته.....
۸۰۲	stackalg.m: الگوریتم پشته برای کدگشایی کانولوشنی.....
۸۰۲	fanomet.m: محاسبه سنجه فانو برای داده‌ای که به صورت کانولوشنی کد شده است.....
۸۰۵	fanoalg.m: الگوریتم فانو برای کدگشایی کدهای کانولوشنی.....
۸۲۲	BinConv.h: اعلان‌های مربوط به کلاس پایه برای کدگذار کانولوشنی دودویی.....
۸۲۲	BinConvFIR.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگذار کانولوشنی پیشخور دودویی.....
۸۲۲	BinConvIIR.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگذار کانولوشنی بازگشتی دودویی.....
۸۲۲	BinConvFIR.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگذار کانولوشنی پیشخور دودویی (ناکامل).....
۸۲۲	BinConvIIR.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگذار کانولوشنی بازگشتی دودویی (ناکامل).....
۸۲۳	testconvenc.cc: برنامه‌ای برای آزمایش کدگذارهای کانولوشنی.....
۸۲۵	Convdec.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگشای کانولوشنی.....
۸۲۵	Convdec.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگشای کانولوشنی (ناکامل).....
۸۲۵	BinConvdec01.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگشای کانولوشنی با سنجه BSC.....
۸۲۵	BinConvdec01.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگشای کانولوشنی با سنجه BSC (ناکامل).....

۸۲۶	.....	BinConvdecBPSK.h	اعلان‌های مربوط به کلاس کدگشای کانولوشنی با سنجۀ نرم
۸۲۶	.....	BinConvdecBPSK.cc	تعریف‌های مربوط به کلاس کدگشای کانولوشنی با سنجۀ نرم (ناکامل)
۸۲۷	.....	testconvdec.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کدگشای کانولوشنی
۸۵۹	.....	makeB.m	تولید ماتریس B برای کد مورد مثال
۸۵۹	.....	tcmt1.cc	آزمایش منظومه برای یک کد غیر حساس به چرخش
۸۷۰	.....	tcmrot2.cc	آزمایش منظومه برای یک کد غیر حساس به چرخش
۸۸۴	.....	lattstuff.m	ماتریس‌های سازنده برای $A_p, D_p, E_p, E_\lambda, \Lambda_{1p}$ و Λ_{2p}
۸۸۴	.....	voln.m	محاسبۀ حجم یک کرۀ n بعدی با شعاع واحد
۸۸۸	.....	latta2.m	ترسیم توری منظم A_p
۸۸۸	.....	lattz2.m	ترسیم توری منظم \mathbb{Z}^2
۹۷۳	.....	BCJR.h	اعلان‌های مربوط به کلاس الگوریتم BCJR
۹۷۳	.....	BCJR.cc	تعریف‌های مربوط به کلاس الگوریتم BCJR (ناکامل)
۹۷۳	.....	testbcjr.cc	آزمایش کلاس الگوریتم BCJR
۹۷۳	.....	testturbodec2.cc	برنامه‌ای برای آزمایش کدگشای توربو
۹۸۳	.....	makegenfromA.m	برنامه‌ای برای یافتن ماتریس سازنده با استفاده از یک ماتریس بررسی توازن
۹۸۳	.....	gaussj2.m	تابعی برای اعمال روش حذف گوس-جردن بر روی یک ماتریس در میدان $GF(2)$
۹۸۷	.....	Agall.m	ماتریس بررسی توازن برای کد LDPC مثال ۳-۱۵
۹۸۷	.....	Agall.txt	نمایش تنک برای ماتریس بررسی توازن مثال ۳-۱۵
۹۸۸	.....	writesparse.m	برنامه‌ای برای نوشتن یک ماتریس در یک فایل با استفاده از قالب تنک
۱۰۰۴	.....	ldpc.m	مثالی جهت تشریح کدگشایی LDPC
۱۰۰۴	.....	galdecode.m	کدگشای LDPC (نمایش غیر تنک)
۱۰۱۰	.....	ldpclogdec.m	کدگشای درست‌نمایی لگاریتمی برای LDPC
۱۰۱۶	.....	psifunc.m	ترسیم تابع Ψ مورد استفاده در تحلیل تکامل چگالی
۱۰۱۹	.....	densev1.m	تابع تحلیل تکامل چگالی
۱۰۱۹	.....	densevtest.m	مثالی از تحلیل تکامل چگالی
۱۰۱۹	.....	Psi.m	تابع Ψ
۱۰۱۹	.....	Psiinv.m	تابع Ψ^{-1}
۱۰۱۹	.....	plotgauss.m	تابعی برای ترسیم چگالی احتمال گوسی
۱۰۲۱	.....	treshtab.m	تبدیل جدول مقدار آستانه به E_b/N

۱۰۲۳.....	ldpcsim.mat: نتایج شبیه‌سازی کدگشای LDPC
۱۰۲۳.....	exit1.m: ترسیم هیستوگرام‌های خروجی‌های کدگشای LDPC
۱۰۲۳.....	loghist.m: یافتن هیستوگرام‌ها
۱۰۲۳.....	exit3.m: ترسیم اطلاعات متقابل به عنوان تابعی از تکرار
۱۰۲۳.....	dotrajectory.m: اطلاعات متقابل به عنوان تابعی از تکرار
۱۰۲۵.....	exit2.m: ترسیم نمودار EXIT
۱۰۲۵.....	doexitchart.m: بردن اطلاعات متقابل به نمودار EXIT
۱۰۲۵.....	getinf.m: تبدیل داده به اطلاعات متقابل
۱۰۲۵.....	getinfs.m: تبدیل چندین داده به اطلاعات متقابل
۱۰۲۵.....	buildexit.m: تولید نمودار EXIT با استفاده از اطلاعات متقابل
۱۰۳۵.....	sparseHno4.m: ساخت یک ماتریس بررسی توازن تنک که دارای هیچ دوری به طول ۴ نیست
۱۰۴۷.....	galdec.h: اعلان‌های مربوط به کلاس کدگشای LDPC
۱۰۴۷.....	galdec.cc: تعریف‌های مربوط به کلاس کدگشای LDPC (ناکامل)
۱۰۴۷.....	galtest.cc: برنامه‌ای برای آزمایش کلاس کدگشای LDPC
۱۰۴۷.....	ldpc.m: برنامه‌ای برای نشان دادن کدگشایی LDPC
۱۰۴۷.....	galdecode.m: کدگشای LDPC (بدون استفاده از نمایش تنک)
۱۰۴۷.....	galtest2.cc: تولید نمودار احتمال خطا برای یک کد LDPC
۱۰۴۷.....	A1-2.txt: ماتریس بررسی توازن برای کد با نرخ $\frac{1}{4}$ (قالب تنک)
۱۰۴۷.....	A1-3.txt: ماتریس بررسی توازن برای کد با نرخ $\frac{1}{3}$ (قالب تنک)
۱۰۷۸.....	testgdl2.m: برنامه‌ای برای آزمایش تابع gdl.m
۱۰۷۸.....	gdl.m: برنامه‌ای که پیاده‌سازی قانون توزیع‌پذیری تعمیم‌یافته (GDL) را انجام داده است
۱۰۷۸.....	fyx0.m: محاسبه $f(y|x)$ برای چارچوب GDL

فهرست آزمایشگاه‌های برنامه‌سازی

۷۹	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱: شبیه‌سازی یک کانال مخابراتی.....
۲۵۰	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۲: تقسیم چندجمله‌ای و LFSRها.....
۲۵۵	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۳: کدگذاری و کدگشایی CRC.....
۳۵۲	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۴: برنامه‌نویسی الگوریتم اقلیدسی.....
۳۵۵	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۵: برنامه‌نویسی محاسبات میدان گالوا.....
۴۴۳	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۶: برنامه‌نویسی الگوریتم برلکمپ-مسی.....
۴۴۸	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۷: برنامه‌نویسی کدگشای BCH.....
۴۵۱	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۸: کدگذاری و کدگشایی کدهای RS.....
۸۲۱	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۹: برنامه‌نویسی کدگذارهای کانولوشنی.....
۸۲۴	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱۰: کدگشاهای کانولوشنی: الگوریتم ویتربی.....
۸۹۹	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱۱: کدگذاری و کدگشایی TCM.....
۹۷۲	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱۲: کدگشایی کد توربو.....
۱۰۴۴	آزمایشگاه برنامه‌سازی ۱۳: برنامه‌نویسی یک کدگشای LDPC.....

فهرست الگوریتم‌ها

۵۳	کدگشایی کدهای همینگ.....	الگوریتم ۱-۱
۸۰	خلاصه قدم‌های لازم برای شبیه‌سازی مخابرات دیجیتال.....	الگوریتم ۲-۱
۸۱	طرح کلی شبیه‌سازی یک مخابرات دیجیتال گذشته.....	الگوریتم ۳-۱
۸۲	طرح کلی شبیه‌سازی کد همینگ (n,k)	الگوریتم ۴-۱
۲۳۸	کدگذاری CRC سریع برای رشته‌ای از بایت‌ها.....	الگوریتم ۱-۴
۲۵۳	کلاس BinLFSR.....	الگوریتم ۲-۴
۲۵۴	کلاس BinPolyDiv.....	الگوریتم ۳-۴
۲۸۹	الگوریتم اقلیدسی توسعه‌یافته.....	الگوریتم ۱-۵
۳۵۳	کلاس محاسبات به پیمانہ.....	الگوریتم ۲-۵
۳۵۳	قالبی برای کلاس محاسبات چندجمله‌ای‌ها.....	الگوریتم ۳-۵
۳۵۴	برنامه محاسبه GCD چندجمله‌ای.....	الگوریتم ۴-۵
۳۵۶	کلاس میدان گالوای دودویی توسعه‌یافته.....	الگوریتم ۵-۵
۴۱۲	الگوریتم مسی.....	الگوریتم ۱-۶
۴۱۴	الگوریتم مسی برای کدگشایی کدهای BCH دودویی.....	الگوریتم ۲-۶
۴۴۶	آزمایش الگوریتم برلکمپ-مسی.....	الگوریتم ۳-۶
۴۴۹	روش جستجوی شین.....	الگوریتم ۴-۶
۴۴۹	کدگشای BCH.....	الگوریتم ۵-۶
۴۵۲	کدگذار RS.....	الگوریتم ۶-۶
۴۵۲	کدگشای RS.....	الگوریتم ۷-۶
۴۵۳	آزمایش کدگشای RS.....	الگوریتم ۸-۶
۴۵۳	کدگذاری و کدگشایی فایل با استفاده از کد RS.....	الگوریتم ۹-۶
۴۵۴	شبیه‌ساز کانال متقارن دودویی.....	الگوریتم ۱۰-۶
۴۹۰	درون‌یابی ولج-برلکمپ.....	الگوریتم ۱-۷
۵۰۳	درون‌یابی ولج-برلکمپ، روش مبتنی بر مدول، نسخه ۱.....	الگوریتم ۲-۷
۵۰۷	درون‌یابی ولج-برلکمپ، روش مبتنی بر مدول، نسخه ۲.....	الگوریتم ۳-۷
۵۰۹	درون‌یابی ولج-برلکمپ، روش مبتنی بر مدول، نسخه ۳.....	الگوریتم ۴-۷
۵۴۰	الگوریتم فنگ-سنگ.....	الگوریتم ۵-۷
۵۴۸	درون‌یابی کاتر برای کدگشای گوروسوامی-سودان.....	الگوریتم ۶-۷

۵۵۳	الگوریتم ۷-۷ کدگشای درون‌یابی گوروسوامی-سودان با $m = 1$ و $L = 1$
۵۶۰	الگوریتم ۸-۷ الگوریتم راث-روکنستاین برای یافتن ریشه‌های y برای چندجمله‌ای $Q(x, y)$
۵۷۳	الگوریتم ۹-۷ الگوریتم کاتر-واردی برای نگاشت از \mathbf{II} به \mathbf{M}
۶۰۵	الگوریتم ۱-۸ کدگشایی کدهای $RM(1, m)$
۶۳۵	الگوریتم ۲-۸ کدگشای حسابی برای کد G_{24}
۶۹۴	الگوریتم ۱-۱۱ کدگشایی فاصله کمینه تعمیم‌یافته (GMD).....
۷۰۰	الگوریتم ۲-۱۱ کدگشای چیس-۲.....
۷۰۰	الگوریتم ۳-۱۱ کدگشای چیس-۳.....
۷۰۶	الگوریتم ۴-۱۱ کدگشایی آماره مرتب.....
۷۴۵	الگوریتم ۱-۱۲ الگوریتم ویتربی.....
۸۰۱	الگوریتم ۲-۱۲ الگوریتم پشته.....
۸۲۲	الگوریتم ۳-۱۲ کلاس پایه برای کدگذار کانولوشنی دودویی.....
۸۲۲	الگوریتم ۴-۱۲ کلاس مشتق‌شده برای کدگذارهای FIR و IIR.....
۸۲۳	الگوریتم ۵-۱۲ برنامه‌ای برای آزمایش کدگذارهای کانولوشنی.....
۸۲۵	الگوریتم ۶-۱۲ اعلان‌ها و تعریف‌های کلاس پایه کدگشا.....
۸۲۵	الگوریتم ۷-۱۲ کدگشای کانولوشنی برای داده دودویی ۰ و ۱.....
۸۲۶	الگوریتم ۸-۱۲ کدگشای کانولوشنی برای داده BPSK.....
۸۲۷	الگوریتم ۹-۱۲ برنامه‌ای برای آزمایش کدگشای کانولوشنی.....
۹۲۵	الگوریتم ۱-۱۴ الگوریتم کدگشایی BCJR (MAP)، شکل احتمالی.....
۹۳۴	الگوریتم ۲-۱۴ الگوریتم کدگشایی توربو، شکل احتمالی.....
۹۷۳	الگوریتم ۳-۱۴ الگوریتم BCJR.....
۹۷۳	الگوریتم ۴-۱۴ آزمایش کدگشای توربو.....
۱۰۰۳	الگوریتم ۱-۱۵ الگوریتم کدگشایی تکراری برای کدهای LDPC دودویی.....
۱۰۰۹	الگوریتم ۲-۱۵ الگوریتم تکراری کدگشایی درست‌نمایی لگاریتمی برای کدهای LDPC دودویی.....
۱۰۴۷	الگوریتم ۳-۱۵ اعلان‌ها و تعریف‌های کلاس LDPC.....
۱۰۴۷	الگوریتم ۴-۱۵ کد MATLAB برای آزمایش کدگشایی LDPC.....
۱۰۴۷	الگوریتم ۵-۱۵ تولید نمودارهای عملکرد برای کدهای LDPC.....

فهرست شکل‌ها

۷	شکل ۱-۱ تابع آنتروپی دودویی $H_r(p)$	۷
۸	شکل ۲-۱ یک چارچوب عمومی برای مخابرات دیجیتال.....	۸
۱۷	شکل ۳-۱ منظومهٔ سیگنال BPSK.....	۱۷
۱۷	شکل ۴-۱ کنار هم قرار دادن شکل موج‌های سیگنال.....	۱۷
۱۹	شکل ۵-۱ فضای سیگنال دوبعدی.....	۱۹
۲۰	شکل ۶-۱ فضای سیگنال 8-PSK.....	۲۰
۲۳	شکل ۷-۱ مدار همبستگی (معادل با فیلتر منطبق).....	۲۳
۲۷	شکل ۸-۱ چگالی‌های شرطی در مدوله‌سازی BPSK.....	۲۷
۳۱	شکل ۹-۱ توزیع‌های احتمال با فرض ارسال دو سیگنال مختلف در نویز گوسی.....	۳۱
۳۲	شکل ۱۰-۱ نمودار احتمال خطا برای ارسال سیگنال با روش BPSK.....	۳۲
۳۳	شکل ۱۱-۱ کران احتمال خطا برای مدوله‌سازی 8-PSK.....	۳۳
۳۵	شکل ۱۲-۱ کانال متقارن دودویی.....	۳۵
۳۸	شکل ۱۳-۱ (الف) نمودار سامانه‌ای نشان‌دهندهٔ مدوله‌سازی، کانال و مدوله‌زایی؛ (ب) مدل معادل BSC.....	۳۸
۴۰	شکل ۱۴-۱ انرژی برای یک سیگنال گذشته.....	۴۰
۴۰	شکل ۱۵-۱ احتمال خطا برای بیت‌های گذشته، قبل از تصحیح خطا.....	۴۰
۴۳	شکل ۱۶-۱ کد تکرار دودویی (۳,۱).....	۴۳
۴۵	شکل ۱۷-۱ نمایشی از کره‌های کدگشایی.....	۴۵
۴۸	شکل ۱۸-۱ عملکرد کدهای تکرار (۳,۱) و (۱۱,۱) روی BSC در هر دو حالت تصمیم‌نرم و تصمیم‌سخت.....	۴۸
۵۵	شکل ۱۹-۱ عملکرد کد همینگ (۷,۴) روی کانال AWGN.....	۵۵
۵۸	شکل ۲۰-۱ ترلیس کد همینگ (۷,۴).....	۵۸
۵۹	شکل ۲۱-۱ گراف تنر برای کد همینگ (۷,۴).....	۵۹
۶۹	شکل ۲۲-۱ مقایسهٔ ظرفیت AWGNC، BAWGNC و BSC.....	۶۹
۷۲	شکل ۲۳-۱ رابطهٔ آنتروپی ورودی و خروجی یک کانال (هر دایره یا مربع توپر نمایندهٔ یک رشته).....	۷۲
۷۸	شکل ۲۴-۱ حد پایین ظرفیت روی P_b بر حسب SNR.....	۷۸
۸۹	شکل ۲۵-۱ ناحیه‌های مورد استفاده برای محاسبهٔ کران تابع Q	۸۹
۱۰۹	شکل ۱-۲ نمایشی از دسته‌ها.....	۱۰۹
۱۱۶	شکل ۲-۲ یک توری منظم که به چهار دسته افزاشده است.....	۱۱۶
۱۶۲	شکل ۱-۳ عملکرد تشخیص خطا برای کد همینگ (۱۵,۱).....	۱۶۲
۱۷۰	شکل ۲-۳ نمایش تغییرات روی کدهای همینگ.....	۱۷۰
۲۰۵	شکل ۱-۴ مداری با پردازش به ترتیب وارون برای ضرب دو چندجمله‌ای.....	۲۰۵
۲۰۵	شکل ۲-۴ مداری با پردازش به ترتیب وارون و سرعت عملیات بالا برای ضرب دو چندجمله‌ای.....	۲۰۵

- شکل ۳-۴ مداری با پردازش به ترتیب برای ضرب دو چندجمله‌ای. ۲۰۶
- شکل ۴-۴ مداری با پردازش به ترتیب و سرعت عملیات بالا برای ضرب دو چندجمله‌ای. ۲۰۶
- شکل ۵-۴ مداری برای تقسیم چندجمله‌ای. ۲۰۷
- شکل ۶-۴ مداری برای تقسیم بر $g(x) = x^5 + x + 1$. ۲۰۹
- شکل ۷-۴ مداری برای تحقق $\frac{h(x)}{g(x)}$ با پردازش به ترتیب و به شکل استاندارد کنترل کننده. ۲۱۰
- شکل ۸-۴ مداری برای تحقق $\frac{h(x)}{g(x)}$ با پردازش به ترتیب و به شکل رویت پذیری. ۲۱۱
- شکل ۹-۴ تحقق مداری $H(x) = \frac{(1+x)}{(1+x^2+x^4)}$ به شکل کنترل کننده. ۲۱۲
- شکل ۱۰-۴ تحقق مداری $H(x) = \frac{(1+x)}{(1+x^3+x^4)}$ به شکل رویت پذیری. ۲۱۲
- شکل ۱۱-۴ کدگذاری غیر سیستماتیک کدهای چرخشی. ۲۱۴
- شکل ۱۲-۴ مدار کدگذاری سیستماتیک با استفاده از $g(x)$. ۲۱۴
- شکل ۱۳-۴ مدار کدگذاری سیستماتیک کد $(7,4)$ با سازنده $g(x) = 1 + x + x^5$. ۲۱۵
- شکل ۱۴-۴ مدار کدگذاری سیستماتیک با استفاده از چندجمله‌ای بررسی توازن. ۲۱۶
- شکل ۱۵-۴ یک کدگذار سیستماتیک برای کد همینگ با استفاده از $h(x)$. ۲۱۷
- شکل ۱۶-۴ مدار محاسبه سندرم برای کد مثال ۱۹-۴. ۲۲۰
- شکل ۱۷-۴ کدگشای چرخشی که در آن کلمه دریافتی از سمت چپ وارد ثبات سندرم می‌شود. ۲۲۱
- شکل ۱۸-۴ کدگشای کد همینگ $(7,4)$ ، با ورودی از سمت چپ. ۲۲۳
- شکل ۱۹-۴ کدگشای چرخشی که در آن کلمه دریافتی از سمت راست وارد ثبات سندرم می‌شود. ۲۲۳
- شکل ۲۰-۴ کدگشای کد همینگ $(7,4)$ با ورودی از سمت راست. ۲۲۵
- شکل ۲۱-۴ کدگشاهای مگیت برای کد همینگ $(31,26)$: (الف) با ورودی از سمت چپ، (ب) با ورودی از سمت راست. ۲۲۷
- شکل ۲۲-۴ ضرب $r(x)$ در $\rho(x)$ و محاسبه باقیمانده به پیمانه $g(x)$. ۲۲۹
- شکل ۲۳-۴ کدگشای یک کد همینگ کوتاه شده. ۲۳۰
- شکل ۲۴-۴ ساختار LFSR. ۲۴۱
- شکل ۲۵-۴ ساختار LFSR با $g(x) = 1 + x + x^2 + x^4$. ۲۴۱
- شکل ۲۶-۴ ساختار LFSR با $g(x) = 1 + x + x^2$. ۲۴۳
- شکل ۲۷-۴ ساختار LFSR با استفاده از چندجمله‌ای معکوس. ۲۴۶
- شکل ۲۸-۴ یک مدار دیگر برای LFSR. ۲۶۸
- شکل ۲۹-۴ یک LFSR با برچسب‌های حالت. ۲۶۹
- شکل ۱-۵ LFSR برچسب زده شده بر حسب توان‌های α به منظور نمایش اعضای میدان گالوا. ۳۱۶
- شکل ۲-۵ ضرب β در α . ۳۲۵
- شکل ۳-۵ ضرب β در α^4 . ۳۲۶
- شکل ۴-۵ ضرب β یک عنصر دلخواه میدان. ۳۲۶
- شکل ۵-۵ ساختار زیرمیدان‌های $GF(2^{24})$. ۳۲۸

شکل ۱-۶	الگوریتم جستجوی شین.....	۴۰۰
شکل ۱-۷	محاسبه باقیمانده برای زمانی که خطاها در موقعیت‌های پیام هستند.....	۴۷۱
شکل ۲-۷	مقایسه کدگشاهای ML, BD و فهرستی.....	۵۱۲
شکل ۳-۷	K_m به عنوان تابعی از m برای کد $RS(32,8)$	۵۲۸
شکل ۴-۷	نسبت خطاهای تصحیح‌شده به عنوان تابعی از نرخ.....	۵۳۱
شکل ۵-۷	مثالی از الگوریتم راث-روکنستاین روی میدان $GF(5)$	۵۶۳
شکل ۶-۷	مثالی از الگوریتم راث-روکنستاین روی میدان $GF(5)$ (ادامه).....	۵۶۴
شکل ۷-۷	همگرایی \bar{M} به Π و همچنین امتیاز و هزینه به عنوان تابعی از تعداد تکرارها.....	۵۷۵
شکل ۸-۷	محاسبه تابع قابلیت اطمینان.....	۵۷۷
شکل ۱-۸	یک مدار کدگذاری برای کد $RM(1,3)$	۶۰۳
شکل ۲-۸	نمودار جریان سیگنال برای تبدیل هادامارد سریع.....	۶۰۸
شکل ۳-۸	روابط مجاورت دودویی در سه و چهار بُعد.....	۶۱۵
شکل ۴-۸	صفحه‌های سایه‌دار برای نمایش معادله‌های متعامد روی بیت m_{2^r}	۶۱۵
شکل ۵-۸	توصیف هندسی معادله‌های بررسی توازن برای بردارهای مرتبه دوم کد $RM(2,4)$	۶۱۸
شکل ۶-۸	توصیف هندسی معادله‌های بررسی توازن برای بردارهای مرتبه اول کد $RM(2,4)$	۶۱۹
شکل ۱-۹	مقایسه کران پایین (گیلبرت-وارشاموف) و کران‌های بالای مختلف برای کدهای دودویی.....	۶۴۴
شکل ۲-۹	یک مسئله برنامه‌ریزی خطی.....	۶۵۴
شکل ۳-۹	یافتن تقریب استرلینگ.....	۶۶۶
شکل ۱-۱۰	یک جایگردان و عکس جایگردان 3×4	۶۷۳
شکل ۲-۱۰	یک سامانه جایگردان و عکس جایگردان متقاطع.....	۶۷۵
شکل ۳-۱۰	ضبط داده روی CD و فرایند قالب‌بندی.....	۶۷۷
شکل ۴-۱۰	کدگذاری تصحیح خطا در استاندارد دیسک فشرده.....	۶۷۷
شکل ۵-۱۰	کد ضربی $C_1 \times C_2$	۶۷۹
شکل ۶-۱۰	یک کد تودرتو.....	۶۸۱
شکل ۷-۱۰	سامانه کدگذاری تودرتو با کاربرد فضایی.....	۶۸۲
شکل ۸-۱۰	کدگشای در تله اندازی خطا برای کدهای با قابلیت تصحیح خطای رگباری [۲۰۳، ص ۲۶۰].....	۶۸۸
شکل ۱-۱۱	برچسب‌های سیگنال در کدگشایی تصمیم‌نرم.....	۶۹۳
شکل ۱-۱۲	یک کدگذار کانولوشنی با نرخ $R = \frac{1}{2}$	۷۱۳
شکل ۲-۱۲	یک کدگذار سیستماتیک با نرخ $R = \frac{1}{2}$	۷۱۴

- شکل ۳-۱۲ یک کدگذار سیستماتیک با نرخ $R = \frac{2}{3}$ ۷۱۵
- شکل ۴-۱۲ یک کدگذار سیستماتیک با نرخ $R = \frac{2}{3}$ و سخت‌افزار کاراثر. ۷۱۶
- شکل ۵-۱۲ کدگذار، نمودار حالت و نمودار ترلیس برای $G(x) = [1+x^2 \quad 1+x+x^2]$ ۷۲۰
- شکل ۶-۱۲ نمودار حالت و ترلیس برای یک کدگذار سیستماتیک با نرخ $R = \frac{2}{3}$ ۷۲۲
- شکل ۷-۱۲: یک کدگذار پیشخور با نرخ $R = \frac{2}{3}$ ۷۲۳
- شکل ۸-۱۲ یک کدگذار پیشخور با کارایی کمتر برای کد با نرخ $R = \frac{2}{3}$ ۷۲۴
- شکل ۹-۱۲ مراحل پردازش برای یک کد کانولوشنی. ۷۳۸
- شکل ۱۰-۱۲ نشان‌گذاری مرتبط با تغییر حالت. ۷۴۱
- شکل ۱۱-۱۲ مرحله انتخاب مسیر دارای بهترین سنج در الگوریتم ویتربی. ۷۴۴
- شکل ۱۲-۱۲ مسیر متناظر با رشته صحیح بر روی ترلیس. ۷۴۷
- شکل ۱۳-۱۲ عملیات جمع-مقایسه-انتخاب. ۷۵۳
- شکل ۱۴-۱۲ کوانتیزه‌سازی دوبیتی برای سنج تصمim-نرم. ۷۵۹
- شکل ۱۵-۱۲ آستانه‌های کوانتیزه‌سازی برای کوانتیزه‌سازی ۴ و ۸ سطحی. ۷۶۲
- شکل ۱۶-۱۲ نرخ خطای بیت به عنوان تابعی از E_b/N_0 برای کد کانولوشنی با نرخ $R = \frac{1}{2}$ و کدگشایی با پنجره ۳۲ بیتی [۱۴۸]. ۷۶۳
- شکل ۱۷-۱۲ نرخ خطای بیت به عنوان تابعی از E_b/N_0 برای کد کانولوشنی با نرخ $R = \frac{1}{2}$ ، $K = 5$ ، به ازای مقادیر مختلف سطوح کوانتیزه‌سازی و طول پنجره [۱۴۸]. ۷۶۵
- شکل ۱۸-۱۲ عملکرد نرخ خطای بیت الگوریتم ویتربی به عنوان تابعی از فاصله‌گذاری آستانه‌های کوانتیزه‌ساز. ۷۶۶
- شکل ۱۹-۱۲ عملکرد نرخ خطای بیت الگوریتم ویتربی به عنوان تابعی از طول بلوک برشی $N = 200$ و $N = 2000$ ، برای کوانتیزه‌سازی ۲ و ۸ سطحی. ۷۶۷
- شکل ۲۰-۱۲ ایجاد حادثه‌های در اثر ادغام مسیرها. ۷۶۸
- شکل ۲۱-۱۲ دو مثال کدگشایی. ۷۶۹
- شکل ۲۲-۱۲ نمودار حالت و گراف مربوط به مسیرهای انشعابی/ادغامی. ۷۷۱
- شکل ۲۳-۱۲ قواعد ساده‌سازی گراف‌های جریان. ۷۷۲
- شکل ۲۴-۱۲ قدم‌های مربوط به ساده‌سازی گراف جریان یک کد کانولوشنی (از بالا به پایین، از چپ به راست). ۷۷۳
- شکل ۲۵-۱۲ نمودار حالت برجسب‌خورده با وزن خروجی، وزن ورودی و طول شاخه. ۷۷۴
- شکل ۲۶-۱۲ یک نمودار حالت. ۷۷۶
- شکل ۲۷-۱۲ عملکرد یک کد کانولوشنی (۲،۱) دارای $d_{free} = 5$ ۷۸۶
- شکل ۲۸-۱۲ دو ترلیس برای یک کد سوراخ‌شده. ۷۹۲
- شکل ۲۹-۱۲ نمایش درختی برای یک کد با نرخ $R = \frac{1}{2}$ ۷۹۶
- شکل ۳۰-۱۲ محتویات پشته (شامل سنج و رشته ورودی متناظر با مسیر ناکامل) برای مثال کدگشایی با استفاده از الگوریتم پشته (ادامه دارد). ۸۰۳
- شکل ۳۱-۱۲ شمای عملیاتی الگوریتم فانو. ۸۰۶
- شکل ۳۲-۱۲ ترلیس یک کد همینگ (۷،۴). ۸۱۹
- شکل ۳۳-۱۲ یک کدگذار سیستماتیک برای یک کد همینگ (۷،۴،۳). ۸۱۹

شکل ۱۲-۳۴	یک ترلیس برای یک کد همینگ (۷,۴,۳) که به صورت چرخشی کدگذاری می‌شود.	۸۲۰
شکل ۱۲-۳۵	نمودار حالت و ترلیس برای کدگذار رابطه (۴۸-۱۲).	۸۲۴
شکل ۱۳-۱	منظومه‌های سیگنال PSK.	۸۴۰
شکل ۱۳-۲	منظومه‌های سیگنال QAM (روی هم قرار گرفته).	۸۴۱
شکل ۱۳-۳	سه سناریوی مخابراتی مختلف.	۸۴۴
شکل ۱۳-۴	افراز مجموعه‌ای برای یک سیگنال 8-PSK.	۸۴۵
شکل ۱۳-۵	مثالی از یک TCM با نرخ $R = \frac{3}{4}$.	۸۴۶
شکل ۱۳-۶	یک کدگذار TCM که از انتخاب زیرمجموعه استفاده می‌کند و دارای چهار حالت است.	۸۴۹
شکل ۱۳-۷	ترلیس ۸ حالتی برای یک 8-PSK TCM.	۸۵۰
شکل ۱۳-۸	نمودار بلوکی یک کدگذار TCM.	۸۵۱
شکل ۱۳-۹	افراز مجموعه‌ای بر روی یک منظومه 16-QAM.	۸۵۳
شکل ۱۳-۱۰	افراز مجموعه‌ای بر روی یک منظومه 8-ASK.	۸۵۳
شکل ۱۳-۱۱	یک مسیر درست و یک مسیر خطا.	۸۵۷
شکل ۱۳-۱۲	مثالی از ترلیس برای یک کد چهارحالتی.	۸۵۹
شکل ۱۳-۱۳	مدار کدگذار ترلیس.	۸۶۳
شکل ۱۳-۱۴	کدگذار TCM برای منظومه‌های QAM.	۸۶۷
شکل ۱۳-۱۵	نگاشت از یال (i, j) به $(f_0(i), f_0(j))$.	۸۶۹
شکل ۱۳-۱۶	مدار کدگذار برای یک کد TCM غیر حساس به چرخش.	۸۷۱
شکل ۱۳-۱۷	ترلیس مربوط به کد TCM غیر حساس به چرخش در شکل ۱۳-۱۶.	۸۷۱
شکل ۱۳-۱۸	منظومه 32-CROSS برای یک کد TCM غیر حساس به چرخش.	۸۷۲
شکل ۱۳-۱۹	بخشی از توری منظم \mathbb{Z}^2 و دسته‌های آن.	۸۷۹
شکل ۱۳-۲۰	توری منظم شش‌ضلعی.	۸۸۱
شکل ۱۳-۲۱	\mathbb{Z}^2 به همراه زنجیر افراز و دسته‌های آن.	۸۸۵
شکل ۱۳-۲۲	نمودار بلوکی کدگذار ترلیس بر روی توری منظم.	۸۸۶
شکل ۱۳-۲۳	توری منظم و مرزهای دایروی برای منظومه‌های ۱۶، ۳۲، ۶۴، ۱۲۸ و ۲۵۶ نقطه‌ای.	۸۸۸
شکل ۱۳-۲۴	کدگذار ترلیس ۱۶ حالتی برای استفاده در استاندارد V.34 [۳۶۵].	۸۹۲
شکل ۱۳-۲۵	نمودار ترلیس برای کدگذار V.34 [۳۶۵].	۸۹۴
شکل ۱۳-۲۶	منظومه دوبعدی ۱۹۲ نقطه‌ای به کار گرفته شده در استاندارد V.34.	۸۹۷
شکل ۱۳-۲۷	مراحل افراز منظومه سیگنال V.34.	۸۹۸
شکل ۱۳-۲۸	مدار چرخش برخی از نقاط: همه نقاط روی یک مدار، دارای الگوی بیت مشابه هستند.	۸۹۸
شکل ۱۴-۱	نتایج کدگشایی توربو برای یک کد (۳۷,۲۱,۶۵۵۳۶).	۹۰۹
شکل ۱۴-۲	نمودار بلوکی کدگذار توربو.	۹۱۰
شکل ۱۴-۳	نمودار بلوکی یک کد توربوی دارای سوراخ‌شدگی.	۹۱۲

- شکل ۴-۱۴ کدگذار توربوی مثال با $G(x) = \frac{1}{(1+x^3)}$ ۹۱۳
- شکل ۵-۱۴ نمودار بلوکی یک کدگشای توربو. ۹۱۴
- شکل ۶-۱۴ مراحل پردازشی الگوریتم BCJR. ۹۱۸
- شکل ۷-۱۴ یک گذار بر روی ترلیس کدگذار. ۹۱۸
- شکل ۸-۱۴ یک کدگشای توربو با استفاده از درستیابی لگاریتمی. ۹۳۷
- شکل ۹-۱۴ ترلیس مربوط به SOVA به همراه نمایش اختلاف‌های سنج و بیت‌ها. ۹۴۸
- شکل ۱۰-۱۴ رشته حالت‌ها برای کدگذاری مثال ۳-۱۴. ۹۵۳
- شکل ۱۱-۱۴ چیدمان‌های مختلف برای $n_1 = 3$ انحراف در رشته‌ای به طول $N = 7$ ۹۵۵
- شکل ۱۲-۱۴ یک رشته "مربعی" 6×6 نوشته شده در یک جایگردان 120×120 ۹۵۸
- شکل ۱۳-۱۴ متغیرهای مورد استفاده در کدگشای تکراری برای تحلیل نمودار EXIT. ۹۶۰
- شکل ۱۴-۱۴ شکل کیفی برای مشخصه انتقال $I_E = T(I_A)$ ۹۶۳
- شکل ۱۵-۱۴ گذرگاه اطلاعات متقابل در کدگشایی تکراری (تکرارها، پیکان‌ها را دنبال می‌کنند). ۹۶۴
- شکل ۱۶-۱۴ کدگذاری توربو با استفاده از BCH. ۹۶۶
- شکل ۱۷-۱۴ ساختار پیاده‌سازی یک کد تودرتوی موازی. ۹۶۶
- شکل ۱۸-۱۴ ترلیس یک کد همینگ $(7, 4, 3)$ که به صورت چرخشی کدگذاری می‌شود. ۹۶۷
- شکل ۱۹-۱۴ یک چارچوب برای جبران‌سازی توربو. ۹۷۰
- شکل ۲۰-۱۴ ترلیس مرتبط به یک کانال با $L = 2$ ۹۷۱
- شکل ۲۱-۱۴ مثالی از کد توربوی ساخته شده از کد بررسی توازن $(3, 2, 2)$ ۹۷۵
- شکل ۱-۱۵ گراف دوبخشی وابسته به ماتریس بررسی توازن A. ۹۸۹
- شکل ۲-۱۵ یک درخت بررسی توازن وابسته به گراف تنر. ۹۹۲
- شکل ۳-۱۵ زیرمجموعه‌ای از گراف تنر. (الف) نگاه به عنوان درختی با ریشه c_n . (ب) یک قسمت واقعی از گراف تنر وابسته به ماتریس بررسی توازن رابطه $(1-15)$ ، با ریشه c_1 و نمایش یک دور در آن. ۹۹۴
- شکل ۴-۱۵ درخت دوسطحی. ۹۹۷
- شکل ۵-۱۵ ترلیس مرتبط با یافتن $r_{\text{sum}}(x)$ جمع احتمال همه مسیرهای ممکن بر روی ترلیس به صورت استقرانی محاسبه می‌شود. ۹۹۹
- شکل ۶-۱۵ پردازش اطلاعات از طریق گراف تعیین شده توسط A. خط‌چین نشان‌دهنده دوری به طول ۴ است. ۱۰۰۶
- شکل ۷-۱۵ وابستگی شرطی بین مجموعه‌های بیت‌ها. ۱۰۰۸
- شکل ۸-۱۵ عملکرد کدگشایی کدهای LDPC و تعداد متوسط تکرارها برای انجام کدگشایی. ۱۰۱۲
- شکل ۹-۱۵ مقایسه کدگشایی همینگ-تصمیم-سخت با کدگشایی جمع-ضرب (تکراری). ۱۰۱۴
- شکل ۱۰-۱۵ مقایسه تابع $\Psi(x)$ و $\tanh(x/2)$ ۱۰۱۷
- شکل ۱۱-۱۵ رفتار تکامل چگالی برای یک کد با نرخ $R = \frac{1}{3}$ (ادامه دارد). ۱۰۱۹
- شکل ۱۲-۱۵ بخش‌هایی از گراف تنر برای نشان دادن جریان اطلاعات از گره‌های بیت به گره‌های بررسی و بالعکس. ۱۰۲۲
- شکل ۱۳-۱۵ هیستوگرام‌های اطلاعات بیت به بررسی برای تکرارهای مختلف کدگشا در $1/6$ دسی‌بل. ۱۰۲۴
- شکل ۱۴-۱۵ اطلاعات کدگشا در نسبت‌های مختلف سیگنال به نویز. ۱۰۲۵

فهرست شکل‌ها □ xlix

- شکل ۱۵-۱۵ نمودارهای EXIT در نسبت‌های مختلف سیگنال به نویز. ۱۰۲۶.....
- شکل ۱۶-۱۵ نتیجه جایگشت‌های سطرها و ستون‌ها. ۱۰۳۸.....
- شکل ۱۷-۱۵ کدهای تودرتوی سری و کدگشایی تکراری آنها. ۱۰۴۱.....
- شکل ۱۸-۱۵ یک کدگذار تکرار-انباشت. ۱۰۴۱.....
- شکل ۱۹-۱۵ گراف تنر برای یک کد $RA(3,1)$ دارای دو بیت ورودی. ۱۰۴۲.....
- شکل ۲۰-۱۵ گراف تنر برای یک کد تکرار-انباشت غیر منظم. ۱۰۴۴.....
- شکل ۱-۱۶: گراف‌های عامل مربوط به دو مثال مختلف. ۱۰۶۷.....
- شکل ۲-۱۶ گراف عامل یک DFT. ۱۰۶۸.....
- شکل ۳-۱۶ یک نمایش گرافی از به حاشیه رانی. ۱۰۷۰.....
- شکل ۴-۱۶ تبدیل از گراف عامل به درخت بیان. ۱۰۷۰.....
- شکل ۵-۱۶ گذر پیام در الگوریتم جمع-ضرب. ۱۰۷۴.....
- شکل ۶-۱۶ قدم‌های پردازشی در الگوریتم جمع-ضرب. ۱۰۷۵.....
- شکل ۷-۱۶ گراف عامل (تنر) برای یک کد همینگ. ۱۰۷۸.....
- شکل ۸-۱۶ بخشی از یک گراف برای نشان دادن ساده‌سازی‌ها. ۱۰۷۹.....
- شکل ۹-۱۶ یک ترلیس و گراف عامل نمایش‌دهنده آن. ۱۰۸۲.....
- شکل ۱۰-۱۶ تعیین نام پیام‌ها برای الگوریتم رو به جلو/رو به عقب. ۱۰۸۲.....
- شکل ۱۱-۱۶ گراف عامل برای یک کد توربو. ۱۰۸۴.....
- شکل ۱۲-۱۶ نمایش تبدیل‌های خوشه‌بندی [۱۹۵]. ۱۰۸۷.....
- شکل ۱۳-۱۶ تبدیل بسط. ۱۰۸۸.....
- شکل ۱۴-۱۶ حذف یک یال در یک دور. ۱۰۸۸.....
- شکل ۱۵-۱۶ تبدیل‌ها بر روی گراف عامل DFT. ۱۰۹۱.....
- شکل ۱-۱۷ چندین انعکاس از فرستنده به گیرنده. ۱۱۰۰.....
- شکل ۲-۱۷ شبیه‌سازی یک کانال محوشدگی. ۱۱۰۳.....
- شکل ۳-۱۷ عملکرد چندگانگی کانال محوشدگی تخت شبه ایستا با مدوله‌سازی BPSK. خط ممتد منحنی دقیق است؛ خط چین تقریب است. ۱۱۰۵.....
- شکل ۴-۱۷ چندین آنتن فرستنده و گیرنده در یک کانال محوشدگی. ۱۱۰۷.....
- شکل ۵-۱۷ دو آنتن گیرنده و گیرنده ترکیب‌کننده با نسبت بیشین. ۱۱۰۹.....
- شکل ۶-۱۷ یک طرح چندگانگی با دو آنتن فرستنده: کد الموتی. ۱۱۱۳.....
- شکل ۷-۱۷ یک طرح چندگانگی تأخیری. ۱۱۲۵.....
- شکل ۸-۱۷ منظومه 8-PSK و ترلیس برای یک کدگذار چندگانگی تأخیر. ۱۱۲۶.....
- شکل ۹-۱۷ کدهای فضا-زمان با چندگانگی ۲ برای 4-PSK دارای ۸، ۱۶ و ۳۲ حالت [۳۳۲]. ۱۱۲۷.....
- شکل ۱۰-۱۷ کدهای فضا-زمان با چندگانگی ۲ برای 8-PSK دارای ۱۶ و ۳۲ حالت [۳۳۲]. ۱۱۲۸.....
- شکل ۱۱-۱۷ عملکرد کدهای با 4-PSK و چندگانگی ۲ [۳۳۲] (ادامه دارد). ۱۱۲۹.....

1 □ کدگذاری تصحیح خطا

شکل ۱۲-۱۷ عملکرد کدهای با 8-PSK و چندگانگی ۲ [۳۳۲] (ادامه دارد)..... ۱۱۳۱

شکل الف-۱ نسبت درستی لگاریتمی..... ۱۱۳۸

فهرست جدول‌ها

۶۱.....	جدول ۱-۱ مراحل مهم تاریخی.
۱۴۹.....	جدول ۱-۳ آرایه استاندارد یک کد.
۱۹۸.....	جدول ۱-۴ کلمه‌های کد در کد تولیدشده توسط $g(x) = 1 + x^2 + x^4$.
۲۰۹.....	جدول ۲-۴ مراحل انجام تقسیم طولانی با استفاده از مدار ثبات انتقال.
۲۲۰.....	جدول ۳-۴ محاسبه سندرم و انتقال‌های چرخشی آن برای مثال ۱۹-۴.
۲۲۴.....	جدول ۴-۴ عملکرد کامل کدگشای مگیت مثال ۲۰-۴، با ورودی از سمت چپ.
۲۲۶.....	جدول ۵-۴ عملکرد کامل کدگشای مگیت مثال ۲۱-۴، با ورودی از سمت راست.
۲۳۴.....	جدول ۶-۴ سازنده‌های CRC.
۲۳۷.....	جدول ۷-۴ جدول جستجوی CRC-ANSI با نمایش HEX.
۲۴۱.....	جدول ۸-۴ مثال LFSR با $g(x) = 1 + x + x^2 + x^4$ و حالت اولیه ۱.
۲۴۲.....	جدول ۹-۴ مثال LFSR با $g(x) = 1 + x + x^2 + x^4$ و حالت اولیه $1 + x$.
۲۴۲.....	جدول ۱۰-۴ مثال LFSR با $g(x) = 1 + x + x^2 + x^4$ و حالت اولیه $1 + x^2 + x^3$.
۲۴۲.....	جدول ۱۱-۴ مثال LFSR با $g(x) = 1 + x + x^2$ و حالت اولیه ۱.
۲۷۰.....	جدول ۱۲-۴ کدهای بارکر.
۳۱۵.....	جدول ۱-۵ نمایش توانی، برداری و چندجمله‌ای برای عناصر $GF(2^4)$ به عنوان یک میدان توسعه‌یافته با استفاده از $g(\alpha) = 1 + \alpha + \alpha^4$.
۳۳۹.....	جدول ۲-۵ دسته‌های مزدوج در $GF(2^3)$ نسبت به $GF(2)$.
۳۳۹.....	جدول ۳-۵ دسته‌های مزدوج در $GF(2^4)$ نسبت به $GF(2)$.
۳۴۰.....	جدول ۴-۵ دسته‌های مزدوج در $GF(2^5)$ نسبت به $GF(2)$.
۳۴۰.....	جدول ۵-۵ دسته‌های مزدوج در $GF(2^2)$ نسبت به $GF(4)$.
۳۴۴.....	جدول ۶-۵ دسته‌های سیکلوتومی به پیمانۀ ۱۵ و نسبت به $GF(7)$.
۳۸۶.....	جدول ۱-۶ توزیع وزنی دوگان کدهای BCH دودویی اولیه با قابلیت تصحیح دو خطا و طول $n = 2^m - 1$ (به ازای $m \geq 3$ و m فرد).
۳۸۷.....	جدول ۲-۶ توزیع وزنی دوگان کدهای BCH دودویی اولیه و تعریف محدود با قابلیت تصحیح دو خطا و طول $n = 2^m - 1$ (به ازای $m \geq 4$ و m زوج).
۳۸۸.....	جدول ۳-۶ توزیع وزنی دوگان کدهای BCH دودویی اولیه و تعریف محدود با قابلیت تصحیح سه خطا و طول $n = 2^m - 1$ (به ازای $m \geq 5$ و m فرد).
۳۸۸.....	جدول ۴-۶ توزیع وزنی دوگان کدهای BCH دودویی اولیه و تعریف محدود با قابلیت تصحیح دو خطا و طول $n = 2^m - 1$ (به ازای $m \geq 6$ و m زوج).

جدول ۵-۶	نحوه اجرای الگوریتم برلکمپ-مسی برای رشته ورودی $\{1,1,1,0,1,0,0\}$	۴۱۱
جدول ۶-۶	نحوه اجرای الگوریتم برلکمپ-مسی برای یک کد با قابلیت تصحیح دو خطا.....	۴۱۳
جدول ۷-۶	نحوه اجرای الگوریتم برلکمپ-مسی برای یک کد با قابلیت تصحیح دو خطا: ساده‌سازی برای کد دودویی.....	۴۱۵
جدول ۸-۶	الگوریتم برلکمپ-مسی برای یک کد با قابلیت تصحیح سه خطا.....	۴۲۲
جدول ۱-۷	تک‌جمله‌ای‌های مرتب‌شده بر اساس ترتیب $(1,3)$ -revlex.....	۵۱۷
جدول ۲-۷	تک‌جمله‌ای‌های مرتب‌شده بر اساس ترتیب $(1,3)$ -lex.....	۵۱۷
جدول ۱-۸	کدهای QR توسعه‌یافته نوع $Q_{[373, 220]}$	۶۳۰
جدول ۲-۸	توزیع وزنی کدهای G_{23} و G_{24} [۳۷۳].....	۶۳۲
جدول ۱-۱۰	مشخصات عملکرد سامانه کدگذاری دیسک فشرده [۱۵۹، ص ۵۷].....	۶۷۸
جدول ۱-۱۲	سنجش‌های شاخه کوانتیزه برای کوانتیزه‌سازی خطی.....	۷۶۲
جدول ۲-۱۲	مقایسه فاصله آزاد کدهای سیستماتیک و غیر سیستماتیک برای طول‌های قید مختلف.....	۷۹۰
جدول ۳-۱۲	بهترین کدهای کانولوشنی شناخته‌شده با نرخ $R = \frac{2}{3}$ و $R = \frac{3}{4}$ که با سوراخ کردن یک کد $R = \frac{1}{4}$ به دست می‌آیند [۱۹۸].....	۷۹۴
جدول ۴-۱۲	عملکرد الگوریتم کدگشایی فانو به عنوان تابعی از Δ ، بر روی مثال خاص مثال ۱۲-۱۳.....	۸۱۳
جدول ۱-۱۳	الزامات متوسط انرژی برای برخی از منظومه‌های QAM.....	۸۴۲
جدول ۲-۱۳	کدهای ترلیس با فاصله آزاد بیشینه برای منظومه 8-PSK [۳۴۷، ۲۶۸، ۳۰۳، ۳۸۵].....	۸۶۴
جدول ۳-۱۳	کدهای ترلیس با فاصله آزاد بیشینه برای منظومه 16-PSK [۳۴۷].....	۸۶۵
جدول ۴-۱۳	کدهای ترلیس با فاصله آزاد بیشینه برای منظومه‌های یک‌بعدی ASK [۳۴۷].....	۸۶۵
جدول ۵-۱۳	اتصال‌های کدگذار و بهره‌های کدگذاری برای کدهای ترلیس QAM دارای فاصله آزاد بیشینه [۳۴۷][۳۸۵].....	۸۶۶
جدول ۶-۱۳	مشخصات چند توری منظم.....	۸۸۳
جدول ۷-۱۳	مقایسه متوسط انرژی سیگنال برای منظومه‌های \mathbb{Z}^2 و A_4 با منظومه سیگنال QAM برای دو حالت مختلف مرزهای دایروی و مرزهای مربعی.....	۸۸۸
جدول ۸-۱۳	برخی از کدهای TCM چندبعدی خوب [۳۰۳].....	۸۹۰
جدول ۹-۱۳	مبدل بیت: افراز زیرتوری برای توری منظم مربعی ۴ بعدی [۳۶۵].....	۸۹۳
جدول ۱۰-۱۳	کدگذار بلوکی ۴ بعدی [۳۶۵].....	۸۹۳
جدول ۱-۱۴	محاسبات α'_i و β'_i برای مثال ۲-۱۴.....	۹۲۷
جدول ۲-۱۴	محاسبات احتمال پسین بیت ورودی برای مثال ۲-۱۴.....	۹۲۸
جدول ۱-۱۵	مقادیر آستانه برای کدهای LDPC مختلف در کانال AWGN دودویی.....	۱۰۲۰

فهرست جدول‌ها □ liii

جدول ۲-۱۵ مثال‌هایی از زوج‌های توزیع درجه برای کدهای دارای $R = \frac{1}{p}$ در شرایط ارسال دودویی بر روی کانال AWGN [۲۹۲، ص ۶۲۳]..... ۱۰۲۹

جدول ۱-۱۶ چند نیمه حلقه جابجایی‌پذیر [۲]..... ۱۰۵۹

جدول ۲-۱۶ حالت‌های خاص مهم برای گذر پیام..... ۱۰۷۳

فهرست جعبه‌ها

جعبه ۱-۱	کران اجتماع.....	۳۳
جعبه ۱-۲	توابع یک به یک و توابع پوشا.....	۱۱۳
جعبه ۱-۳	تصحیح خطا و مربعات-کمینه.....	۱۴۶
جعبه ۲-۳	پروتکل UDP.....	۱۶۶
جعبه ۱-۴	الگوریتم تقسیم.....	۱۸۵
جعبه ۱-۵	اواریسٹ گالوا (۱۸۱۱-۱۸۳۲).....	۳۱۳
جعبه ۱-۹	نشان‌گذاری O و o	۶۴۴
جعبه ۲-۹	نامساوی کوشی-شوارتز.....	۶۵۰
جعبه ۱-۱۲	گراف‌ها: تعاریف پایه.....	۷۱۸