

# مقدمه‌ای بر سیستم‌های نهفته

## با رویکرد سیستم‌های سایبر – فیزیکی

و

### نگاهی بر ملاحظات بی‌درنگ

ادوارد اشفوردلی – سانجیت آرونکومار سه شیا

سید امیر اصغری

استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خوارزمی

سپیده شریفانی

کارشناسی مهندسی کامپیوتر

نیاز دانش

# مقدمهٔ مترجمین

کتاب "مقدمه‌ای بر سیستم‌های نهفته، با رویکرد سیستم‌های سایبر-فیزیکی و نگاهی بر ملاحظات بی‌درنگ" کتابی است که بر روی دو مفهوم کلیدی تمرکز می‌کند: سیستم‌های نهفته و دیگری سیستم‌های بی‌درنگ که در غالب کاربردها، این دو سیستم بصورت تلفیقی و تحت عنوان سیستم‌های بی‌درنگ نهفته مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یک سیستم نهفته، یک سیستم کامپیوتری با یک هدف و کاربرد مشخص در یک سیستم مکانیکی و یا الکتریکی است که معمولاً دارای ملاحظات بی‌درنگ است. از آن جهت به این سیستم‌ها، سیستم‌های نهفته گفته می‌شود که بخشی از یک سیستم کامل ساخت‌افزاری و یا مکانیکی هستند. سیستم‌های نهفته، بسیاری از سیستم‌هایی که روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرند را کنترل می‌کنند و غالب میکروکنترلرهایی که ساخته می‌شوند، بخشی از یک سیستم نهفته هستند. بخشی از مشخصه‌های مشترک سیستم‌های نهفته، هنگامی که آنها را با سیستم‌های همه-منظوره مقایسه می‌کنیم، عبارتند از: توان مصرفی کم، سایز کوچک، رنج‌های عملیاتی محدود و مشخص و هزینه ساخت اندک.

مفهوم مهم دیگری که در این کتاب مورد بررسی قرار می‌گیرد، سیستم بی‌درنگ است. در علم کامپیوتر، محاسبات بی‌درنگ (Real-Time Computing) و یا محاسبات واکنشی (Reactive Computing)، سیستم‌های نرم‌افزاری و ساخت‌افزاری‌ای را توصیف می‌کند که ملاحظات بی‌درنگ در آنها وجود دارد. این سیستم‌ها باستی این تضمین را حاصل کنند که خروجی صحیح سیستم در یک بازه مشخصی حتماً تولید شود؛ چرا که تولید این خروجی در خارج از این بازه، حتی اگر صحیح نیز باشد، مطلوب نخواهد بود. این آستانه‌های زمانی، سرحد زمانی (Deadline) نامیده می‌شوند. پاسخ‌های سیستم‌های بی‌درنگ به رویدادها معمولاً از مرتبه میلی‌ثانیه و میکروثانیه هستند. یک سیستم نهفته را معمولاً تحت این تعریف نیز می‌شناسند: "سیستمی که محیط را از طریق دریافت داده‌ها، پردازش آنها و سپس برگرداندن سریع تاثیر پردازش این داده‌ها به محیط، کنترل می‌کند".

مفهوم سیستم بی‌درنگ نهفته، یک مفهوم علمی تجمعی است که علوم متفاوتی را الزاماً در بر می‌گیرد. به همین دلیل، این کتاب می‌تواند مرجع مناسبی برای دانشجویان رشته‌های مهندسی کامپیوتر، مهندسی برق، مهندسی مکانیک، مهندسی هوا و فضا، مهندسی مکاترونیک و مهندسی پزشکی باشد.

این کتاب مشتمل بر ۱۶ فصل و ۲ پیوست است که از میان فصل‌های کتاب، یک فصل از کتاب طراحی سیستم‌های نهفته پیتر مارودل (Peter/ Marudel) نیز به کتاب اصلی برای تکمیل مباحث افزوده شده است.

از آنجا که ترجمه، نسبتاً امری سلیقه‌ای است، در صورتی که تصور می‌رود، مفهوم بخوبی انتقال داده نشده و از شیوه‌ای لازم برخوردار نیست، بسیار خوشحال و سپاسگزار خواهیم شد که نظرات سازنده خود را جهت تصحیح و تکمیل کتاب پیش‌رو به آدرس پست الکترونیکی زیر بفرستید:

asghari@knu.ac.ir

سید امیر اصغری

استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خوارزمی

# فهرست مطالب

عنوان		صفحه
فصل ۱	مقدمه	
۱-۱ کاربردها		۱۷
بحث جانی: در مورد مفهوم سیستم‌های سایبر‌فیزیکی		۲۱
۲-۱ یک نمونه جالب		۲۱
۳-۱ فرآیند طراحی		۲۳
۴-۱ مدلسازی		۲۶
۵-۱ طراحی		۲۷
۶-۱ آنالیز		۲۹
۷-۱ خلاصه		۲۹

## بخش اول / مدلسازی رفتارهای دینامیک

فصل ۲	دینامیک‌های پیوسته	
۱-۲ مکانیک‌های نیوتونی		۳۳
۲-۲ مدل‌های اکتور		۳۴
۳-۲ مشخصه‌های سیستم		۳۸
۴-۲ سیستم‌های علی		۴۱
۵-۲ سیستم‌های بدون حافظه		۴۱
۶-۲ خطی بودن و تغییرناپذیری با زمان		۴۲
۷-۲ پایداری		۴۲
۸-۲ کنترل بازخورده		۴۴
۹-۲ خلاصه		۴۹
۱۰-۲ تمرین‌ها		۵۰

## ۳ دینامیک‌های گستته

۵۳	۱-۳ سیستم‌های گستته	فصل ۳
۵۳	بحث جانبی: بیشتر بدانید: سیگنال‌های گستته	
۵۵	بحث جانبی: بیشتر بدانید: مدل‌سازی اکتورها به عنوان توابع	
۵۶	۲-۳ نماد یا نشانه‌گذاری حالت	
۵۷	۳-۳ ماشین‌های حالت محدود	
۵۸	۱-۳-۳ گذرها	
۵۹	۲-۳-۳ هنگامی که یک ماشین حالت عکس العمل نشان می‌دهد، هیچ چیزی در تعریف حالت آن در نظر گرفته نمی‌شود.	
۶۲	بحث جانبی: بیشتر بدانید: هیسترزیس	
۶۲	۳-۳-۳ توابع به روزرسانی	
۶۴	بحث جانبی: ابزار نرم‌افزاری که از FSM پشتیبانی می‌کنند	
۶۵	۴-۳-۳ قطعیت و پذیرایی	
۶۷	۴-۳ ماشین‌های حالت توسعه داده شده	
۶۸	بحث جانبی: ماشین‌های مور و میلی	
۷۲	۵-۳ عدم قطعیت	
۷۴	۱-۵-۳ مدل فرمال	
۷۵	۲-۵ کاربردهای عدم قطعیت	
۷۶	۶-۳ رفتارها و ردها	
۷۸	۷-۳ خلاصه	
۸۰	تمرين‌ها	

## ۴ سیستم‌های هیبریدی

۸۵	۱-۴ مدل‌های مودال	فصل ۴
۸۵	۱-۱-۴ مدل اکتور برای ماشین‌های حالت	
۸۵	۲-۱-۴ ورودی‌های پیوسته	
۸۶	۳-۱-۴ پالایش حالت	
۸۷	۲-۴ کلاس‌های سیستم‌های هیبریدی	
۸۹	۱-۲-۴ آتماتای زمان‌بندی شده	
۹۳	۲-۲-۴ دینامیک‌های مرتبه بالاتر	

۹۸-	۳-۲-۴ کنترل نظارتی
۱۰۳-	۳-۴ خلاصه
۱۰۵-	تمرین‌ها

۱۱۱-	فصل ۵ ترکیب ماشین‌های حالت
۱۱۲-	۱-۵ ترکیب همرونده
۱۱۳-	۱-۱-۵ ترکیب همگام پهلو به پهلو
۱۱۵-	۲-۱-۵ ترکیب ناهمگام پهلو به پهلو
۱۱۷-	بحث جانبی: زمان‌بندی معنی‌ها برای ترکیب ناهمگام
۱۱۷-	۳-۱-۵ متغیرهای اشتراکی
۱۲۰-	۴-۱-۵ ترکیب ترتیبی
۱۲۳-	۵-۱-۵ ترکیب کلی
۱۲۴-	۲-۵ ماشین‌های حالت سلسله‌مراتبی
۱۲۸-	۳-۵ خلاصه
۱۲۹-	تمرین‌ها

۱۳۱-	فصل ۶ مدل‌های همرونده محاسباتی
۱۳۲-	۱-۶ ساختار مدل‌ها
۱۳۴-	۲-۶ مدل‌های همگام-واکنشی
۱۳۴-	بحث جانبی: شبکه‌های اکتور به عنوان سیستمی از روابط
۱۳۵-	بحث جانبی: معنی‌های نقطه ثابت
۱۳۶-	۱-۲-۶ مدل‌های بازنورد
۱۳۸-	۲-۲-۶ مدل‌های خوش‌فرم و بد‌فرم
۱۳۹-	۳-۲-۶ ایجاد یک نقطه ثابت
۱۴۱-	۳-۶ مدل‌های محاسباتی جریان داده
۱۴۱-	۱-۳-۶ اصول جریان داده
۱۴۲-	بحث جانبی: زبان‌های همگام-واکنشی
۱۴۵-	۲-۳-۶ جریان داده همگام
۱۴۹-	۳-۳-۶ جریان داده پویا
۱۵۱-	۴-۳-۶ جریان داده ساختار یافته

۱۵۲	۵-۳-۶ شبکه‌های پردازش
۱۵۴	۴-۶ مدل‌های محاسباتی زمان‌بندی شده
۱۵۴	بحث جانبی: شبکه‌های پتری
۱۵۶	بحث جانبی: مدل‌های زمانی
۱۵۷	۱-۴-۶ مدل‌های تحریک‌شده زمانی
۱۵۸	۲-۴-۶ سیستم‌های رویداد گستته
۱۵۹	۳-۴-۶ سیستم‌های زمان پیوسته
۱۶۲	۵-۶ خلاصه
۱۶۳	تمرین‌ها

## بخش دوم / طراحی سیستم‌های نهفته

۱۶۹	فصل ۷ پردازنده‌های نهفته
۱۷۰	۱-۷ انواع پردازنده‌ها
۱۷۰	۱-۱-۷ میکروکنترلرها
۱۷۱	۲-۱-۷ پردازنده‌های DSP
۱۷۲	بحث جانبی: میکروکنترلرها
۱۷۳	بحث جانبی: پردازنده‌های DSP
۱۷۶	۳-۱-۷ پردازنده‌های گرافیکی
۱۷۷	۲-۷ موازی‌سازی
۱۷۷	بحث جانبی: بافرهای چرخشی
۱۷۸	۱-۲-۷ موازی‌سازی در برابر همروندي
۱۸۰	۲-۲-۷ ایجاد خط‌لوله
۱۸۴	۳-۲-۷ موازی‌سازی سطح دستورالعمل
۱۸۹	۴-۲-۷ معماری‌های چنداستمای
۱۹۰	بحث جانبی: اعداد نقطه ثابت
۱۹۲	بحث جانبی: محاسبات نقطه ثابت در برنامه‌نویسی C
۱۹۳	۳-۷ خلاصه
۱۹۴	تمرین‌ها

## فصل ۸ معماری‌های حافظه

۱۹۵	۱-۸ تکنولوژی‌های حافظه
۱۹۶	۱-۸-۱ حافظه RAM
۱۹۷	۲-۱-۸ حافظه غیرفرار
۱۹۹	۲-۸ سلسله‌مراتب حافظه
۱۹۹	۱-۲-۸ نگاشت‌های حافظه
۲۰۱	بحث جانبی: معماری هاروارد
۲۰۲	۲-۲-۸ فایل‌های رجیستر
۲۰۲	۳-۲-۸ حافظه‌های چرک‌نویس و نهان
۲۰۸	۳-۸ مدل‌های حافظه
۲۰۸	۱-۳-۸ آدرس‌های حافظه
۲۰۹	۲-۳-۸ پشت‌های
۲۱۰	۳-۳-۸ واحدهای حفاظت از حافظه
۲۱۰	۴-۳-۸ تخصیص حافظه پریما
۲۱۲	۵-۳-۸ مدل حافظه زبان C
۲۱۳	۴-۸ خلاصه
۲۱۴	تمرین‌ها

## فصل ۹ ورودی و خروجی

۲۱۷	۱-۹ سخت‌افزار ورودی-خروجی
۲۱۸	۱-۱-۹ مدولاسیون پنهانی پالس
۲۱۸	۲-۱-۹ ورودی-خروجی دیجیتال همه-منظوره
۲۲۰	۳-۱-۹ واسطه‌های سریال
۲۲۴	۴-۱-۹ واسطه‌های موازی
۲۲۷	۵-۱-۹ گذرگاه‌ها
۲۲۸	۲-۹ نرم‌افزار ترتیبی در دنیای ارتباطات همرون
۲۲۹	۱-۲-۹ وقفه‌ها و استثناءها
۲۳۰	۲-۲-۹ اتمیک بودن
۲۳۲	بحث جانبی: مبانی: تایмерها
۲۳۳	۳-۲-۹ کنترلرهای وقفه
۲۳۴	

۲۳۵	۴-۲-۹ مدل‌سازی و قفعه‌ها
۲۳۹	۳-۹ واسط آنالوگ / دیجیتال
۲۳۹	۱-۳-۹ تبدیلات دیجیتال به آنالوگ و آنالوگ به دیجیتال
۲۴۱	۲-۳-۹ مشروطه‌سازی سیگنال
۲۴۴	۳-۳-۹ نمونه‌برداری و بدنمایی
۲۴۶	بحث جانبی: بیشتر بدانید: قطارهای ضربه‌ای
۲۴۷	۴-۹ خلاصه
۲۴۸	تمرین‌ها

## ۱۰ فصل چند وظیفه‌ای

۲۵۵	۱-۱۰ برنامه‌های دستوری
۲۵۷	بحث جانبی: لیست‌های پیوندی در زبان C
۲۶۰	۲-۱۰ رشته‌نخ‌ها
۲۶۱	۱-۲-۱۰ ایجاد رشته‌نخ‌ها
۲۶۱	۲-۲-۱۰ پیاده‌سازی رشته‌نخ‌ها
۲۶۳	۳-۲-۱۰ انحصار متقابل
۲۶۵	۴-۲-۱۰ بن‌بست
۲۶۸	بحث جانبی: سیستم عامل‌ها
۲۶۸	۵-۲-۱۰ مدل‌های سازگاری حافظه
۲۷۰	۶-۲-۱۰ مشکلات رشته‌نخ‌ها
۲۷۱	۳-۱-۱۰ فرآیندها و پاس‌دهی پیام
۲۷۳	۴-۱۰ خلاصه
۲۷۹	۲۸۰ تمرین‌ها

## ۱۱ فصل زمان‌بندی

۲۸۳	۱-۱۱ مبانی زمان‌بندی
۲۸۴	۱-۱-۱۱ تصمیمات زمان‌بندی
۲۸۴	۲-۱-۱۱ مدل‌های وظیفه
۲۸۶	۳-۱-۱۱ مقایسه زمان‌بندها
۲۸۸	۴-۱-۱۱ پیاده‌سازی یک زمان‌بند

۲۹۱	۲-۱۱ زمانبندی نرخ یکنواخت
۲۹۴	۳-۱۱ زمانبندی در ابتدا اولین سرحد زمانی
۲۹۷	۱-۳-۱۱ EDF همراه با حق تقدمها
۲۹۹	۴-۱۱ زمانبندی و انحصار مقابل
۲۹۹	۱-۴-۱۱ وارونگی اولویت
۳۰۱	۲-۴-۱۱ پروتکل وراثت اولویت
۳۰۱	۳-۴-۱۱ پروتکل سقف اولویت
۳۰۴	۵-۱۱ زمانبندی سیستم‌های چندپردازنده
۳۰۵	۱-۵-۱۱ ناهنجاری‌های زمانبندی
۳۰۸	۶-۱۱ خلاصه
۳۰۸	بحث جانی: مطالعه بیشتر
۳۱۰	تمرین‌ها

## ۱۲ فصل

۳۱۳	سیستم عامل‌های نهفته و میان‌افزارها
۳۱۴	۱-۱۲ پیش‌بینی زمان‌های اجرا
۳۱۵	۲-۱۲ سیستم عامل‌های نهفته
۳۱۵	۱-۲-۱۲ نیازمندی‌های کلی
۳۱۶	۲-۲-۱۲ سیستم عامل‌های بی‌درنگ
۳۱۹	۳-۱۲ میان‌افزار
۳۲۰	۱-۳-۱۲ پایگاه‌های داده بی‌درنگ
۳۲۰	۴-۱۲ پیاده‌سازی سیستم‌های نهفته: هم‌طراحی سخت‌افزار-نرم‌افزار
۳۲۳	۱-۴-۱۲ مدیریت هم‌روندي سطح وظیفه
۳۲۷	۲-۴-۱۲ بهینه‌سازی‌های سطح بالا
۳۲۷	۱-۲-۴-۱۲ تبدیل نقطه شناور به نقطه ثابت
۳۲۸	۲-۲-۴-۱۲ تبدیلات حلقة ساده
۳۳۰	۵-۱۲ پارتبیشن‌بندی سخت‌افزار-نرم‌افزار
۳۳۱	COOL ۱-۵-۱۲
۳۴۱	۶-۱۲ کامپایلرهای سیستم‌های نهفته
۳۴۲	۱-۶-۱۲ کامپایل آگاه به انرژی
۳۴۵	۲-۶-۱۲ کامپایل پردازنده‌هایی با سیگنال دیجیتال
۳۴۷	۳-۶-۱۲ عملیات کامپایل در پردازنده‌های چندرسانه‌ای

۳۴۸	۴-۶-۱۲ عملیات کامپایل در پردازنده‌های VLIW
۳۴۹	۵-۶-۱۲ عملیات کامپایل در پردازنده‌های شبکه
۳۴۹	۶-۶-۱۲ نسل کامپایلر، کامپایلرهای هدف‌یاب و کشف فضای طراحی
۳۵۰	۷-۱۲ مقیاس‌بندی ولتاژ و مدیریت توان
۳۵۰	۷-۷-۱۲ مقیاس‌بندی پویای ولتاژ
۳۵۴	۲-۷-۱۲ مدیریت پویای توان (DPM)
۳۵۴	۸-۱۲ جریان‌ها و ابزارهای طراحی واقعی
۳۵۴	۱-۸-۱۲ روش SpecC
۳۵۵	۲-۸-۱۲ جریان ابزار IMEC
۳۵۸	۳-۸-۱۲ جریان طراحی COSYMA
۳۶۰	۴-۸-۱۲ Ptolemy II
۳۶۱	۵-۸-۱۲ جریان طراحی OCTOPUS

### بخش سوم / آنالیز و صحّت‌سنجی

۱۲

#### فصل ۱۲ نامتغیرها و منطق زمانی

۳۶۵	۱-۱۳ نامتغیرها
۳۶۶	۲-۱۳ منطق زمانی خطی
۳۶۸	۱-۲-۱۳ فرمول‌های منطق گزاره‌ای
۳۶۹	۲-۲-۱۳ فرمول‌های LTL
۳۷۰	بحث جانبی: بیشتر بدانید: منطق‌های زمانی جایگزین
۳۷۳	۳-۲-۱۳ استفاده از فرمول‌های LTL
۳۷۴	۳-۱۳ خلاصه
۳۷۶	بحث جانبی: ویژگی‌های ایمنی و ویژگی‌های عملیاتی
۳۷۸	تمرین‌ها

۱۲

#### فصل ۱۲ همارزی و پالایش

۳۸۱	۱-۱۴ مدل‌ها به عنوان مشخصه
۳۸۱	بحث جانبی: انتزاع و پالایش
۳۸۲	۲-۱۴ پالایش و همارزی نوع
۳۸۳	

۳۸۶	۳-۱۴ هم‌ارزی زبان و محصورسازی آن
۳۸۹	بحث جانبی: دنباله‌های محدود یا متناهی و حالت‌های پذیرش
۳۹۰	بحث جانبی: زبان‌های منظم و عبارات منظم
۳۹۱	۴-۱۴ شبیه‌سازی
۳۹۱	بحث جانبی: بیشتر بدانید: زبان‌های منظم امگا
۳۹۳	۴-۱۴ روابط شبیه‌سازی
۳۹۵	۲-۴-۱۴ مدل فرمال
۳۹۶	۳-۴-۱۴ انتقال‌پذیری
۳۹۷	۴-۴-۱۴ عدم منحصر به فردی روابط شبیه‌سازی
۳۹۸	۵-۴-۱۴ شبیه‌سازی در مقایسه با محصورسازی زبان
۳۹۹	۵-۱۴ شبیه‌سازی دوگانه
۴۰۱	۶-۱۴ خلاصه
۴۰۲	تمرین‌ها

## ۱۵ فصل آنالیز دسترس‌پذیری و وارسی مدل

۴۰۷	۱-۱۵ سیستم‌های باز و بسته
۴۰۸	۲-۱۵ آنالیز دسترس‌پذیری
۴۰۹	۱-۲-۱۵ صحت‌سنگی Gp
۴۱۰	۲-۲-۱۵ وارسی مدل حالت-صریح
۴۱۱	۳-۲-۱۵ وارسی مدل نمادین
۴۱۲	۴-۱۵ انتزاع در وارسی مدل
۴۱۳	۴-۱۵ ویژگی‌های عملیاتی وارسی مدل
۴۱۴	۱-۴-۱۵ ویژگی‌ها به عنوان آنوماتا
۴۱۵	۲-۴-۱۵ یافتن چرخه‌های پذیرش
۴۱۶	۵-۱۵ خلاصه
۴۱۷	بحث جانبی: بیشتر بدانید: وارسی مدل در واقعیت
۴۱۸	تمرین‌ها

## ۱۶ فصل آنالیز کمی

۴۲۹	۱-۱۶ مسائل قابل توجه
-----	----------------------

۴۳۰.	۱-۱-۱۶ آنالیز حالت-حدی
۴۳۱.	۲-۱-۱۶ آنالیز آستانه
۴۳۲.	۳-۱-۱۶ آنالیز حالت-متوسط
۴۳۲.	۲-۱۶ برنامه‌ها به عنوان گرافا
۴۳۳.	۱-۲-۱۶ بلوک‌های پایه‌ای
۴۳۳.	۲-۲-۱۶ گراف‌های کنترل جریان
۴۳۴.	۳-۲-۱۶ فراخوانی‌های تابع
۴۳۶.	۳-۱۶ فاکتورهای تعیین‌کننده زمان اجرا
۴۳۶.	۱-۳-۱۶ محدودیت‌های حلقه
۴۳۹.	۲-۳-۱۶ فضای مسیر نمایی
۴۳۹.	۳-۳-۱۶ امکان‌پذیری مسیر
۴۴۱.	۴-۳-۱۶ سلسه‌مراتب حافظه
۴۴۲.	۴-۱۶ مبنای آنالیز زمان اجرا
۴۴۲.	۱-۴-۱۶ فرمول‌بندی بهینه‌سازی
۴۴۵.	۲-۴-۱۶ محدودیت‌های جریان منطقی
۴۴۸.	۳-۴-۱۶ محدودیت‌هایی برای بلوک‌های پایه‌ای
۴۵۱.	۵-۱۶ برخی از مسائل آنالیز کمی دیگر
۴۵۱.	۱-۵-۱۶ آنالیز محدودیت حافظه
۴۵۱.	بحث جانی: ابزارهایی برای آنالیز زمان اجرا
۴۵۳.	۲-۵-۱۶ آنالیز توان و انرژی
۴۵۳.	۶-۱۶ خلاصه
۴۵۴.	تمرين‌ها

## بخش چهارم / پيوستها

۴۵۹.	<b>الف</b> مجموعه‌ها و توابع	پيوست
۴۵۹.	الف-۱ مجموعه‌ها	
۴۶۰.	الف-۲ روابط و توابع	
۴۶۴.	الف-۲-۱ محدودیت و تصویرسازی	
۴۶۵.	الف-۲-۳ دنباله‌ها	
۴۶۵.	بحث جانی: مفهوم نمایی برای مجموعه‌های توابع	
۴۶۷.	تمرين‌ها	

**ب** پیوست

۴۶۸	پیچیدگی و محاسبه پذیری
۴۶۹	ب-۱ اثربخشی و پیچیدگی الگوریتم‌ها
۴۷۰	ب-۱-۱ نماد O بزرگ
۴۷۲	ب-۲ مسائل، الگوریتم‌ها و برنامه‌ها
۴۷۳	ب-۲-۱ محدودیت‌های اساسی برنامه‌ها
۴۷۴	ب-۳ ماشین‌های تورینگ و تصمیم‌نپذیری
۴۷۶	ب-۳-۱ ساختار یک ماشین تورینگ
۴۷۸	ب-۳-۲ مسائل تصمیم‌پذیر و تصمیم‌نپذیر
۴۷۹	بحث جانی: بیشتر بدانید: توابع و مجموعه‌های بازگشتی
۴۸۱	ب-۴ مسائل دشوار: P و NP
۴۸۴	ب-۵ خلاصه
۴۸۵	تمرین‌ها
۴۸۷	شاخص نمادگذاری
۴۸۹	مراجع
۵۰۱	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۵۱۱	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی