



۱۶.۶۵۶۲

# ارزیابی کارایی الکترونیک شبکه های کامپیوتری

دکتر احسان ملکیان  
(دانشگاه خوارزمی تهران)

ناشر: کتابخانه تخصصی، کامپیوتر، دانشگاه، مدیریت

نص

سرشناسه  
عنوان و نام پدیدآور : ارزیابی کارایی سیستم‌ها و شبکه‌های کامپیوتری / احسان ملکیان.  
مشخصات نشر : تهران : نشر نص، ۱۳۹۶.  
مشخصات ظاهری : ۴۶۴ ص.  
شابک : ۹۷۸-۹۶۴-۴۱۰-۳۷۸-۰  
وضعیت فهرست نویسی : فیپا  
موضوع : شبکه‌های کامپیوتری  
موضوع : Computer networks  
موضوع : شبکه‌های کامپیوتری -- ارزیابی  
موضوع : Computer networks -- Evaluation  
رده بندی کنگره : TK۵۱۰۵/۵/م۷۴ الف ۴ ۱۳۹۶  
رده بندی دیویی : ۰۰۴/۶  
شماره کتابشناختی ملی : ۴۶۲۸۸۱۷



موسسه علمی فرهنگی

ارزیابی کارایی سیستم‌ها و شبکه‌های کامپیوتری

دکتر احسان ملکیان

چاپ اول: بهار ۱۳۹۶

تیراژ: ۲۰۰۰

ناشر: «نص»

طراحی، آماده‌سازی، چاپ و صحافی: موسسه علمی فرهنگی «نص»

قیمت: ۲۸,۰۰۰ تومان

دفتر انتشارات: تهران، میدان انقلاب، خ منیری جاوید، بن‌بست مبین، شماره ۶

تلفن: ۶۶۴۱۲۳۸۵ - ۶۶۴۶۵۶۷۴ - ۶۶۹۵۳۸۸۳

فروشگاه: ضلع جنوب شرقی میدان انقلاب، شماره ۲۵، تلفن: ۶۶۴۰۵۳۷۲

ISBN: 978-964-410-378-0

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۴۱۰-۳۷۸-۰

ایمیل: info@nasspub.com

وب سایت: www.nass.ir

# دبانه و ساس نامه

سخن با خوانندگان کتاب

افتخار بیش از بیست سال تدریس در دانشگاه‌های مختلف (از صنعتی شریف و امیرکبیر تا دانشگاه تهران و شهید بهشتی و خوارزمی و رهره‌آ (س) و دانشگاه‌های آزاد) این فرصت مغتنم را پدید آورد که برای یکایک دروسی که افتخار تدریس آن‌ها را این حقیر تفویض می‌شد جزوه‌ای تهیه نمایم تا هم مطالب جلسات درس را به همان زبان که با دانشجویان می‌گویم بازتاب بدهد و هم عزیزانم را از تکلف جزوه نوشتن معاف دارد. حاصل این جزوات، کتاب‌هایی هستند که در طی پانزده سال اخیر به همت انتشارات «نص» چاپ و منتشر شدند و سپاس خداوندگار قلم را که بسیاری از آن کتاب‌ها مقبول طبع مخاطبین قرار گرفته است.

به روال مرسوم در همه کتاب‌هایم، در این دبانه نیز تاکید می‌ورزم که مطالب این کتاب به استثنای نحوه بیان و شرح تفسیر مطالب، نه جوهر آنها از آن منسوب است و نه هنری به جز روایت آنچه دیگران در دریای دانش یافته‌اند دارم. تمام کوشش من این بود که به جای ترجمه‌ی یک کتاب واحد، مطابق با سرفصل تبیین شده برای درس (توسط شورای عالی برنامه‌ریزی وزارت علوم) از هر مرجعی که سودمند می‌یافتم، آزادانه اقتباس کنم و هیچ نقیذی به چارچوب کتابی خاص نداشته باشم تا دستم برای حذف و تعدیل و اضافه و حتی طرح مثال و مسئله، باز باشد. از این روی، نه تنها از کتاب‌های مرجع (که در انتهای هر فصل نام اهم آنها فهرست شده است) بهره گرفته‌ام بلکه به اسلایدهای دانشگاه‌های معتبر خارج از کشور، مقالات، پایان‌نامه‌ها و حتی سخنرانی‌های ارزشمند شفاهی نیز نیم‌نگاهی داشته‌ام.

فصل نخست کتاب مشتمل بر تعاریف و مفاهیمی است که خواننده می‌تواند خواندن آن را تا هر زمان دلبخواه به تعویق بیندازد بدون آنکه پیوستگی مطالب خدشه‌دار شود.

فصل دوم در واقع چکیده‌ای ۸۳ صفحه‌ای از کل درس احتمال و آمار مهندسی از دوره کارشناسی است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم در بطن بقیه فصول به مفاذ آن نیاز داشته‌ایم. اگر این درس را با اشتیاق و درکی شهودی گذرانده‌اید کافی است فقط تمرینات این فصل را برای اطمینان بیشتر از حافظه خود حل کنید و فقط بخش‌هایی را مطالعه نمایید که فراموش‌تان شده یا برایتان تازگی دارد.

فصل سوم پس از مروری بر مفاهیم پایه‌ی فرایندهای تصادفی، به شرح و بسط یکی از ابزارهای قدرتمند ریاضی در مدل‌سازی و تحلیل کارایی سیستم‌های تصادفی پرداخته‌ایم: «زنجیره‌های مارکوف». توصیه می‌کنیم که این فصل را به شکلی عمیق و شهودی فرا بگیرید و پیش از آغاز فصول بعدی مطمئن شوید هیچ ابهامی در ذهن‌تان باقی نمانده است. در متن کتاب هم اشاره کرده‌ایم که به جز علوم کامپیوتر، زنجیره‌های مارکوف برای

مدل‌سازی و توصیف سیستم‌های تصادفی در حوزه‌های متنوعی همانند اقتصاد، سیاست و مدیریت هم سودمند می‌افتد.

فصل چهارم و پنجم به شرح انواع و اقسام «سیستم‌های صف»، روش مدل‌سازی و استخراج آمارگان کلیدی این سیستم‌ها اختصاص دارد و هسته مرکزی این کتاب محسوب می‌شود.

فصل ششم به معرفی و مدل‌سازی پدیده‌هایی می‌پردازد که ویژگی‌های فرکتالی و خودسان (self-similar) دارند. این فصل مفهومی و کمابیش سنگین را حتی از سر کنجکاوی هم که شده بخوانید و بر مبانی نظری آن مسلط باشید.

فصل هفتم در آخر کوشیده است تا رفتار سیستمی را مدل‌سازی و تحلیل کند که هر یک از زیرسیستم‌های آن به خودی خود یک سیستم صف هستند. این فصل، پایان مناسبی است برای اهداف این کتاب، که آن را برای تدریس به عنوان یک درس سه واحدی در ۱۶ هفته تدارک دیده‌ایم.

پاس نامه: درگذشت می‌آید از آن کس که روی از رخسار او بدید

سه سوره در کمال تالیف وجود دارد:

نوشته روی که قابل شناسایی باشد،

باشد، مرد شریفی که آن را شناسد،

پیدا کند مردان و زنان حساس و فکرمسنجی که آن را بخوانند!! (اکرلون)

در آستانه پانزدهمین سال آشنایی با مردی که سلام و ایستادن و گرمی پاسخ گفت خواستم چیزی بنویسم که هم بوی خاطره بدهد و هم گوشه‌ای از موسیقی دلنشین واقعیت باشد.

شهریورماه پانزده سال پیش، با کوله‌باری از کاغذ سیاه و ارزوی سپید در حوالی دانشگاه تهران به دنبال نگاهی آشنا می‌گشتم تا نشانی دفتر «انتشارات نص» در بن‌بست مبین را بی‌سبب و جور کنم. در این شهر پریها هو، تازه مهاجری بودم که ظاهرش غربتش را فریاد می‌زد. نشانی «نص» را از منتهی نخست کتاب‌های دوران دانشجویی خود بر تکه‌ای کاغذ یادداشت کرده بودم. به دنبال همین انتشارات بودم زیرا کتاب‌های منقوش به نشان «نشر صدوق» (نص) همیشه برای جمع دانشجویی‌مان اعتباری ویژه داشت. در مسیر راه‌های غریب، سرگردان‌تر از آن بودم که بدانم «نص» چگونه جایی است و با چه آدم‌هایی روبرو خواهم شد. برای اولین بار پایم به «نص» باز شد و مدیرش را سلام گفتم. دفتر کارش صفای درویشی داشت ولی هیچ نداشت؛ رونق دل‌های شوریده بود. دیوارهای ساختمانش از آجر خام، چشم نظربازان را نمی‌نواخت ولیک بسیار بر دل نشست که مأمن خراباتیان و آرام دل سودازدگان بود. برخلاف قاعده مرسوم این ساختمان حتی تابلو یا پرچم نداشت.

در کنار میز شلوغش نشستم: سخت نبود حدس آنکه از اهالی یزد است و دانش‌آموخته دانشگاه صنعتی شریف و استاد سابق دانشگاه که به کسوت معلم نشر درآمدی بود؛ کاسب نبود که عاشق بود. کتاب را می‌شناخت. هوش سرشارش در همان ابتدا از پرده برون افتاد؛ شمرده سخن می‌گفت و بی‌پرده؛ تعارف نداشت ولی واژگان واژگون آلوده به ریا به کار نبرد (چنان‌که رایج است و پرخریدارا!) محکم بود و بی‌تکلف؛ پایبند سنت، خالی از تزویر و سرشار از تدبیر.

اوراق صحافی نشده را با دقت ورق زد و نگاه کرد؛ زودتر از آنچه گمان داشتم رأی مساعد به انتشار

ولیکن مشروط به تغییراتی چند داد؛ دانستم که بایست صبر کنم تا روایی که در ذهن دارد سپری شود و کار تالیف و تصنیف به تعجیل، شدنی نیست؛ همین که نظرش مساعد بود یک دنیا می‌ارزید ولی تغییراتی که مد نظر داشت برای جوان عجولی که می‌خواست هرچه سریع‌تر ورق‌پاره‌هایش به قواره یک کتاب درآید گلوگیر بود؛ زهی شادبختی که این جوان خام به قدر کفایت سرد و گرم روزگار کشیده بود که بپذیرد: تلخی صبر آگهی کلوکی است عاقبت خوشگوار خواهد بود.

او نیز آنقدر متواضع بود که برای سهل‌تر شدن تغییراتی که در نظر داشت به منزل محقر یک جوان بی‌تجربه بیاید تا هم ظرایفی را از روال چاپ کتاب به او بیاموزد و هم خاطره‌ای ماندنی از فروتنی به یادگار بگذارد؛ در روزگاری که برای دیدار با یک مدیر فرودست باید تملق گفت و نخوت دربان دید و عتاب شنید او با پای خودش به هیچ وسیله یا مرکبی در کسوت و حشمت درویشان آمد و تا دیر هنگام شب ماند تا مبادا نکته‌ای از قلم بیفتد.

سه ماه بعد اندکی بعد از کتاب نخست با نام اصول مهندسی اینترنت چاپ شد (کتابی که تا کنون ۴۵ بار تجدید چاپ و ویرایش شده است). پس از آن اعتماد خود افزون کرد و راهنمایی‌ها را غنی‌تر. از آن پس آنچه را می‌نوشتم بر مبنای آنکه او در نخستین شب‌نشینی پیشنهاد کرده بود می‌آراستم و او نیز با کمترین تکلفی چاپ می‌کرد. هر بار به نهاد علمی می‌داد می‌دانستم که صلاحی در کار است و بی‌اندکی تردید به کار می‌بستم و این چنین شد که اینک آموزشگران شده‌ام که کتاب‌های خودش را تدریس می‌کند. آرزویی که شاید رویای بسیاری از مردمان عصر ما نباشد ولی ارزشی دیوانه‌ای چون من بود.

چهار سال بعد، به همت او و همکارانش که به خود او دوست‌داشتنی بودند کتاب چهارم من نیز به چاپ رسیده بود تا آنکه دست تقدیر، روزگار دشوار و پرانده‌م را بر اینم زد و در غمی هولناک افتادم. بار دیگر دست مرا گرفت تا در تندباد روزگار چراغم نمیرد و تا کتاب هم قلم از دست لرزانم نیفتد.

اکنون، روزگاران نخستین آشنایی به سان خاطره یک پرستش‌مانجر سپری شده است؛ کتابهایم از ده جلد فراتر رفته و مخاطبین کتابهای آن جوان خام دیروز که به همت من به مآل‌اندیش مجال نشر یافته‌اند از سیصد و پنجاه هزار تن گذشته است. مرور خاطرات این پانزده سال برای جوانی که با سرمایه‌ای از امید آمد ولی هیچ نداشت، حس زیبایی است. آن زمان موی سپیدی نداشتم ولی این سال‌ها موهای سیاهم به شماره افتاده‌اند؛ آن مرد هنوز بر همان عهد و مرام روز نخستین باقی است و من نیز با او بر عهد و پیمانم. بی‌مدد هیچ قرارداد و خط و نشان! فقط به پشتوانه اخلاق و مهر انسانیت.

بی‌مدد واژه‌های کژتاب دویلهوی مبهم، سخن اینگونه کوتاه می‌کنم که «دانشش دایم»؛

«محمد حسین زارع» ما

و برایش آرزوی می‌کنم: عمری قرین با عزت و کرامت

تا ماند سبز و سرفراز

و «نص» اش مأمن شوریدگانی باشد

که جز اندیشه و قلم و دعای نیرشبان هیچ بضاعتی ندارند.

## ۱ فصل ثانیه‌های آردا، چه می‌داند؟ از افق مباحث کتاب

۱۷

- ۱-۱. خوشامدگویی و حرف‌های درگوشی ..... ۱۷
- ۲-۱. ارزیابی کارآیی شبکه‌های کامپیوتری ..... ۱۸
- ۱-۲-۱. کیفیت خدمات (QoS: Quality of Service) ..... ۱۹
- ۲-۲-۱. کیفیت ادراکی یا «کیفیت با محک تجربه» (QoE: Quality of Experience) ..... ۲۰
- ۳-۲-۱. کیفیت ذاتی شبکه (intrinsic) و پارامترهای QoS ..... ۲۲
- ۴-۲-۱. «تاخیر» (Delay) و «زمان تکوین» (Latency) ..... ۲۲
- ۵-۲-۱. عوامل اصلی تاخیر ..... ۲۴
- ۶-۲-۱. لرزش (Jitter or Delay variation) ..... ۲۹
- ۷-۲-۱. پهنای باند (Bandwidth)، گذردهی (Throughput) و گذردهی مفید (Goodput) ..... ۳۰
- ۸-۲-۱. تلفات بسته (Packet Loss) ..... ۳۱
- ۳-۱. شناخت نیازهای برنامه‌های کاربردی به کیفیت خدمات ..... ۳۲
- ۱-۳-۱. برنامه‌های کاربردی از دیدگاه وابستگی به زمان (Time Dependence) ..... ۳۳
- ۲-۳-۱. برنامه‌های کاربردی از دیدگاه نیاز به تقارن منابع و تقارن کیفیت خدمات ..... ۳۴
- ۳-۳-۱. مروری بر چند استاندارد و توصیه‌نامه پیرامون کیفیت خدمات ..... ۳۶

- ۴-۱. کیفیت خدمات مورد نیاز کاربردهای مختلف در اینترنت ..... ۴۰
- ۵-۱. مقدمه‌ای بر مدل‌سازی ترافیک شبکه ..... ۵۶
- ۱-۵-۱. متودولوژی ارزیابی کارآیی شبکه ..... ۵۷
- ۲-۵-۱. اندازه‌گیری ترافیک ..... ۵۹
- ۳-۵-۱. روشهای اندازه‌گیری ..... ۶۰
- ۴-۵-۱. سیاست‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری و فرآیند مدل‌سازی ..... ۶۱
- ۵-۵-۱. نکته‌ای در مورد تجمیع ترافیک (Aggregation) ..... ۶۴
- ۶-۱. تمرین‌ها پژوهش عملی ..... ۶۸
- مهم‌ترین مراجع فصل ..... ۶۹

## ۲. روش‌های از احتمال و آمار با کاربردهای شبکه ..... ۷۱

- ۱-۲. دیباچه ..... ۷۱
- ۲-۲. یادآوری از ترکیبیات (Combinatorics) ..... ۷۲
- ۳-۲. روایتی کوتاه و مجمل از اصول موضوعه احتمال و آمار ..... ۷۷
- ۱-۳-۲. تعریف «احتمال» (probability) و اصول موضوعه کولموگوروف ..... ۷۹
- ۲-۳-۲. متغیر تصادفی ..... ۸۰
- ۳-۳-۲. تابع چگالی احتمال ..... ۸۱
- ۴-۳-۲. تابع جرم احتمال ..... ۸۲
- ۵-۳-۲. تابع توزیع تجمعی ..... ۸۴
- ۶-۳-۲. شاخص‌های مهم توابع توزیع احتمال ..... ۸۵
- ۴-۴-۲. کوله‌ای از توابع توزیع احتمال ..... ۹۱
- ۱-۴-۲. توزیع برنولی (Bernoulli distribution) ..... ۹۳
- ۲-۴-۲. توزیع دو جمله‌ای (Binomial distribution) ..... ۹۳
- ۳-۴-۲. توزیع یکنواخت گسسته و پیوسته (Uniform distribution) ..... ۹۶



|     |                                                                                 |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------|
| ۹۸  | ..... تابع توزیع پواسون (Poisson distribution)                                  |
| ۱۰۱ | ..... تابع توزیع نمایی (Exponential distribution)                               |
| ۱۰۵ | ..... تابع توزیع هندسی (Geometric distribution)                                 |
| ۱۰۷ | ..... توزیع دوجمله‌ای منفی                                                      |
| ۱۰۸ | ..... تابع توزیع نرمال                                                          |
| ۱۱۳ | ..... توزیع ارلانگ (Erlang distribution)                                        |
| ۱۱۵ | ..... ۵-۲ احتمال شرطی و دستاوردهای شگرف آن                                      |
| ۱۱۸ | ..... ۱-۲-۲ تاج جرم احتمال طول بسته‌ها در زیرساخت شبکه اینترنت و توجیه منطقی آن |
| ۱۲۱ | ..... ۱-۵-۲ تابع یک متغیر تصادفی                                                |
| ۱۲۵ | ..... ۶-۲ توزیع احتمال نوآم                                                     |
| ۱۲۷ | ..... ۱-۶-۲ قضیه میانگین شرطی ( $E[E[X Y]] = E[X]$ )                            |
| ۱۳۲ | ..... ۷-۲ قانون اعداد بزرگ و قضیه حد مرکزی                                      |
| ۱۳۲ | ..... ۱-۷-۲ قانون ضعیف اعداد بزرگ (The weak law of large numbers)               |
| ۱۳۲ | ..... ۲-۷-۲ قانون قوی اعداد بزرگ (The strong law of large numbers)              |
| ۱۳۲ | ..... ۳-۷-۲ قضیه حد مرکزی ((Central limit theorem))                             |
| ۱۳۳ | ..... ۴-۷-۲ تابع مولد احتمال (Probability Generate Function) تبدیل $Z$          |
| ۱۳۹ | ..... ۵-۷-۲ جعبه ابزار ترکیبیاتی و احتمالاتی از خانواده استرلینگ                |
| ۱۴۳ | ..... ۸-۲ برخی از نامساوی‌های مشهور در نظریه احتمال                             |
| ۱۴۳ | ..... ۱-۸-۲ نامساوی خین‌چین و دنباله‌های رادماخر و شبه‌رادماخر                  |
| ۱۴۴ | ..... ۲-۸-۲ نامساوی مارکوف و چبی‌شف                                             |
| ۱۴۵ | ..... ۹-۲ مسائل حل شده آخر فصل                                                  |
| ۱۴۵ | ..... ۱-۹-۲ ترکیبیات و احتمال در سیستم‌های تشخیص ناهنجاری                       |
| ۱۴۶ | ..... ۲-۹-۲ بهره‌وری کانال در شبکه ات‌رنت سنتی                                  |
| ۱۴۸ | ..... ۳-۹-۲ بهره‌وری روش توقف و انتظار (Stop & Wait) در کنترل لینک              |
| ۱۴۹ | ..... ۴-۹-۲ پدیده تصرف کانال در ات‌رنت                                          |
| ۱۵۱ | ..... ۱۰-۲ تمرین‌ها                                                             |
| ۱۵۳ | ..... مهم‌ترین مراجع فصل                                                        |



|     |                                                                                                     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۵۵ | نگاهی به مفاهیم فرایندهای تصادفی و زنجیره‌های مارکوف                                                |
| ۱۵۵ | ۱-۳. دیباچه                                                                                         |
| ۱۵۶ | ۲-۳. فرآیند تصادفی                                                                                  |
| ۱۵۸ | ۱-۲-۳. خودهمبستگی و همبستگی متقابل                                                                  |
| ۱۶۱ | ۲-۲-۳. فرآیندهای تصادفی ایستادن (Stationary)                                                        |
| ۱۶۸ | ۳-۲-۳. فرآیندهای ایستادن چرخشی (Cyclostationary)                                                    |
| ۱۶۹ | ۴-۲-۳. فرآیندهای تصادفی ارگودیک (Ergodic)                                                           |
| ۱۷۳ | ۳-۳. زنجیره‌های مارکوف                                                                              |
| ۱۷۵ | ۱-۳-۳. معادلات چپمن-کولموگوروف                                                                      |
| ۱۷۷ | ۲-۳-۳. مفاهیم و تعاریفی در زنجیره‌های مارکوف                                                        |
| ۱۸۱ | ۴-۳. تحلیل حالت پایا در زنجیره‌های مارکوف و توزیع‌های پایا                                          |
| ۱۸۴ | ۱-۴-۳. تعادل (Balance) و وارونگی در زمان                                                            |
| ۱۹۰ | ۲-۴-۳. قدم‌زنی تصادفی (Random Walk)                                                                 |
| ۱۹۵ | ۳-۴-۳. توزیع PH (Phase-type distribution)                                                           |
| ۱۹۷ | ۵-۳. فرآیند تصادفی «ورود پواسون» (The Poisson Arrival)                                              |
| ۲۰۱ | ۱-۵-۳. ارتباط فرآیند تصادفی پواسون و فرآیند تصادفی نمایی                                            |
| ۲۰۳ | ۲-۵-۳. تجمع (ادغام) فرآیندهای تصادفی پواسون                                                         |
| ۲۰۴ | ۳-۵-۳. شکافت تصادفی ترافیک (Random Traffic Splitting)                                               |
| ۲۰۹ | ۴-۵-۳. یک برداشت نادرست: نمایی، ارلانگ، پواسون تجمع‌شده، نمایی تجمع‌شده                             |
| ۲۱۱ | ۶-۳. تحلیل پروتکل Slotted Aloha                                                                     |
| ۲۱۲ | ۱-۶-۳. زنجیره مارکوف برای Slotted Aloha                                                             |
| ۲۱۷ | ۷-۳. رتبه‌دهی و تحلیل لینک در گوی در قالب زنجیره مارکوف                                             |
| ۲۱۸ | ۱-۷-۳. الگوی رتبه‌بندی Page Rank در گوی                                                             |
| ۲۲۱ | ۸-۳. فرآیندهای بازتکرار (Renewal Processes): تعمیم الگوی ورود متقاضیان از پواسون به هر توزیع دلخواه |

|     |                                                                   |
|-----|-------------------------------------------------------------------|
| ۲۲۶ | ..... ۹-۳. زنجیره‌های مارکوف زمان پیوسته                          |
| ۲۳۳ | ..... ۱-۹-۳. ماتریس مولد بس‌خرد برای فرآیند تصادفی ورود پواسون    |
| ۲۳۴ | ..... ۲-۹-۳. فرآیند پواسون دسته‌ای (Batch Poisson process)        |
| ۲۳۶ | ..... ۱۰-۳. فرآیند ورود مارکوف یا MAP (Markovian Arrival Process) |
| ۲۳۹ | ..... ۱-۱۰-۳. MMPP : Markov modulated poisson process             |
| ۲۴۱ | ..... ۲-۱۰-۳. BMAP: Batch Markovian arrival process               |
| ۲۴۲ | ..... ۱۱-۳. زنجیره مارکوف نهفته (embedded markov chain)           |
| ۲۴۴ | ..... ۱۲-۳. تمرین‌ها                                              |
| ۲۵۲ | ..... مهم‌ترین مراجع فصل                                          |

## ۴ مبانی نظریه صف، صف‌های $M/M/1$ ..... ۲۵۳

|     |                                                           |
|-----|-----------------------------------------------------------|
| ۲۵۳ | ..... ۱-۴. دیباچه                                         |
| ۲۵۹ | ..... ۲-۴. صف $M/M/1$                                     |
| ۲۶۵ | ..... ۳-۴. قانون لیتل (Little's Law)                      |
| ۲۶۷ | ..... ۱-۳-۴. محاسبه توزیع احتمال زمان اقامت در صف $M/M/1$ |
| ۲۶۹ | ..... ۴-۴. صف $M/M/m$                                     |
| ۲۷۵ | ..... ۵-۴. صف $M/M/1/m$                                   |
| ۲۷۹ | ..... ۶-۴. صف $M/M/c/K$                                   |
| ۲۹۱ | ..... ۷-۴. صف $M/M/\infty$                                |
| ۲۹۱ | ..... ۸-۴. تمرین‌ها                                       |
| ۲۹۵ | ..... مراجع فصل                                           |

## ۵ صف‌های $M/G/1$ ، $G/M/1$ و نگاهی ژرف‌تر به نظریه صف ..... ۲۹۷

|     |                   |
|-----|-------------------|
| ۲۹۷ | ..... ۱-۵. دیباچه |
|-----|-------------------|

|     |                                                                                     |       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ۲۹۸ | ..... صف‌های M/G/۱                                                                  | ۲-۵   |
| ۳۰۴ | ..... صف M/D/۱                                                                      | ۱-۲-۵ |
| ۳۱۲ | ..... صف‌های G/M/۱                                                                  | ۳-۵   |
| ۳۱۸ | ..... صف E <sub>k</sub> /M/۱                                                        | ۱-۳-۵ |
| ۳۲۰ | ..... صف D/M/1                                                                      | ۲-۳-۵ |
| ۳۲۲ | ..... صف G/G/۱: صفی با هر توزیع دلخواه                                              | ۴-۵   |
| ۳۲۶ | ..... ۵-۵. آشنایی با مفهوم انسداد سر صف (HoL) و محاسبات کارایی بر اساس نظریه صف     |       |
| ۳۳۱ | ..... ۶-۵. پارادوکس تلاقی تصادفی (Random Incidence Paradox)                         |       |
| ۳۳۶ | ..... ۷-۵. سیستم‌های صف اولویت‌دار (Priority Queueing System)                       |       |
| ۳۳۷ | ..... ۱-۷-۵. صف‌های M/G/۱ با اولویت‌بندی انحصاری (Non-preemptive Priority Queueing) |       |
| ۳۴۱ | ..... ۲-۷-۵. صف‌های M/G/۱ با اولویت‌بندی غیرانحصاری ملزم به ادامه کار (از جای توقف) |       |
| ۳۴۳ | ..... ۸-۵. تمرین‌ها                                                                 |       |
| ۳۴۹ | ..... مهم‌ترین مراجع فصل                                                            |       |

## ۶ فرکتال و خودسانی، مدل‌سازی ترافیک شبکه ۳۵۱

|     |                                                                                     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ۳۵۱ | ..... ۱-۶. مدل‌سازی تولید ترافیک و تاثیر آن بر کیفیت خدمات (QoS)                    |
| ۳۵۴ | ..... ۲-۶. فرآیند خودسان (Self-Similar Process)                                     |
| ۳۵۶ | ..... ۳-۶. ریاضیات فرآیندهای تصادفی خودسان (گسسته و پیوسته)                         |
| ۳۶۰ | ..... ۱-۳-۶. مثالی از یک فرآیند تصادفی خودسان با پارامتر خودسانی H                  |
| ۳۶۱ | ..... ۴-۶. توزیع‌های دُم کلفت                                                       |
| ۳۶۱ | ..... ۱-۴-۶. تابع توزیع دُم کلفت پرتاو (Pareto Heavy-tailed Distribution)           |
| ۳۶۵ | ..... ۲-۴-۶. تابع توزیع وایبول (Weibull Distribution) با دُم قابل تنظیم و پارامتریک |
| ۳۶۷ | ..... ۳-۴-۶. توزیع لگاریتمی-نرمال (log-normal distribution)                         |
| ۳۶۸ | ..... ۴-۴-۶. توزیع بور (Burr distribution)                                          |

|     |                                                                                 |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------|
| ۳۶۹ | ..... توزیع دم کلفت لوی (Lévy distribution) ۵-۴-۶                               |
| ۳۶۹ | ..... فرآیندهای تصادفی با وابستگی گذرا و طولی‌المدت ۵-۶                         |
| ۳۷۰ | ..... اثر نوح (Noah Effect) و اثر یوسف (Joseph Effect) ۱-۵-۶                    |
| ۳۷۲ | ..... «حرکت براونی» و «حرکت براونی جزئی» ۶-۶                                    |
| ۳۷۶ | ..... آزمون‌های تشخیص خودسانی و اندازه‌گیری پارامتر هارست ۷-۶                   |
| ۳۷۶ | ..... نمودار واریانس-زمان (Variance-Time Plot) ۱-۷-۶                            |
| ۳۷۷ | ..... تحلیل R/S (R/S: Rescaled range analysis) ۲-۷-۶                            |
| ۳۸۱ | ..... روش هیگوخ در تخمین پارامتر هارست ۳-۷-۶                                    |
| ۳۸۲ | ..... تخمین پارامتر هارست در حوزه فرکانس: نمودار تناوب‌سنجی (Periodogram) ۴-۷-۶ |
| ۳۸۲ | ..... اثر خودسانی ترافیک به سوی محاسبات صف ۸-۶                                  |
| ۳۸۶ | ..... صف ۱-۸-۶ Pareto/M/۱                                                       |
| ۳۹۲ | ..... پدیده قوی سیاه ۲-۸-۶                                                      |
| ۳۹۳ | ..... تمرین‌ها ۹-۶                                                              |
| ۳۹۵ | ..... مهم‌ترین مراجع فصل                                                        |
| ۳۹۶ | ..... ضمیمه الف: کد متلب برای الگوریتم «تحلیل R/S»                              |
| ۳۹۹ | ..... ضمیمه ب: کد متلب الگوریتم «spectral estimator»                            |

## ۷ شبکه‌های صف ۴۰۱

|     |                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------|
| ۴۰۱ | ..... ۱-۷ «شبکه‌های صف» (Queueing Networks)                |
| ۴۰۳ | ..... ۲-۷ قضیه بورک (Burke): خروج متقاضیان از صف‌های M/M/* |
| ۴۰۶ | ..... ۱-۲-۷ قضیه بورک (Burke's Theorem)                    |
| ۴۱۰ | ..... ۳-۷ شبکه‌های باز جکسون                               |
| ۴۱۹ | ..... ۱-۳-۷ شاخص‌های آماری شبکه باز جکسون                  |
| ۴۲۰ | ..... ۲-۳-۷ برقراری معادلات تعادل محلی در شبکه جکسون       |

- ۴۲۵ ..... یک مثال مشهور از شبکه‌های باز جکسون ۳-۳-۷
- ۴۲۷ ..... شبکه‌های بسته صف‌ها (Closed Networks of Queues) ۴-۷
- ۴۳۰ ..... قضیه گوردون نیوول (Gordon-Newell theorem) ۱-۴-۷
- ۴۳۳ ..... محاسبه ثابت نرمالیزه کننده  $G_M(N)$  ۲-۴-۷
- ۴۳۸ ..... جمع‌بندی شبکه‌های باز و بسته و فرضیه کلین‌راک ۳-۴-۷
- ۴۳۹ ..... تمرین‌ها و پژوهش عملی ۵-۷
- ۴۴۴ ..... مهم‌ترین مراجع فصل

- ۴۴۵ ..... پیوست الف) واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
- ۴۵۳ ..... پیوست ب) واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
- ۴۶۱ ..... پیوست ج) نمایه