دانشکده مهندسی کامپیوتر

عنوان درس:

ارزیابی کارایی سیستم‌های کامپیوتری

Performance Evaluation of Computer Systems (PECS)

جلسه ۴: اصول عمومی شبیه‌سازی گسسته-رخداد و مثالی از آن

مدرس:

محمد عبداللهی ازگمی

(Mohammad Abdollahi Azgomi)

azgomi@iust.ac.ir

اصول عمومی و مثالهای DES

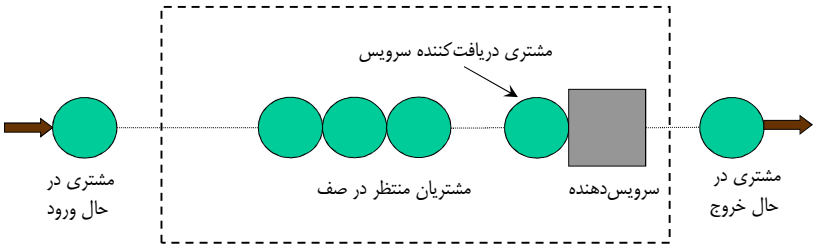
- شبیه‌سازی گسسته-رخداد (DES) چیست؟
  - مرکز سرویس تک سرویس‌دهنده‌ای
- مکانیسم جلوبردن زمان
  - جلوبردن زمان با افزایش ثابت
  - جلوبردن زمان با رخداد بعدی
- برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد
  - ساختمان داده‌های برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد
  - توابع اصلی برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد
  - ساختار برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد
  - مسیر اجرای برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد
- مشکلات برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد
- مثال: شبیه‌سازی دستی یک مرکز سرویس تک‌سرویس‌دهنده‌ای

شبیه‌سازی گسسته-رخداد (DES) چیست؟

- **مدل‌سازی یک سیستم به نحوی است که در طول زمان تکامل می‌یابد. برای این منظور متغیرهای حالت سیستم که به‌طور آنی (instantaneously) در نقاط زمانی مجزا تغییر می‌کنند نمایش داده می‌شوند.**
  - در این نقاط زمانی که حالتها در آنها تغییر می‌کنند ***رخدادها*** (events) اتفاق می‌افتند.
- **رخداد چیست؟** یک اتفاق آنی که حالت سیستم را تغییر می‌دهد. برای نمونه:
  - ورود یک مشتری (به یک سیستم صف) (customer arrival)
  - کامل شدن سرویس (service completion) (و خروج) مشتری
  - پایان شبیه‌سازی (که یک رخداد جعلی (fake event) است.)

مرکز سرویس تک سرویس‌دهنده‌ای

- برای تشریح مطالب درس از یک **مرکز سرویس تک-سرویس‌دهنده‌ای** (single-server service center) ساده استفاده می‌کنیم.
- چنین سیستمی در کاربردهای زیر مطرح است:
  - **فروشگاه:** دارای یک صندوق و مشتریانی هستند که خرید می‌کنند.
  - **فرودگاه:** دارای یک باند و هواپیماهایی هستند که از آن طریق پرواز می‌کنند.



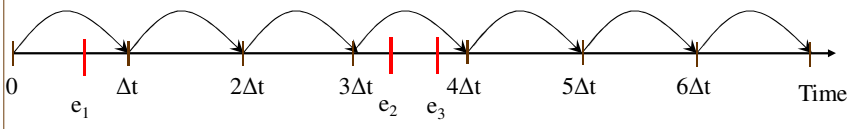
مرکز سرویس تک سرویس‌دهنده‌ای (ادامه)

- **معیارهای کارایی** (performance measures) مورد نظر در مورد این سیستم عبارتند از:
  - میانگین زمان انتظار مشتریان (average customer waiting time)
  - میانگین زمان صرف‌شده در سیستم (average customer time spent in system)
  - میانگین تعداد مشتریان منتظر (average number of waiting customers)
  - میانگین تعداد مشتریان در سیستم (average number of customers in system)
  - میانگین بهره‌وری سرویس‌دهنده (average server utilization)
- چگونه این سیستم را شبیه‌سازی نموده و معیارهای فوق را بدست بیاوریم؟
  - نخستین کاری که باید انجام دهیم، شبیه‌سازی **زمان** است...

مکانیسم جلوبردن زمان (Time Advance Mechanism)

- **ساعت شبیه‌سازی** (simulation clock): از یک متغیر استفاده می‌شود که مقدار فعلی زمان (شبیه‌سازی‌شده) را در مدل نگهداری می‌کند.
  - باید در مورد واحدهای زمان تصمیم‌گرفته شود.
  - عموماً رابطه‌ای بین زمان شبیه‌سازی شده و زمان واقعی مورد نیاز برای اجرای مدل بر روی کامپیوتر وجود ندارد.
- **دو رهیافت (approach) برای جلوبردن زمان وجود دارد:**
  - جلوبردن زمان با افزایش ثابت (fixed-increment time advance)
  - جلوبردن زمان با رخداد بعدی (next-event time advance)

جلوبردن زمان با افزایش ثابت



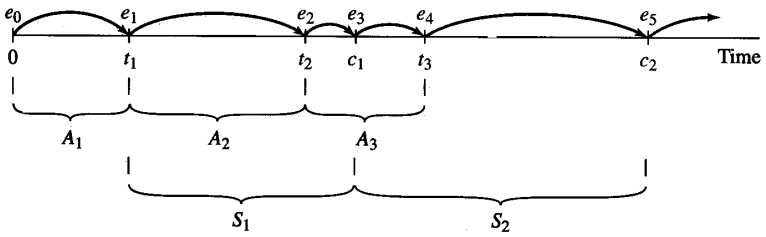
- رخدادها مابین افزایشهای زمانی ثابت (Δt) اتفاق می‌افتند.
  - در شکل فوق رخداد e_1 بین 0 و Δt اتفاق افتاده، بین Δt و $2\Delta t$ و همین طور بین $2\Delta t$ و $3\Delta t$ رخدادی اتفاق نیافتاده، اما بین $3\Delta t$ و $4\Delta t$ دو رخداد e_2 و e_3 اتفاق افتاده‌اند.
- رخدادهایی که بین فواصل افزایشی اتفاق می‌افتند باید به یک مرز افزایشی حرکت داده شوند.
  - e_1 به Δt، e_2 و e_3 به $4\Delta t$ و الی آخر.
- پیاده‌سازی این روش ساده است، اما دقت کافی را در مورد زمان وقوع رخدادها فراهم نمی‌کند.
  - زیرا e_2 و e_3 هر دو به $4\Delta t$ حرکت داده شده‌اند.

جلوبردن زمان با رخداد بعدی

- ساعت شبیه‌سازی را به صفر مقداردهی اولیه کن.
- زمانهای وقوع رخدادهای بعدی را تعیین کن:
  - حاصل **لیست رخداد** (event list) خواهد بود.
- ساعت به زمان **رخداد قریب‌الوقوع** (most imminent event)، جلو برده می‌شود و رخداد اجرا می‌شود:
  - با اجرای رخداد قریب الوقوع ممکن است که لیست رخدادها به‌هنگام شود.
- مراحل قبل تا برقراری قاعده توقف (stopping rule)، که باید به‌طور صریح بیان شده باشد، ادامه می‌یابد.
- در این روش ساعت از زمان یک رخداد به رخداد بعدی پرش می‌کند و دارای مقادیری مابین رخدادهای پی در پی، که دوره‌های عدم فعالیت است، نخواهد بود.

جلوبردن زمان با رخداد بعدی (ادامه)

- **مثال مرکز سرویس تک سرویس‌دهنده‌ای را در نظر بگیرید. در این سیستم:**
  - t_i: زمان ورود (arrival time) مشتری iام.
    - زمان شروع شبیه‌سازی زمان **صفر** است ($t_0 = 0$).
  - A_i: زمان بین ورود (interarrival time) مشتری i-1ام و مشتری iام. در نتیجه: $t_i = t_{i-1} + A_i$
  - S_i: زمان سرویس (service time) موردنیاز برای مشتری iام.
  - D_i: تاخیر (delay) یا زمان انتظار (waiting time) در صف مشتری iام.
  - $C_i = t_i + D_i + S_i$: زمان کامل شدن سرویس (service completion time) مشتری iام که



برنامه شبیه‌سازی گسسته–رخداد

- **برای نوشتن یک برنامه شبیه‌سازی گسسته–رخداد** (DES program)**، باید به نکات زیر توجه کنید:**
  - **رخدادهای سیستم را تعیین نموده و ببینید که با رخداد هر کدام از آنها چه اتفاقی در سیستم می‌افتد.**
  - **رخدادها را تولید نموده و یک لیست مرتب‌شده از رخدادها بر اساس زمان ایجاد کنید.**
    - **بر اساس این لیست مرتب‌شده رخدادها بر اساس زمان، رخدادها زمانبندی می‌شوند.**
  - **اطلاعات و آمارهای مورد نظر را در طی شبیه‌سازی و متناسب با نوع و زمان وقوع رخدادها جمع‌آوری نمایید.**
  - **سرانجام، گزارشهای مورد نظر را در پایان شبیه‌سازی با توجه به اطلاعات و آمارهای جمع‌آوری‌شده تهیه نمایید.**

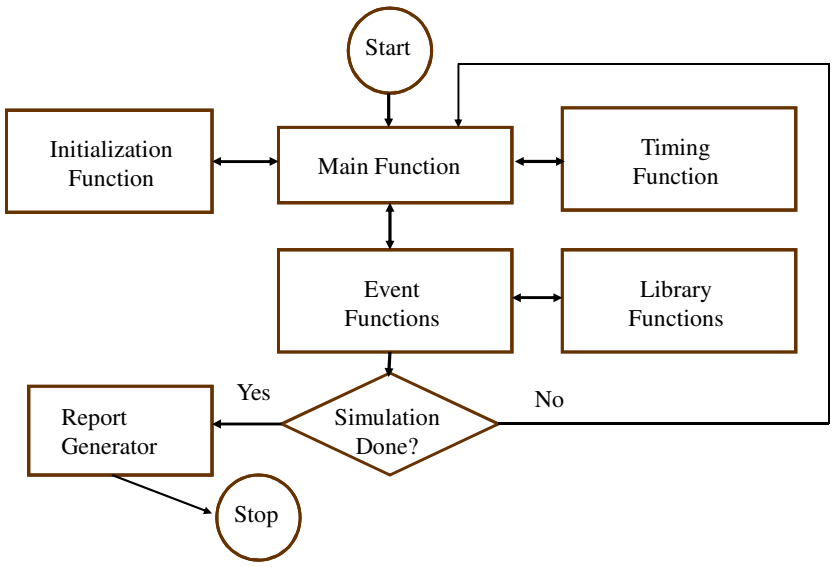
ساختمان داده‌های برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد

- **ساعت شبیه‌سازی** (simulation clock): مقدار فعلی زمان شبیه‌سازی‌شده است.
- **حالت سیستم** (system state): متغیرهایی هستند که حالت سیستم را توصیف می‌کنند. نظیر:
  - وضعیت سرویس‌دهنده، تعداد مشتریان منتظر در صف، زمانهای ورود، و غیره.
- **لیست رخدادها** (events list): زمانهای وقوع رخدادهای بعدی.
- **شمارنده‌های آماری** (statistical counters): از این شمارنده‌ها برای محاسبه معیارهای کارایی، نظیر زمان انتظار در صف، میزان بهره‌وری (server utilization) و غیره استفاده خواهیم نمود.

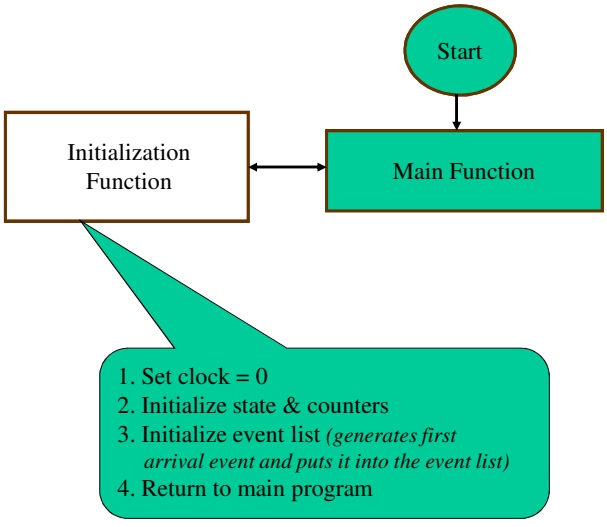
توابع برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد

- **تابع مقداردهی اولیه** (initialization function):
  - مقداردهی اولیه برنامه شبیه‌سازی را انجام داده و از جمله کارهایی که انجام می‌دهد این است که ساعت شبیه‌سازی را به صفر مقدار دهی اولیه می‌کند.
- **تابع زمانی** (timing function):
  - زمان و نوع رخداد بعدی را تعیین می‌کند.
  - ساعت شبیه‌سازی را جلو می‌برد.
- **توابع رخداد** (event functions):
  - منطق عملیاتی و کارهایی که به ازاء هر نوع رخداد باید انجام شود در توابع مجزایی انجام می‌شود.
- **توابع کتابخانه‌ای** (library functions):
  - توابع سودمند (utility functions) برای تولید متغیرهای تصادفی و غیره هستند.
- **مولد گزارش** (report generator)
- **برنامه اصلی** (main program):
  - توابع فوق را به هم مرتبط نموده و آنها را در یک ترتیب مناسب اجرا می‌کند.

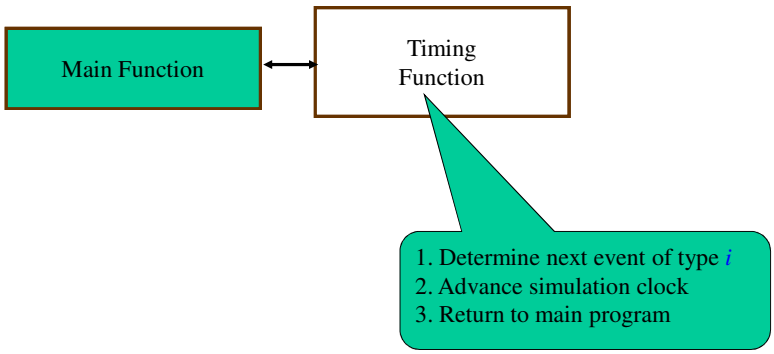
ساختار برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد



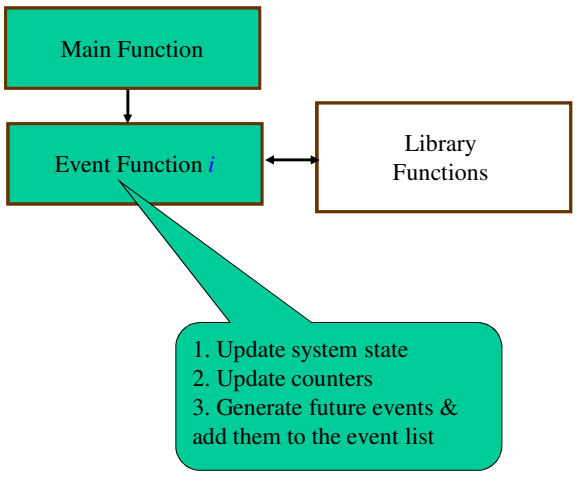
مسیر اجرای برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد



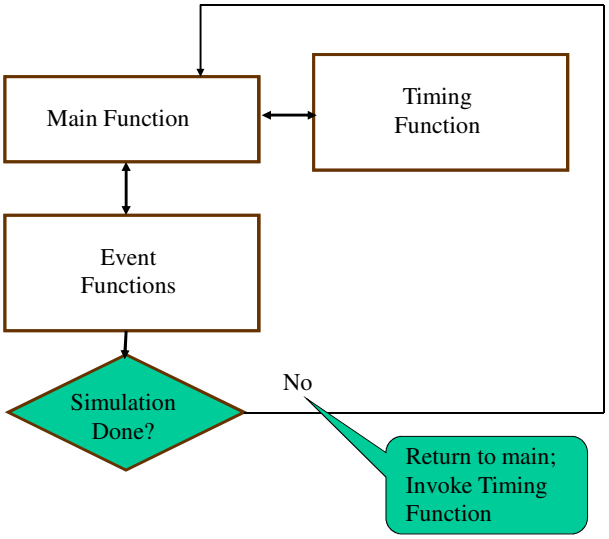
مسیر اجرای برنامه شبیه‌سازی گسسته–رخداد (ادامه)



مسیر اجرای برنامه شبیه‌سازی گسسته–رخداد (ادامه)



مسیر اجرای برنامه شبیه‌سازی گسسته-رخداد (ادامه)



مشکلات برنامه‌سازی گسسته-رخداد

- **قواعد خاتمه برنامه شبیه‌سازی:** اینکه برنامه شبیه‌سازی کی خاتمه یابد:
  - با شمارش رخدادها یا انواع خاصی از آن؟
  - با توجه به مدت زمان مورد نظر؟ مثلاً چند ساعت یا چند روز.
- **نحوه انتخاب رخدادهای همزمان برای اجرا:**
  - رخدادهای خروج سیستم قبل از رخدادهای ورود اجرا شوند.
  - اگر دو رخداد ورود یا خروج همزمان داریم یکی از آنها به‌طور تصادفی انتخاب شده یا قاعده مناسب دیگری تعریف شود.
- **انتخاب ساختمان داده مناسب برای لیست رخداد:**
  - با توجه به رجوع پیاپی به این لیست لازم است که ساختمان داده مناسبی برای آن انتخاب و پیاده‌سازی شود تا برنامه شبیه‌سازی سریع اجرا شود.

مثال: شبیه‌سازی دستی یک مرکز سرویس تک‌سرویس‌دهنده‌ای

- **زمانهای بین ورود** (همه زمانها بر حسب دقیقه هستند):
  - 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …
- **زمانهای سرویس:**
  - 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …
- **قاعده خاتمه شبیه‌سازی:**
  - وقتی سرویس به ششمین (n=6) مشتری شروع شود، شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد.
- **شبیه‌سازی دستی (manual simulation) یعنی:**
  - متغیرهای حالت سیستم، ساعت، لیست رخداد، شمارنده‌های آماری و غیره پس از اجرای هر رخداد به‌طور جداگانه نشان داده شود.
    - به هر ارائه سیستم به صورت فوق یک **عکس فوری** (snapshot) گفته می‌شود.
  - از لیستهای زمانهای بین ورود و سرویس فوق برای انجام شبیه‌سازی استفاده کنید.
  - وقتی که سرویس به ششمین مشتری شروع شد شبیه‌سازی را متوقف نموده و معیارهای کارایی را محاسبه نمایید.

معیارهای کارایی مورد نظر

- **میانگین زمان انتظار در صف برای n مشتری:**

$$W_Q = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} D_i$$

- **میانگین زمان صرف شده در سیستم برای n مشتری:**

$$W = W_Q + E[S]$$

  - E[S] میانگین زمان سرویس مشتریان توسط سرویس‌دهنده است.
- **میانگین تعداد مشتریان در صف:**

$$L_Q = \frac{1}{T(n)}\int_0^{T(n)} Q(t)$$

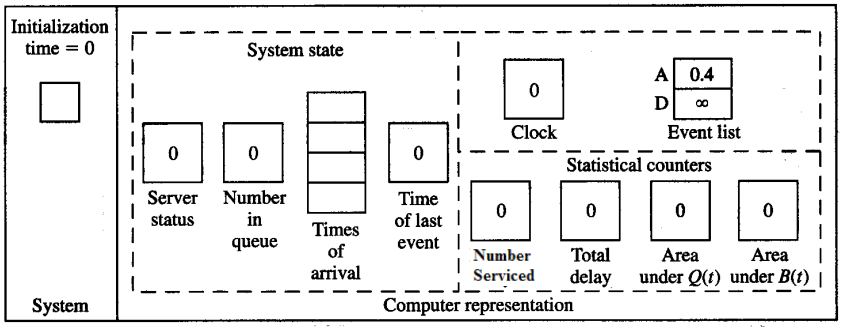
  - T(n) کل مدت مشاهده سیستم یا مدت زمان شبیه‌سازی است.
  - Q(t) منحنی تغییرات مشتریان منتظر است.
  - میانگین زمانی سطح زیر منحنی Q(t) میانگین تعداد مشتریان در صف را مشخص می‌کند.
- **بهره‌وری (utilization) سرویس‌دهنده:** کسری از زمان که سرویس‌دهنده مشغول است:

$$\rho = \frac{1}{T(n)}\int_0^{T(n)} B(t)$$

  - B(t) منحنی نشان‌دهنده مشغول بودن سرویس‌دهنده است.
  - میانگین زمانی سطح زیر منحنی B(t) بهره‌وری سرویس‌دهنده را مشخص می‌کند.
- **میانگین تعداد مشتریان در سیستم:**

$$L = L_Q + \rho$$

عکس فوری شماره ۱

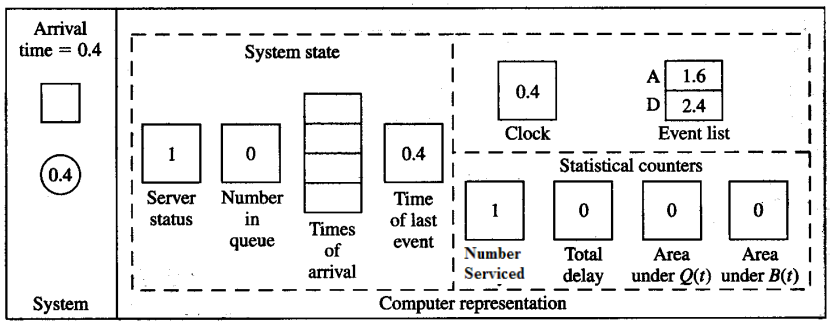


زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

* شکل فوق وضعیت ابتدایی سیستم است که اولین رخداد ورود تولید شده و در Event List قرار داده شده است.
این لیست شامل یک رخداد ورود (نوع A) با زمان 0.4 و یک رخداد dummy خروج (نوع D) با زمان بی‌نهایت است.
این رخداد dummyبا اضافه شدن یک رخداد خروج واقعی از لیست حذف خواهد شد.

عکس فوری شماره ۲

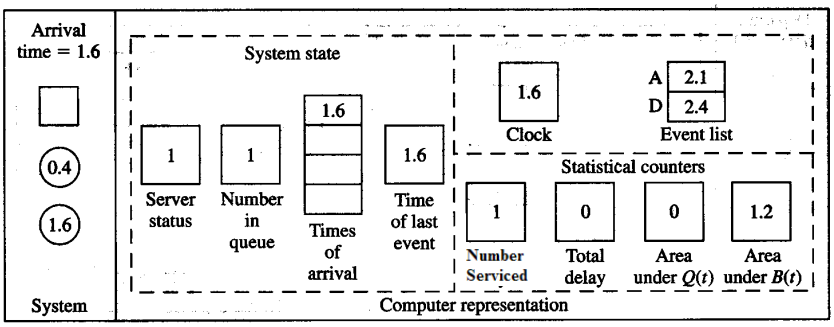


زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

•در شکل فوق تا این زمان تنها یک مشتری است که سرویس به او شروع شده و جزء آنهایی است که در نهایت در محاسبه قاعده خاتمه محسوب خواهند شد. لذا: Number = 1
•تا این لحظه همین یک مشتری در صف منتظر نبوده است. لذا: TotalDelay = 0

عکس فوری شماره ۳

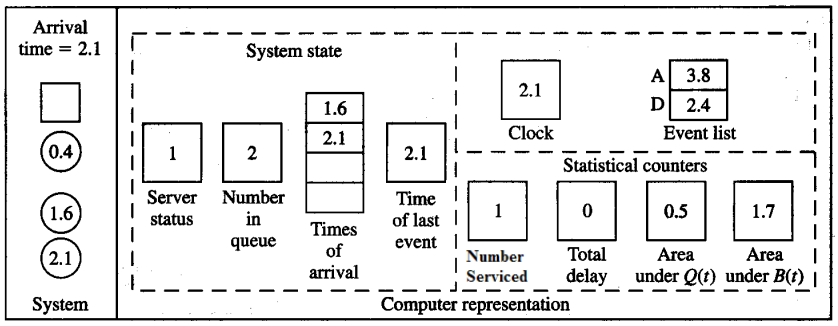


زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

•در شکل فوق تا این زمان سرویس‌دهنده 1.6-0.4 = 1.2 مشغول بوده است. لذا: Area under B(t) = 1.2

عکس فوری شماره ۴

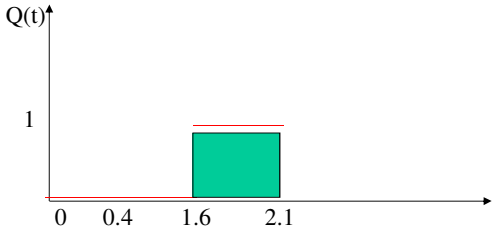


زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

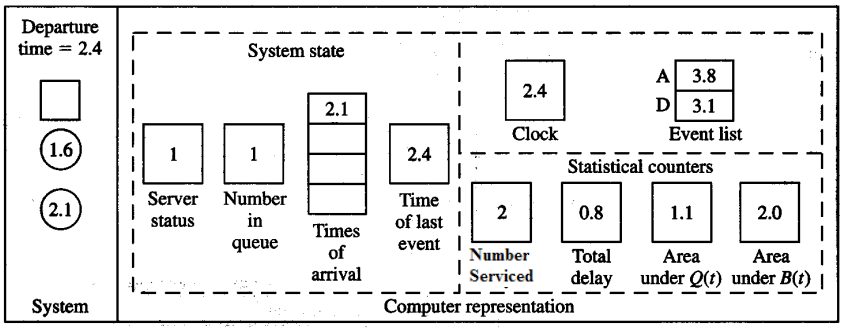
عکس فوری شماره ۴ (ادامه)

- برای محاسبه محاسبه مساحت زیر منحنی Q(t) تا این زمان داریم:
-



- Area under Q(t) = 1 * (2.1-1.6) = 0.5

عکس فوری شماره ۵



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

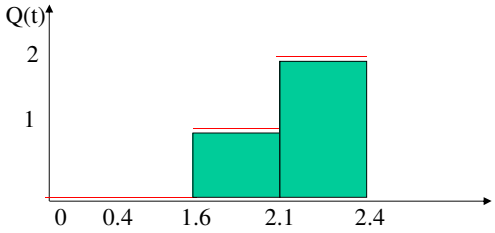
زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

•در شکل فوق تا این زمان سرویس به مشتری دوم شروع شده و جزء آنهایی است که در نهایت در محاسبه قاعده خاتمه محسوب خواهند شد. لذا: Number = 2

•تا این لحظه همین مشتری 0.8 در صف منتظر بوده است. لذا: TotalDelay = 0.8

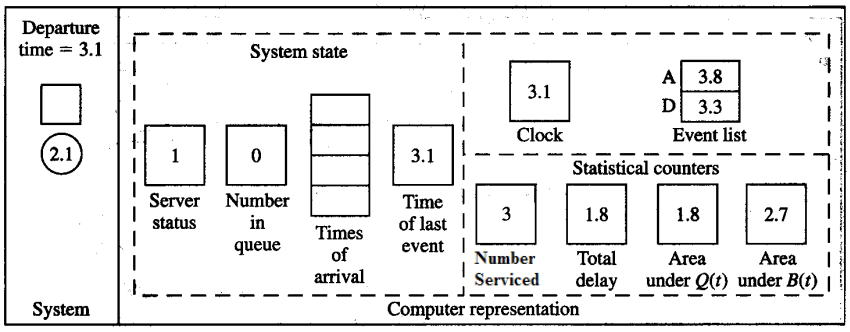
عکس فوری شماره ۵ (ادامه)

- برای محاسبه محاسبه مساحت زیر منحنی Q(t) تا این زمان داریم:
-



- Area under Q(t) = 1 * (2.1-1.6) + 2 * (2.4-2.1) = 0.5 + 0.6 = 1.1

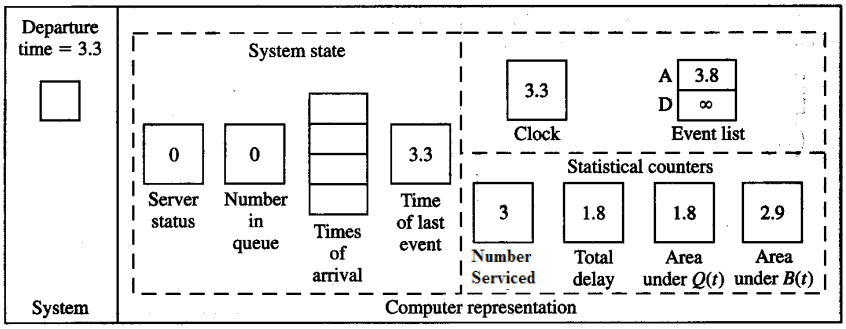
عکس فوری شماره ۶



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس :2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

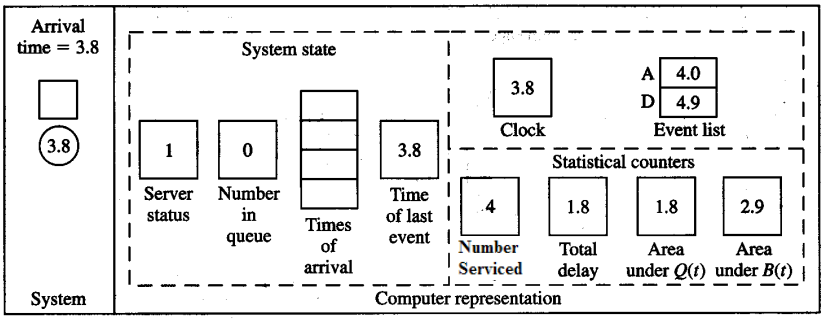
عکس فوری شماره ۷



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

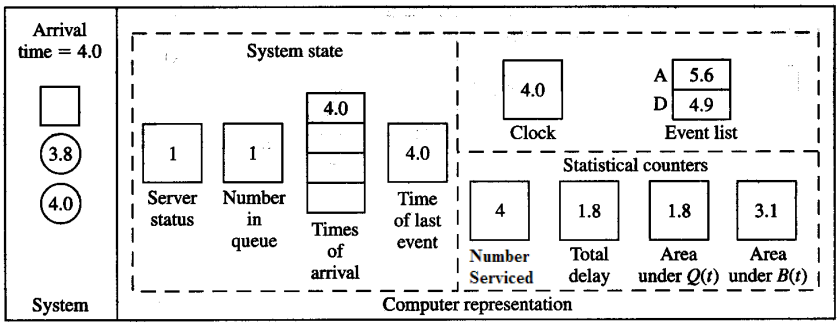
عکس فوری شماره ۸



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

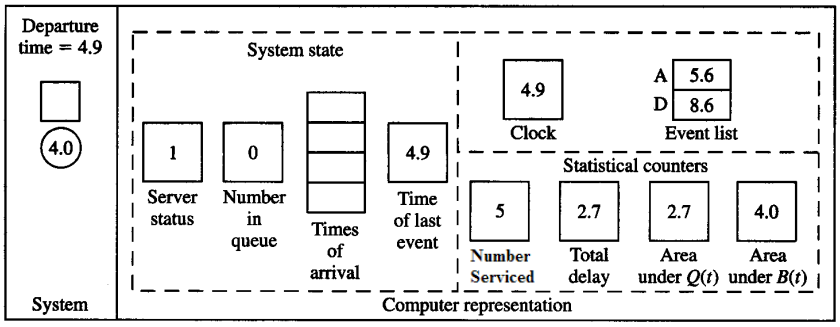
عکس فوری شماره ۹



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

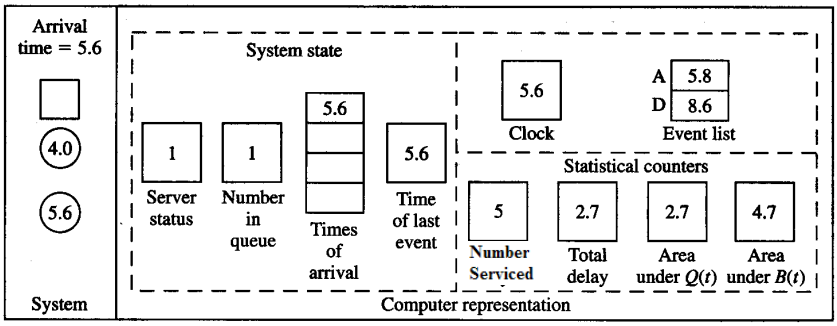
عکس فوری شماره ۱۰



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

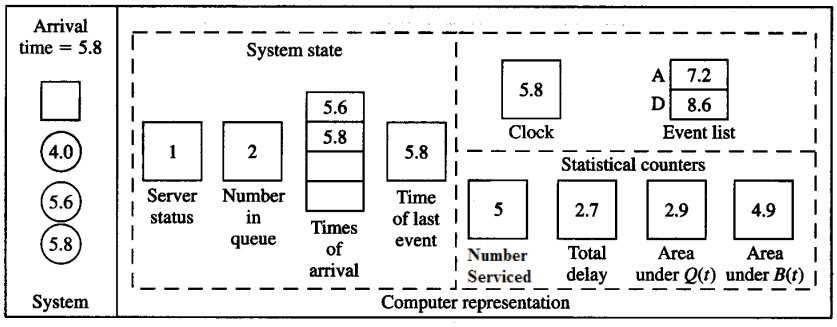
عکس فوری شماره ۱۱



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

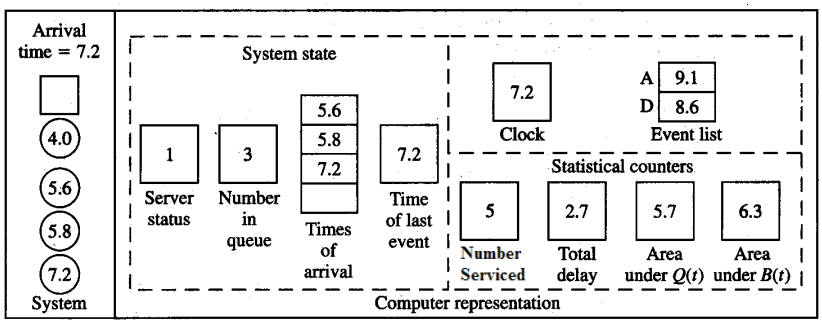
عکس فوری شماره ۱۲



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

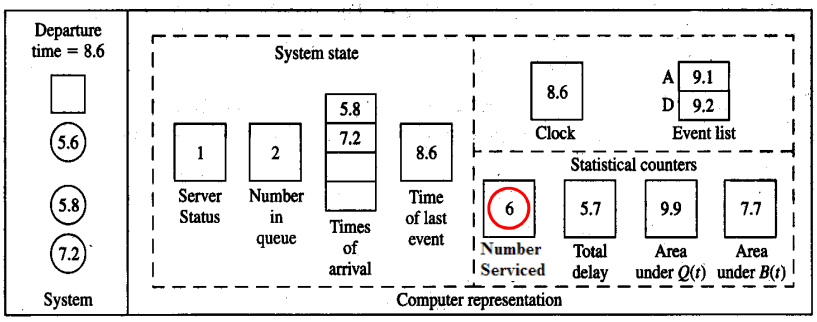
عکس فوری شماره ۱۳



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

عکس فوری شماره ۱۴



زمانهای بین ورود : 0.4, 1.2, 0.5, 1.7, 0.2, 1.6, 0.2, 1.4, 1.9, …

زمانهای سرویس: 2.0, 0.7, 0.2, 1.1, 3.7, 0.6, …

• در این زمان سرویس به ششمین مشتری شروع می‌شود که همان شرط خاتمه شبیه‌سازی است. بنا بر این شبیه‌سازی را خاتمه می‌دهیم.

محاسبه معیارهای کاریی

- **با توجه به مقادیر نشان داده شده در عکس شماره ۱۴ خواهیم داشت:**
  - $W_Q = 5.7/6 = 0.95$ min./customers
  - $L_Q = 9.9/8.6 = 1.15$ customers
  - $\rho = 7.7/8.6 = 0.90$ (dimensionless)
  - $L = L_Q + \rho = 1.15 + 0.90 = 2.05$ customers
- **همچنین با توجه به زمانهای سرویس مشتریان می‌توانیم E[S] را محاسبه کنیم:**
  - $E[S] = (2.0+0.7+0.2+1.1+3.7+0.6)/6 = 8.3/6 = 1.38$ min.
  - **نکته:** در اینجا علی رغم خاتمه شبیه‌سازی با شروع سرویس به ششمین مشتری زمان سرویس هر شش مشتری را در نظر گرفته‌ایم.
- **آنگاه می‌توانیم W را هم محاسبه کنیم:**
  - $W = W_Q + E[S] = 0.95 + 1.38 = 2.33$ min.