



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی صنایع

پروژه درس اصول شبیه سازی

نگارندگان:

محمد آرمان مقصودی و علی نصر اصفهانی

استاد درس:

سرکار خانم دکتر نفیسه صدقی

دستیاران آموزشی:

جناب آقای عرفان امانی بنی و جناب آقای مهدی رحمانی طلب

پاییز ۱۴۰۳

بسم خدا

فهرست

- ۱ توصیف سیستم ۱
- ۱.۱ توصیف ایستا سیستم ۱
- ۱.۱.۱ متغیرهای حالت ۱
- ۱.۱.۲ پیشامدها ۲
- ۱.۱.۳ موجودیت ۲
- ۱.۱.۴ اعلان پیشامدها ۳
- ۱.۱.۵ تاخیرها ۳
- ۱.۱.۶ فعالیتها ۳
- ۱.۱.۷ آماره‌های تجمعی ۴
- ۲ توصیف پویا سیستم ۷
- ۲.۱ پیشامد ورود بیمار به بیمارستان ۷
- ۲.۲.۱ پیشامد ورود بیمار به آزمایشگاه ۸
- ۲.۲.۲ پیشامد اتمام آزمایش ۹
- ۲.۲.۴ پیشامد ورود به اتاق عمل ۱۰
- ۲.۲.۵ پیشامد اتمام عمل ۱۱
- ۲.۲.۶ پیشامد خروج از بخش‌های مراقبت‌های ویژه ۱۲
- ۲.۲.۷ پیشامد وخیم شدن وضعیت یک بیمار ۱۳
- ۲.۲.۸ پیشامد مرخص شدن از بیمارستان ۱۴
- ۲ معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم ۱۵
- ۲.۱ معیارهای پیشنهادی ۱۵
- ۲.۲ معیارهای مورد نظر مدیریت بیمارستان ۱۶
- ۳ توزیع‌های زمان عمل بیماران ۱۹
- ۳.۱ توزیع زمان عمل ساده ۱۹

۲۱	۲.۳ توزیع زمان عمل متوسط
۲۳	۳.۳ توزیع زمان عمل پیچیده
۲۴	۴ پیاده سازی
۲۵	۵ صحت سنجی و اعتبارسنجی
۲۵	۱.۵ ردیابی
۲۶	۲.۵ تحلیل حساسیت
۲۷	۶ نتایج عددی شبیه سازی

۱ توصیف سیستم

۱.۱ توصیف ایستا سیستم

۱.۱.۱ متغیرهای حالت

تعداد تخت مشغول در بخش پیش از عمل در زمان t	$PSB(t)$
تعداد تخت مشغول در اورژانس در زمان t	$EB(t)$
صف بخش پیش از عمل در زمان t	$NQ(t)$
صف اورژانس در زمان t	$EQ(t)$
صف بیماران عادی برای آزمایشگاه در زمان t	$LNQ(t)$
صف بیماران ضروری برای آزمایشگاه در زمان t	$LEQ(t)$
تعداد تخت مشغول در آزمایشگاه در زمان t	$LB(t)$
تعداد بیماران عادی در صف جراحی در زمان t	$NSQ(t)$
تعداد بیماران ضروری در صف جراحی در زمان t	$ESQ(t)$
تعداد تخت مشغول در اتاق عمل در زمان t	$SB(t)$
تعداد تخت مشغول در بخش عمومی در زمان t	$WB(t)$
تعداد تخت مشغول در بخش مراقبت‌های ویژه در زمان t	$ICUB(t)$
تعداد تخت مشغول در بخش مراقبت‌های قلبی در زمان t	$CCUB(t)$
صف بخش عمومی در زمان t	$WQ(t)$
صف بخش مراقبت‌های ویژه در زمان t	$ICUQ(t)$

۱.۱.۲ پیشامدها

A	پیشامد ورود بیمار به بیمارستان
AL	پیشامد ورود بیمار به آزمایشگاه
DL	پیشامد اتمام آزمایش
AS	پیشامد ورود به اتاق عمل
DS	پیشامد اتمام عمل
DCU	پیشامد خروج از بخش‌های مراقبت‌های ویژه
PSW	پیشامد وخیم شدن وضعیت یک بیمار
DW	پیشامد مرخص شدن از بیمارستان
ES	پیشامد پایان شبیه‌سازی

۱.۱.۳ موجودیت

بیمار شماره r با ویژگی‌های i, j, k (P_{ijk}^r)

ویژگی‌ها:

۱. نوع مراجعه ($i \in \{1: \text{عادی}, 2: \text{اورژانسی}\}$)
۲. نوع جراحی ($j \in \{1: \text{ساده}, 2: \text{متوسط}, 3: \text{پیچیده}\}$)
۳. نوع کلیت جراحی ($k \in \{1: \text{غیرقلبی}, 2: \text{قلبی}\}$)

۱. ۱. ۴ اعلان پیشامدها

(A, t, P_{ijk}^r)

(AL, t, P_{ijk}^r)

(DL, t, P_{ijk}^r)

(AS, t, P_{ijk}^r)

(DS, t, P_{ijk}^r)

(DCU, t, P_{ijk}^r)

(PSW, t, P_{ijk}^r)

(DW, t, P_{ijk}^r)

$(ES, 720^h)$ برای سادگی در ابتدا فرض شده است که می‌خواهیم ۱ ماه شبیه‌سازی انجام دهیم.

در شروع شبیه‌سازی ($t=0$)، پیشامدهای A و ES وارد FEL می‌شوند.

۱. ۱. ۵ تاخیرها

انتظار بیمار در هر صف (صف بخش بستری، اورژانس، آزمایشگاه، اتاق عمل، بخش عمومی، ICU و CCU).

۱. ۱. ۶ فعالیت‌ها

۱) زمان کارهای اداری پس از بستری شدن برای بیماران عادی (S_1^*) – مقدار آن ثابت و برابر با ۶۰ دقیقه است.

۲) زمان کارهای اداری پس از بستری شدن برای بیماران ضروری (S_2^*) – مقدار آن ثابت و برابر با ۱۰ دقیقه است.

۳) مدت زمان انجام آزمایش (S_3^*)

۴) زمان بستری پس از آزمایش برای بیماران عادی (S_4^*) – مقدار آن ثابت و برابر با ۲ روز است.

۵) زمان بستری پس از آزمایش برای بیماران ضروری (S_5^*)

- ۶) مدت زمان جراحی نوع ساده (S_6^*)
- ۷) مدت زمان جراحی نوع متوسط (S_7^*)
- ۸) مدت زمان جراحی نوع پیچیده (S_8^*)
- ۹) مدت زمان بستری در بخش‌های مراقبت‌های ویژه (S_9^*)
- ۱۰) مدت زمان بستری در بخش عمومی (S_{10}^*)

۱.۱.۷ آماره‌های تجمعی

در برنامه نوشته شده، متغیری با نام `data['Cumulative Stats']` به‌صورت دیکشنری تعریف شده است و عناوین زیر در واقع کلیدهای این دیکشنری هستند.

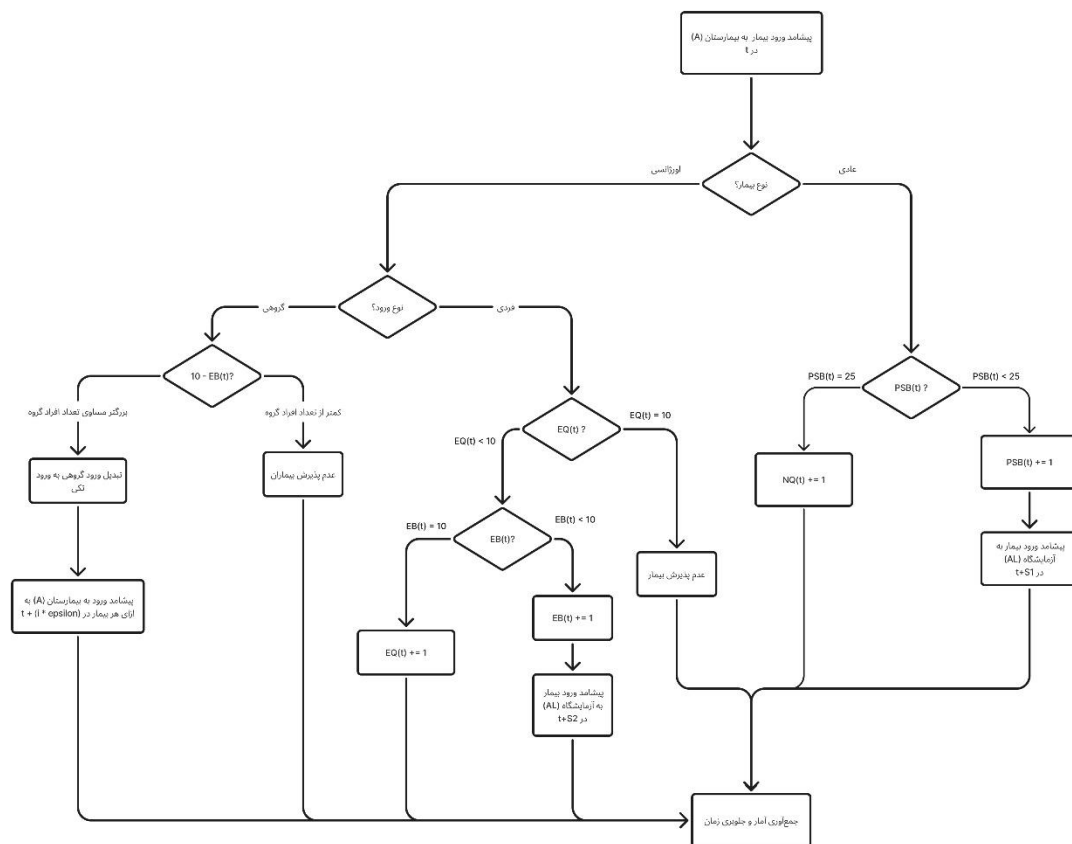
- `['Total Patients']`: تعداد کل بیماران وارد شده
- `['Emergency Patients']`: تعداد بیماران اورژانسی وارد شده
- `['System Waiting Time']`: مجموع مدت زمان ماندن در سیستم (بیمارستان) کل بیماران
- `['Full Emergency Queue Duration']`: مدت زمان پر بودن صف اورژانس
- `['Area Under Emergency Queue Length Curve']`: مساحت زیر نمودار طول صف اورژانس بر حسب زمان
- `['Area Under Preoperative Queue Length Curve']`: مساحت زیر نمودار طول صف بستری پیش از عمل بر حسب زمان
- `['Area Under Laboratory Normal Queue Length Curve']`: مساحت زیر نمودار طول صف عادی آزمایشگاه بر حسب زمان
- `['Area Under Laboratory Urgent Queue Length Curve']`: مساحت زیر نمودار طول صف اورژانسی آزمایشگاه بر حسب زمان
- `['Area Under Operation Normal Queue Length Curve']`: مساحت زیر نمودار طول صف عادی اتاق‌های عمل بر حسب زمان

- ['Area Under Operation Urgent Queue Length Curve']: مساحت زیر نمودار طول صف اورژانسی اتاق‌های عمل برحسب زمان
- ['Area Under General Ward Queue Length Curve']: مساحت زیر نمودار طول صف بخش عمومی برحسب زمان
- ['Area Under ICU Queue Length Curve']: مساحت زیر نمودار طول صف ICU برحسب زمان
- ['Area Under CCU Queue Length Curve']: مساحت زیر نمودار طول صف CCU برحسب زمان
- ['Emergency Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف اورژانس
- ['Preoperative Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف بخش بستری پیش از عمل
- ['Laboratory Normal Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف عادی آزمایشگاه
- ['Laboratory Urgent Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف اورژانسی آزمایشگاه
- ['Operation Normal Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف عادی اتاق‌های عمل
- ['Operation Urgent Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف اورژانسی اتاق‌های عمل
- ['General Ward Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف بخش عمومی
- ['ICU Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف ICU
- ['CCU Queue Waiting Time']: مجموع مدت زمان انتظار بیماران در صف CCU
- ['Emergency Service Starters']: تعداد بیماران شروع به خدمت‌دهی شده در اورژانس
- ['Preoperative Service Starters']: تعداد بیماران شروع به خدمت‌دهی شده در بخش بستری پیش از عمل
- ['Laboratory Normal Service Starters']: تعداد بیماران عادی شروع به خدمت‌دهی شده در آزمایشگاه

- ['Laboratory Urgent Service Starters']: تعداد بیماران اورژانسی شروع به خدمت‌دهی شده در آزمایشگاه
- ['Operation Normal Service Starters']: تعداد بیماران عادی شروع به خدمت‌دهی شده در اتاق‌های عمل
- ['Operation Urgent Service Starters']: تعداد بیماران اورژانسی شروع به خدمت‌دهی شده در اتاق‌های عمل
- ['General Ward Service Starters']: تعداد بیماران شروع به خدمت‌دهی شده در بخش عمومی
- ['ICU Service Starters']: تعداد بیماران شروع به خدمت‌دهی شده در ICU
- ['CCU Service Starters']: تعداد بیماران شروع به خدمت‌دهی شده در CCU
- ['Emergency Server Busy Time']: مدت زمان مشغول بودن تخت‌ها در اورژانس
- ['Preoperative Server Busy Time']: مدت زمان مشغول بودن تخت‌ها در بخش بستری پیش از عمل
- ['Laboratory Server Busy Time']: مدت زمان مشغول بودن تخت‌ها در آزمایشگاه
- ['Operation Server Busy Time']: مدت زمان مشغول بودن تخت‌ها در اتاق‌های عمل
- ['General Ward Server Busy Time']: مدت زمان مشغول بودن تخت‌ها در بخش عمومی
- ['ICU Server Busy Time']: مدت زمان مشغول بودن تخت‌ها در ICU
- ['CCU Server Busy Time']: مدت زمان مشغول بودن تخت‌ها در CCU
- ['Number of Repeated Operations For Patients With Complex Operation']: تعداد تکرار شدن عمل‌های جراحی پیچیده
- ['Number of Immediately Admitted Emergency Patients']: تعداد بیماران اورژانسی بلافاصله پذیرفته شده
- ['Patients With Complex Surgery']: تعداد بیماران با عمل جراحی پیچیده

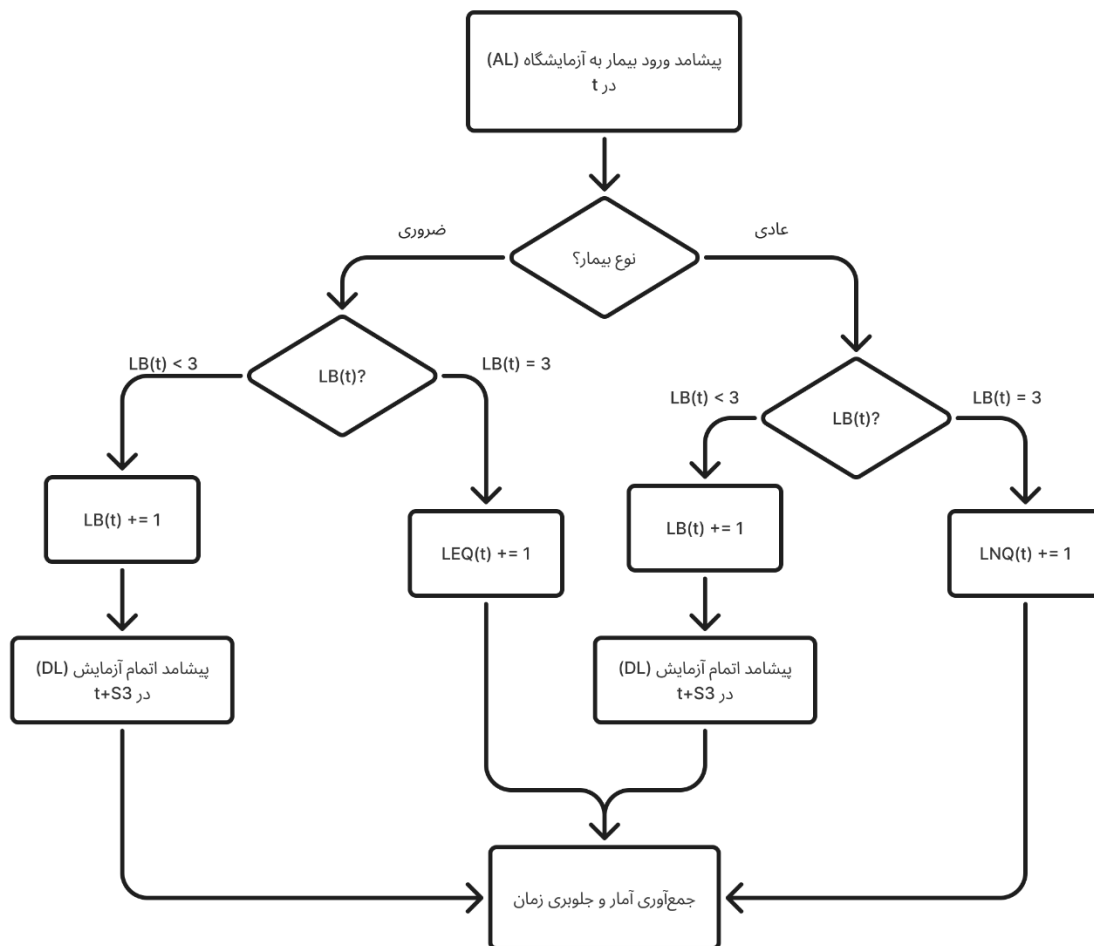
۲.۱ توصیف پویا سیستم

۱.۲.۱ پیشامد ورود بیمار به بیمارستان

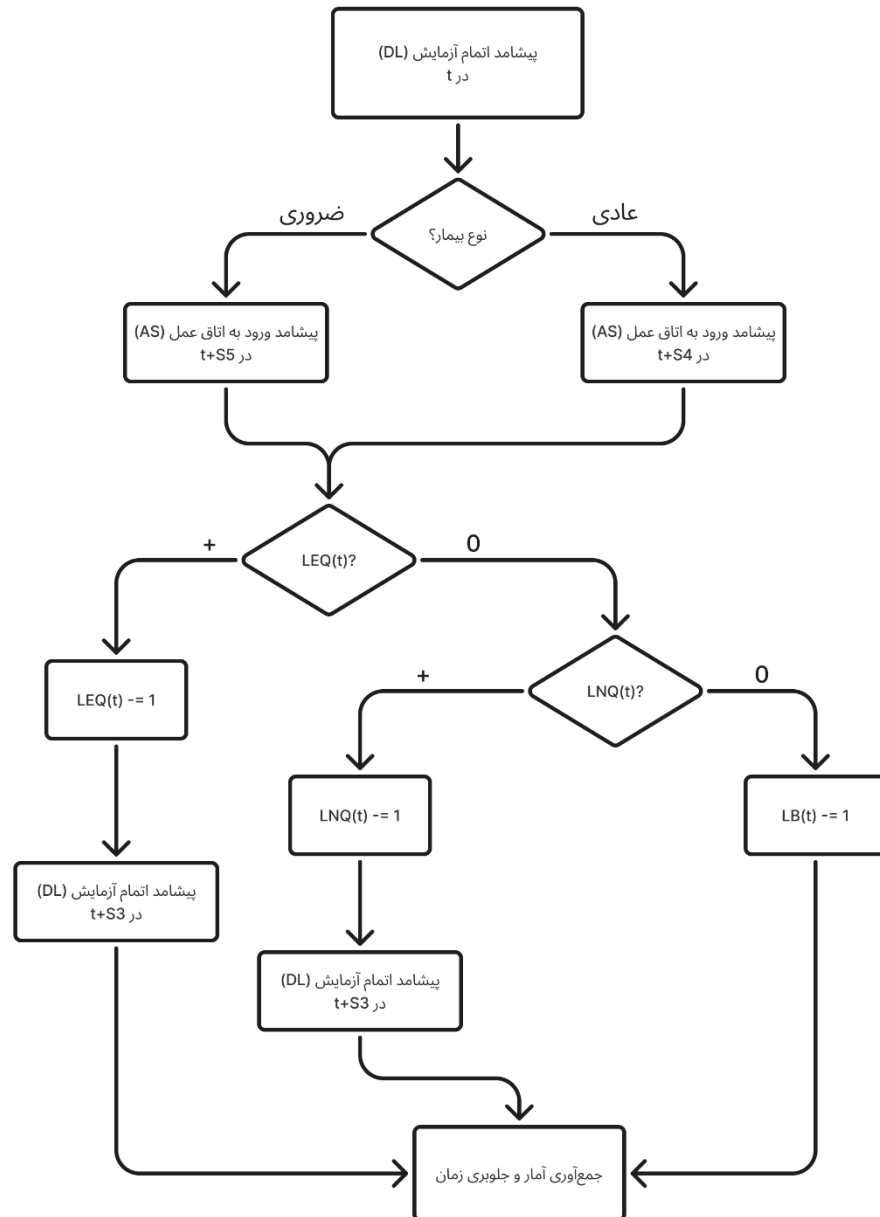


- برای ورود گروهی فرض می‌شود که بیماران تنها در صورتی پذیرش می‌شوند که به تعداد آن‌ها تخت خالی در بخش اورژانس وجود داشته باشد؛ درواقع اگر حتی برای یک نفر از آن‌ها تخت نباشد، هیچ‌کدام پذیرش نخواهند شد.

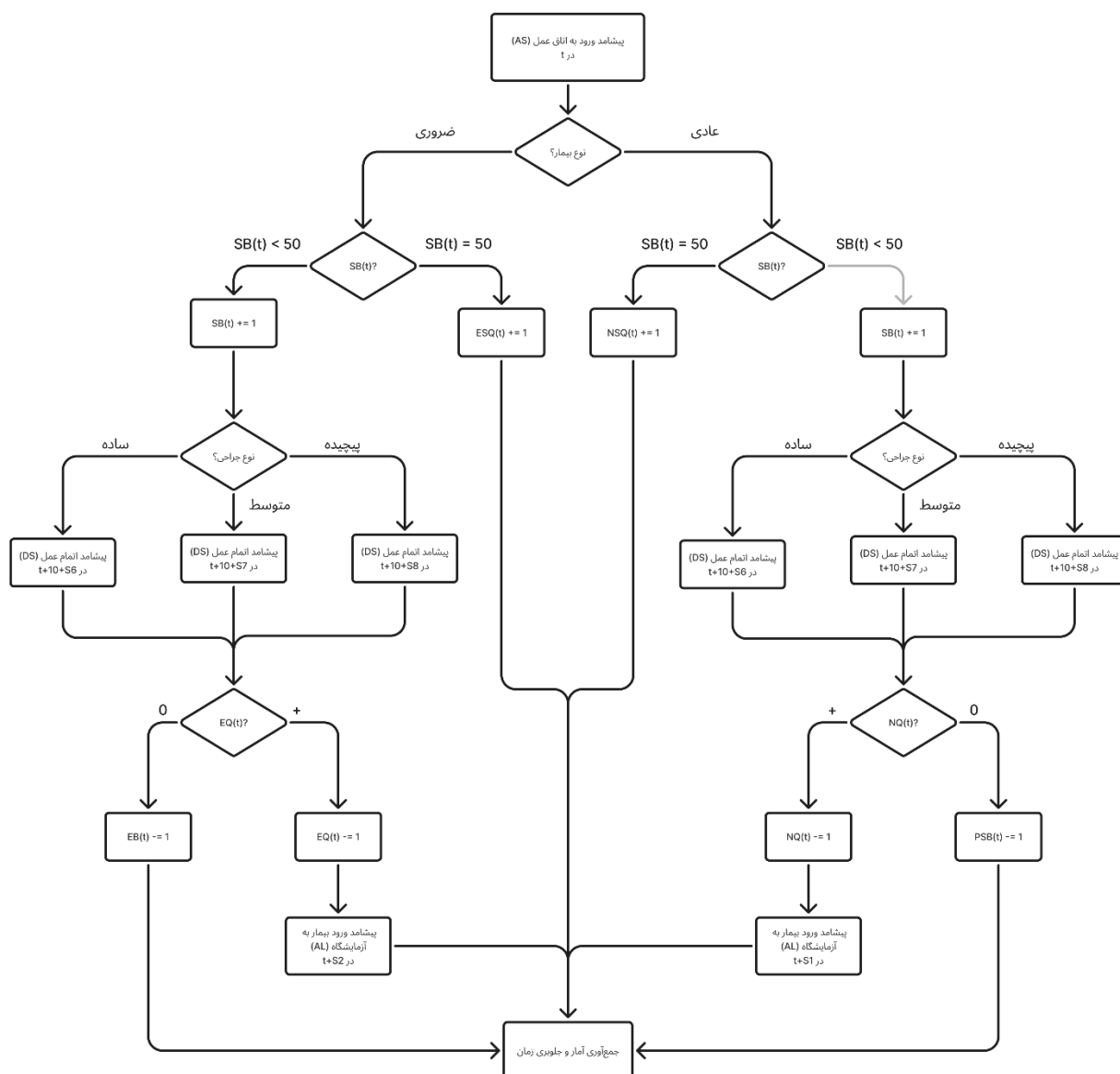
۲.۲.۱ پیشامد ورود بیمار به آزمایشگاه



۳.۲.۱. پیشامد اتمام آزمایش

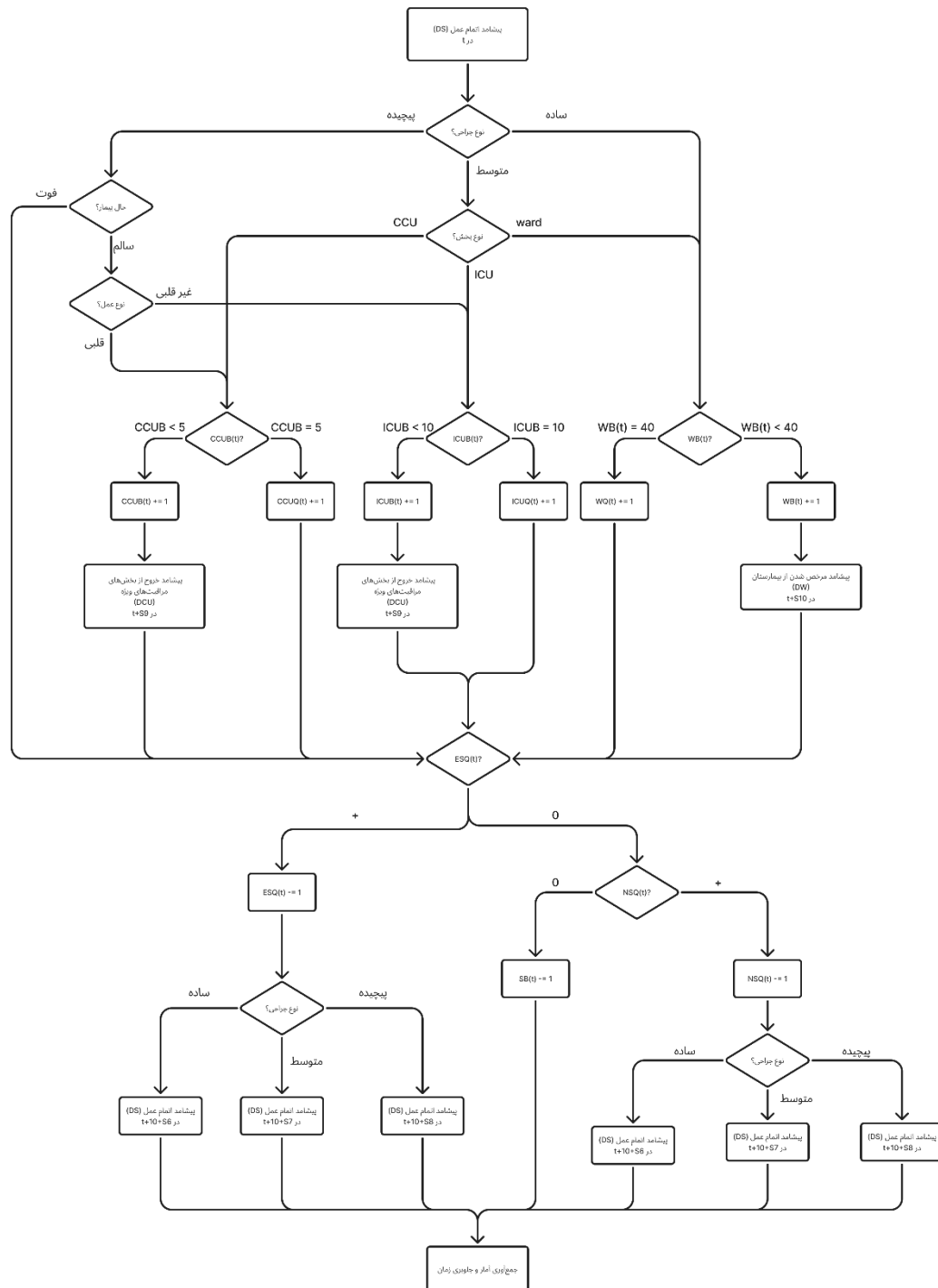


۱.۲.۴ پیشامد ورود به اتاق عمل

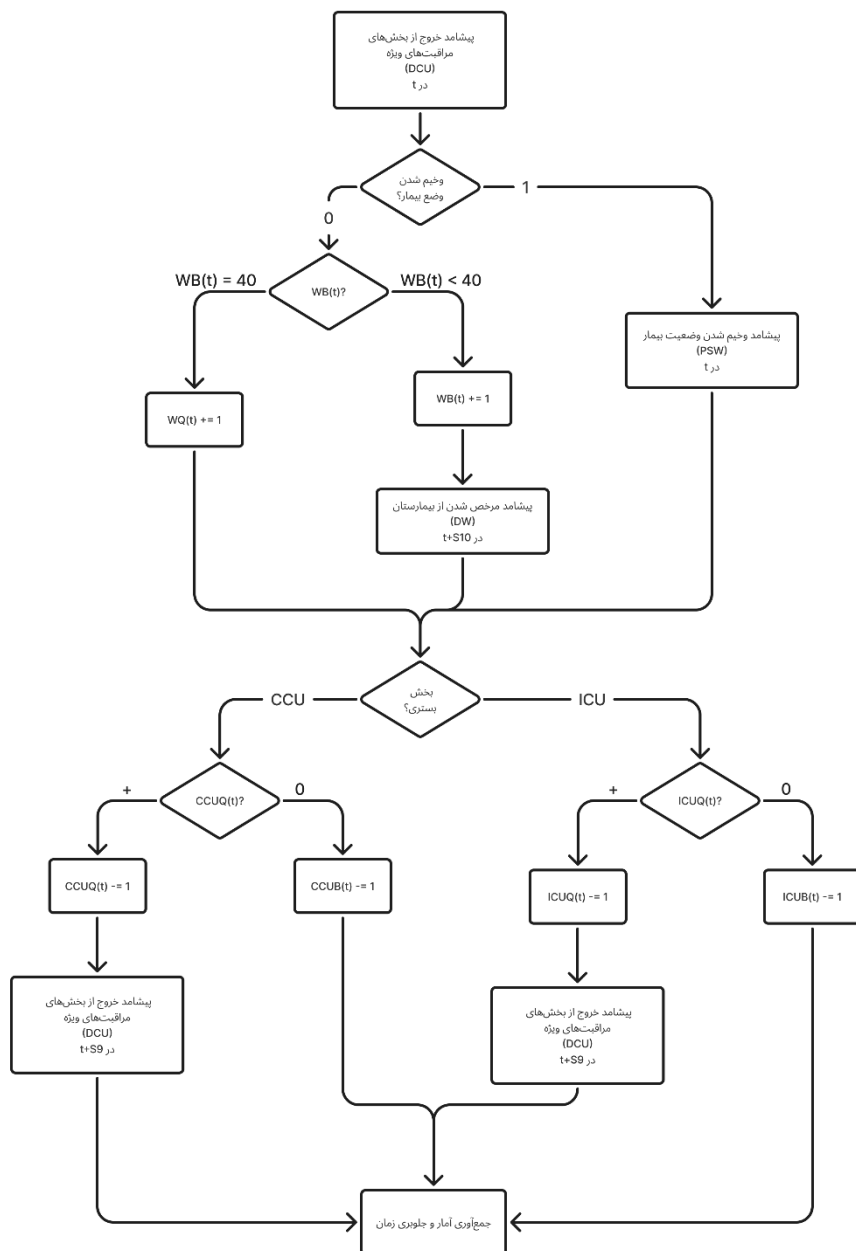


- زمانی که یک بیمار از صف اتاق عمل به تختی از اتاق عمل که به تازگی خالی شده است اختصاص می‌یابد، ۱۰ دقیقه زمان آماده‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

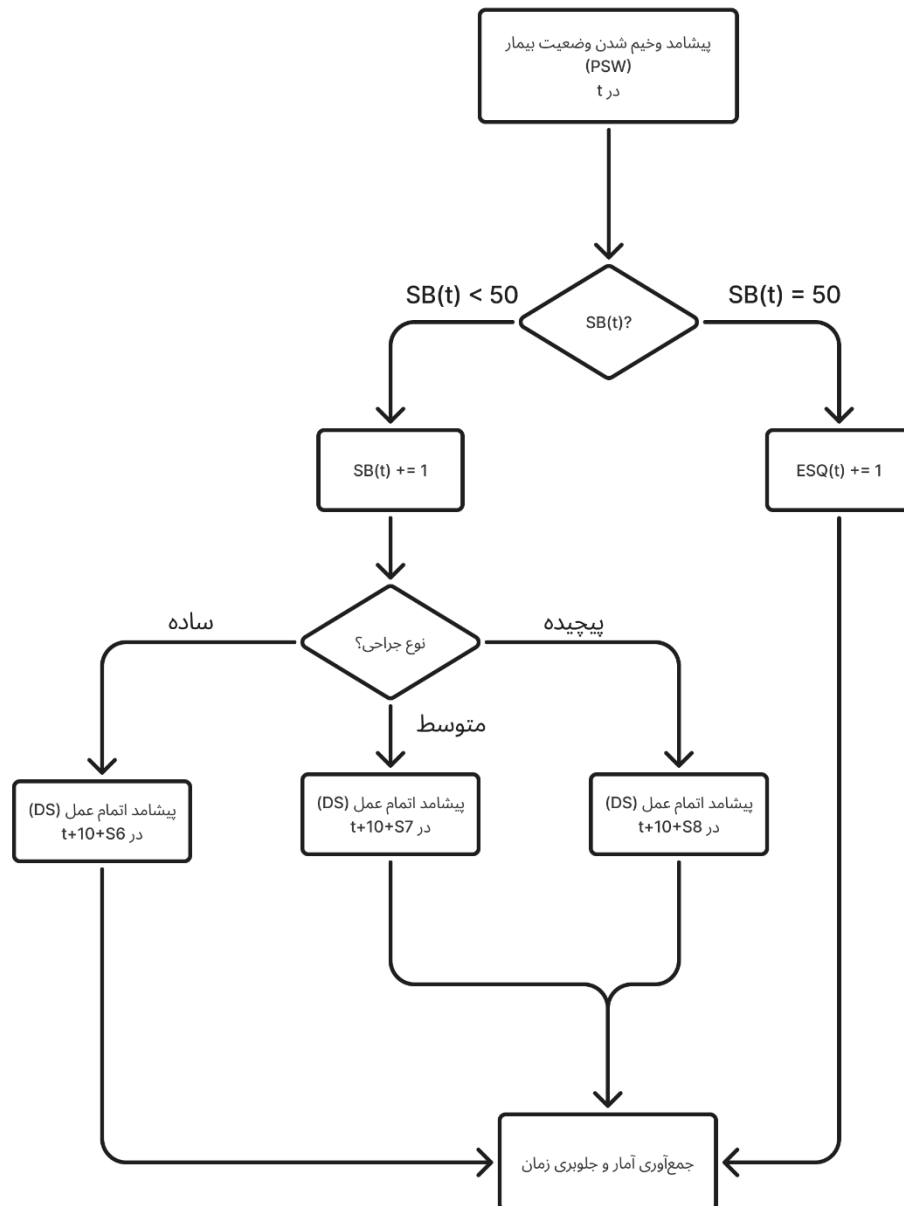
۱. ۲. ۵ پیشامد اتمام عمل



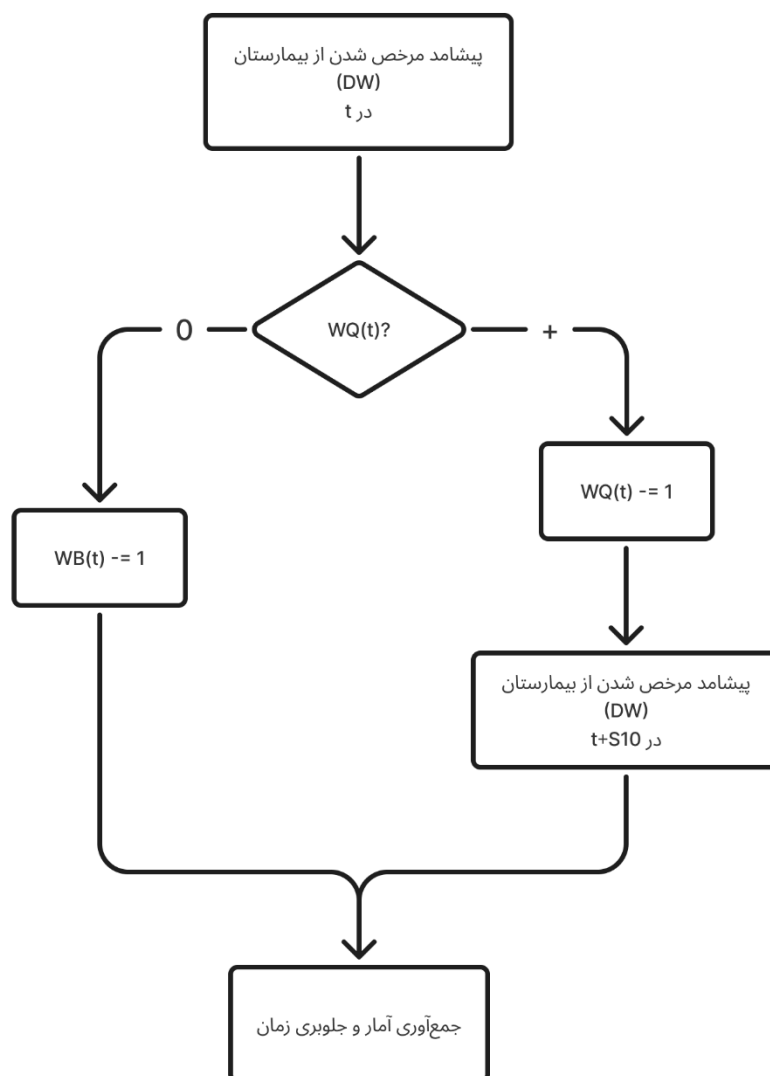
۶.۲.۱. پیشامد خروج از بخش‌های مراقبت‌های ویژه



۷.۲.۱. پیشامد وخیم شدن وضعیت یک بیمار



۱.۲.۸ پیشامد مرخص شدن از بیمارستان



۲ معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم

۱.۲ معیارهای پیشنهادی

(۱) میانگین مدت زمان انتظار در صف و طول صف مربوط به بیماران اورژانسی در هر بخش از سیستم: از آنجا که بیماران اورژانسی نیازمند واکنش سریع تر هستند و اولویت بالاتری دارند، باید بتوان حضور آنها در بخش‌های مختلف را زیر نظر گرفت، تا از خطرات احتمالی که با جان انسان‌ها سر و کار دارد جلوگیری کرد.

$$\text{Average Queue Length} = \frac{\int_0^{\text{Simulation Time}} (\text{Queue length}_t) dt}{\text{Simulation Time}}$$

Waiting time = زمان ورود به صف - زمان خروج از صف

$$\text{Average Waiting Time} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Waiting Time}_i}{n}$$

(۲) میانگین مدت زمان بستری بیماران با جراحی ساده در بخش عمومی:

این شاخص می‌تواند در بهبود عملکرد بیمارستان از طریق مناسب بودن میزان بستری بیماران با شرایط غیر پیچیده، به واسطه افزایش بهره‌وری در ترخیص و عدم بستری غیر ضروری آنها، کمک کند.

Average Hospitalization Time of Patients with Normal Surgery at Ward

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \text{Hospitalization Time}_i}{n}$$

(۳) میانگین مدت زمان حضور بیماران عادی در بیمارستان:

درواقع به دلیل این که در اکثر اوقات بیماران به صورت عادی به بیمارستان مراجعه می‌کنند، با این معیار می‌توان دید خوبی از میانگین مدت زمان بین ورود و خروج بیماران کسب کرد.

$$APN = \frac{\sum_{i=1}^{NN} (\text{زمان مرخص شدن بیمار عادی} - \text{زمان ورود بیمار عادی})}{(NN) \text{ تعداد بیماران عادی}}$$

۴) کارایی تخت‌ها در بخش‌های مختلف بیمارستان:

کارایی تخت‌ها به سادگی می‌تواند درصد ثمربخشی تعداد تخت‌های به‌کاررفته در هر بخش را نشان دهد. بدین صورت که اگر این معیار از حدی کمتر باشد، می‌توان تعدادی از تخت‌ها را حذف و از هزینه‌ها کم کرد و اگر این معیار از حدی بیشتر باشد، می‌توان گفت که احتمالاً بیمارستان نیاز به توسعه و افزایش تخت‌های خود دارد تا به سطح مطلوبی از عملکرد برسد.

$$BE = \frac{\int_0^{\text{Simulation Time}} (\text{Number of Busy Beds}_t) dt}{\text{Simulation Time} \times \text{Number of Beds}}$$

۵) درصد بیماران عادی و اورژانسی‌ای که بلافاصله پذیرش می‌شوند:

یکی از مهم‌ترین نکاتی که بر روی رضایت بیماران تأثیرگذار است، سرعت پاسخگویی بلادرنگ است؛ به همین دلیل محاسبه این شاخص به بهبود خدمت‌دهی و افزایش رضایت بیماران کمک می‌کند.

$$ISP = \frac{\text{تعداد بیماران اورژانسی (عادی) که بلافاصله پذیرش می‌شوند}}{\text{تعداد کل بیماران اورژانسی (عادی)}}$$

۲.۲ معیارهای مورد نظر مدیریت بیمارستان

۱) میانگین مدت زمان ماندن در سیستم:

در زمان خروج بیمار از سیستم یا ترخیص، تفاضل زمان خروج و ورود بیمار باید به `data['Cumulative Stats']['System Waiting Time']` اضافه شود. همچنین، یک واحد به `data['Cumulative Stats']['Total Patients']` اضافه می‌شود (این واحد در پایان شبیه‌سازی اضافه می‌شود تا بیماران فوت‌شده در محاسبات لحاظ نشوند). در نهایت، با تقسیم مقدار اول بر مقدار دوم، این معیار محاسبه خواهد شد.

۲) احتمال پر بودن ظرفیت اورژانس:

هرگاه طول صف اورژانس تغییر کند، اگر مقدار Emergency Queue Length برابر با ۱۰ باشد، قبل از تغییر طول صف، مقدار (Clock – Last Time Emergency Queue Length Changed) باید به data['Cumulative Stats']['Full Emergency Queue Duration'] اضافه شود. سپس مقدار Last Time Emergency Queue Length Changed به روز رسانی خواهد شد. در نهایت، با تقسیم مقدار data['Cumulative Stats']['Full Emergency Queue Duration'] بر زمان شبیه سازی، معیار مورد نظر محاسبه می شود.

۳) میانگین تعداد دفعات عمل مجدد برای بیماران با عمل پیچیده:

هرگاه بیماری با عمل پیچیده وارد سیستم شود، یک واحد به data['Cumulative Stats']['Patients With Complex Surgery'] اضافه می شود. همچنین، هرگاه عمل جراحی پیچیده ای تکرار شود، یک واحد به data['Cumulative Stats']['Number of Repeated Operations For Patients With Complex Operation'] اضافه خواهد شد. در نهایت، برای محاسب این معیار مقدار دوم بر مقدار اول تقسیم می شود.

۴) درصد بیماران اورژانسی که بلافاصله پذیرش می شوند:

در صورتی که بیماری اورژانسی از صف وارد بخش اورژانس شود (با بلافاصله وارد شود) و تفاضل زمان ورود به صف و شروع خدمت دهی برابر با صفر باشد، یک واحد به data['Cumulative Stats']['Number of Immediately Admitted Emergency Patients'] اضافه می شود. علاوه بر این، با ورود هر بیمار اورژانسی، یک واحد به data['Cumulative Stats']['Emergency Patients'] اضافه خواهد شد. در نهایت، مقدار اول بر مقدار دوم تقسیم شده و در عدد ۱۰۰ ضرب می شود.

۵) میانگین بهره‌وری هر بخش بیمارستان:

برای هر بخش، ابتدا آماره تجمعی `data['Cumulative Stats']['Server X Busy Time']` تعریف می‌شود. هنگام شروع خدمت‌دهی به بیمار در هر بخش، مقدار `data['Patients'][patient]['Time X Service Begins'] = clock` برای وی ثبت می‌گردد. وقتی بیمار بخش را ترک می‌کند، تفاضل زمان خروج از بخش و شروع خدمت‌دهی، در تعداد تخت‌های مشغول آن بخش (قبل از تغییر) ضرب شده و بر تعداد کل تخت‌های آن بخش تقسیم می‌شود. این مقدار به `data['Cumulative Stats']['Server X Busy Time']` اضافه می‌گردد. در نهایت، با تقسیم این مقدار بر زمان شبیه‌سازی، بهره‌وری تخت‌های هر بخش محاسبه خواهد شد.

۶) بیشینه و میانگین طول صف و مدت زمان انتظار در صف‌های هر بخش:

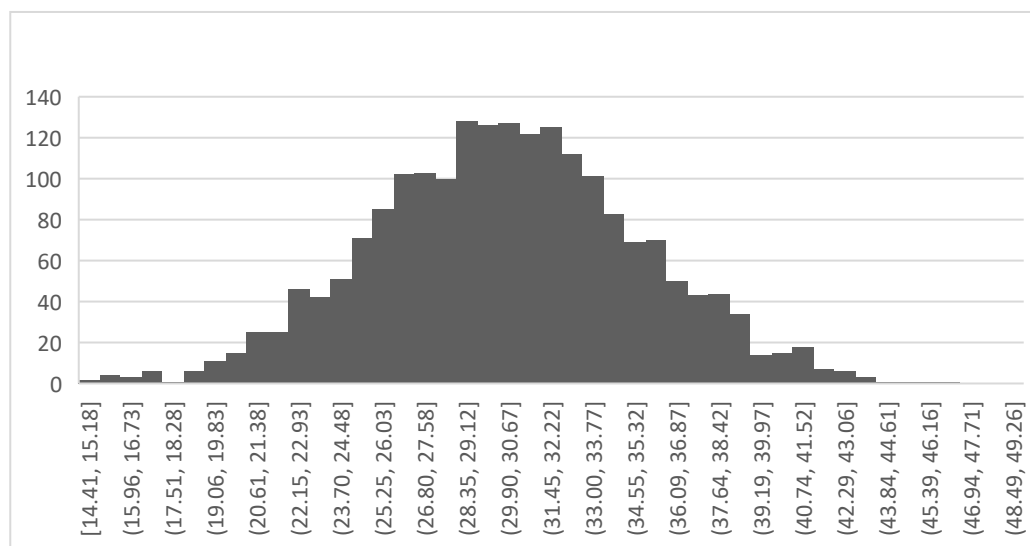
- طول صف: برای هر بخش، باید مقادیر `Last Time X Queue Length Changed` و `data['Cumulative Stats']['Area Under X Queue Length Curve']` تعریف شوند. هرگاه طول صف تغییری کند، مقدار `X Queue Length Changed * (Clock - Last Time X Queue Length Changed)` به `data['Cumulative Stats']['Area Under X Queue Length Curve']` اضافه خواهد شد. در نهایت، با تقسیم مقدار نهایی بر زمان شبیه‌سازی، میانگین طول صف به‌دست خواهد آمد.
- بیشینه طول صف: در ابتدا `data['X Queue Lengths']` را برای هر صف به صورت دیکشنری تعریف می‌کنیم و هر موقع طول صف تغییر کرد، طول صف را به صورت `data['X Queue Lengths'][clock]=state['X Queue Length']` در دیکشنری مربوطه ذخیره می‌کنیم و در نهایت، بیشینه مقادیر این دیکشنری را به عنوان بیشینه طول صف بخش معرفی می‌کنیم.
- مدت زمان انتظار در صف: برای این معیار، باید زمان ورود بیمار به صف و زمان خروج وی از صف (شروع خدمت‌دهی) ذخیره شود. در صورت ترک صف، تفاضل این دو مقدار به `data['Cumulative Stats']['X Queue Waiting Time']` اضافه و یک واحد به `data['Cumulative Stats']['X Service Starters']` اضافه خواهد شد. در نهایت، با تقسیم مقدار اول بر مقدار دوم، میانگین مدت زمان انتظار محاسبه می‌شود.

- بیشینه مدت زمان انتظار: برای محاسبه این قسمت به ازای هر صف یک دیکشنری `data[X Queue Waiting Times]` تعریف شده است و هر گاه بیماری صف را ترک می‌کند، تفاضل زمان ورود و خروج از صف برابر با `data[X Queue Waiting Times][first_patient_in_queue]` قرار داده می‌شود. در نهایت، بیشینه مقادیر این دیکشنری را به عنوان بیشینه مدت زمان انتظار در صف بخش معرفی می‌کنیم.

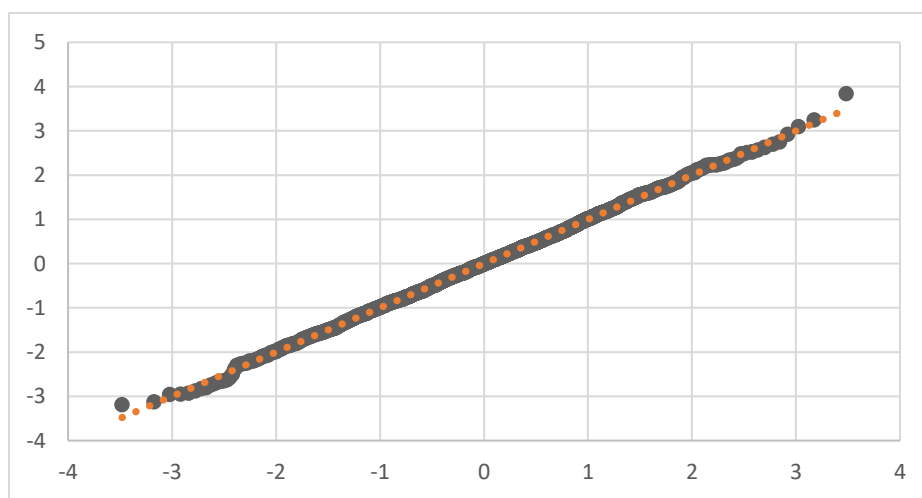
۳ توزیع‌های زمان عمل بیماران

۳.۱ توزیع زمان عمل ساده

در ابتدا هیستوگرام داده‌های موردنظر را رسم می‌کنیم؛ نمودار ۱ هیستوگرام زمان عمل ساده را نشان می‌دهد. با توجه به تعداد داده‌ها (۲۰۰۰ عدد)، تعداد بازه‌ها ۴۵ در نظر گرفته شده است. به صورت شهودی توزیع مربوط به این نمودار رفتاری شبیه به توزیع نرمال دارد. برای بررسی بیشتر نمودار $q-q$ داده‌ها نیز در نمودار ۲ قابل مشاهده است.



نمودار ۱: هیستوگرام مدت زمان عمل های ساده (واحد: دقیقه)



نمودار ۲: q-q مدت زمان عمل های ساده (واحد: دقیقه)

طبق نمودارهای ۱ و ۲ و با استفاده از روش MLE، داده های جمع آوری شده از توزیع نرمال با میانگین ۳۰.۲۲ دقیقه و واریانس ۴.۹۶ برخوردار است (میانگین و واریانس نمونه). در انتها این ادعا را با آزمون فراوانی مربع کای مورد بررسی قرار می دهیم.

متغیر تصادفی بر توزیع نرمال با پارامترهای مذکور منطبق است: H_0 :

متغیر تصادفی بر توزیع نرمال منطبق نیست: H_1 :

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(E_i - O_i)^2}{E_i}$$

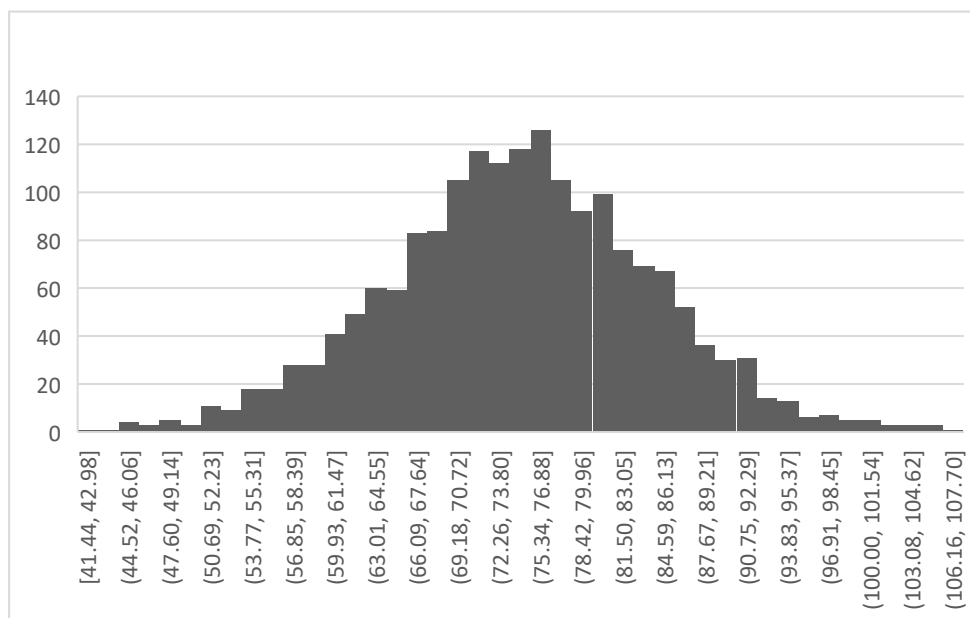
آماره: χ^2

منظور از E_i تعداد مشاهدات قابل انتظار در بازه i و منظور از O_i تعداد کل مشاهدات است. مقدار آماره برابر با ۳۳.۱۶ خواهد بود. سپس مقدار بحرانی $(\chi^2_{\alpha, K-S-1})$ را به دست می آوریم. (K تعداد بازه ها و S تعداد پارامترهای توزیع است). با سطح معنی داری ۵ درصدی، مقدار بحرانی برابر با ۵۸.۱۲ خواهد بود. بنابراین شواهد کافی برای رد فرض تطابق داده ها با توزیع نرمال مذکور وجود ندارد. بنابراین:

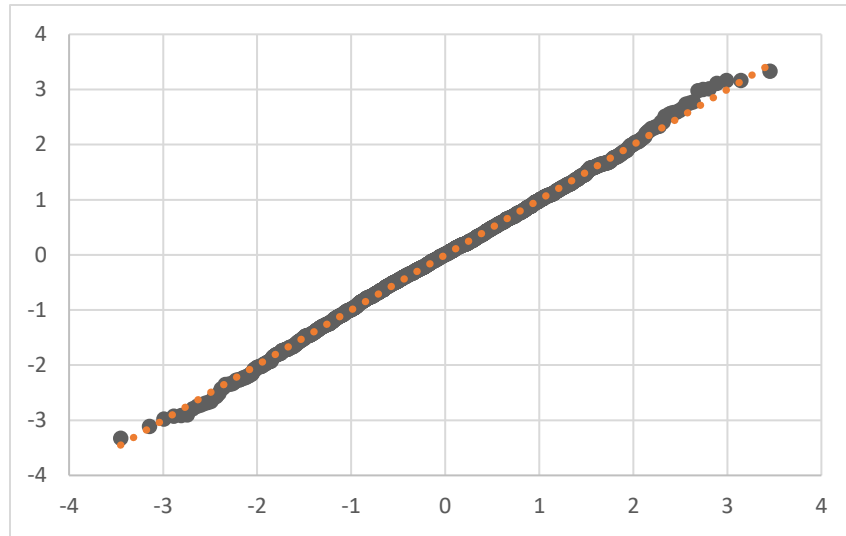
$$D_1 \sim N(30.22^{\min}, 4.96)$$

۲.۳ توزیع زمان عمل متوسط

به طور مشابه هیستوگرام داده های جمع آوری شده از مدت زمان عمل های متوسط را در ۴۳ بازه (چون ۱۸۰۰ عدد داریم) رسم می کنیم. نمودار ۳ مشابه نمودار ۱ رفتاری شبیه به توزیع نرمال دارد. همچنین نمودار q-q (نمودار ۴) به خوبی این موضوع را تایید می کند.



نمودار ۳: هیستوگرام مدت زمان عمل های متوسط (واحد: دقیقه)



نمودار ۴: q-q مدت زمان عمل‌های متوسط (واحد: دقیقه)

با استفاده از روش MLE میانگین این توزیع ۷۴.۵۴ دقیقه و واریانس آن ۹.۵۳ است. در نهایت آزمون فراوانی مربع کای را برای این توزیع تکرار می‌کنیم.

متغیر تصادفی بر توزیع نرمال با پارامترهای مذکور منطبق است: H_0 :

متغیر تصادفی بر توزیع نرمال منطبق نیست: H_1 :

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(E_i - O_i)^2}{E_i}$$

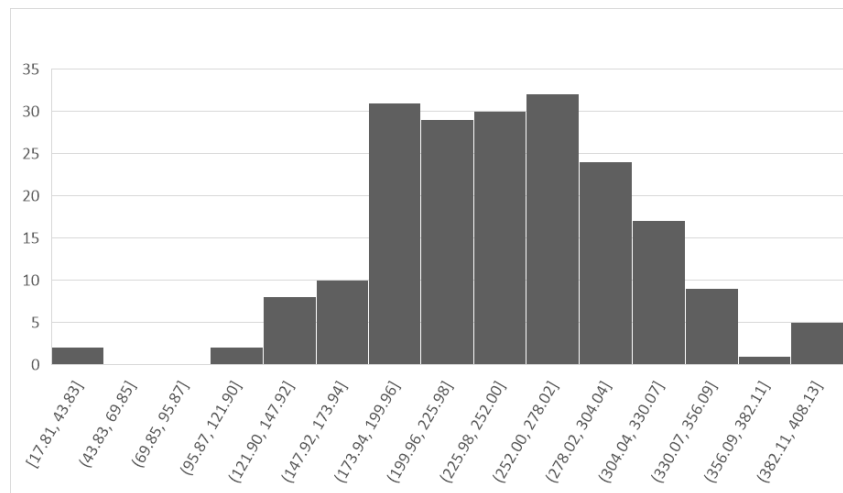
آماره:

مقدار آماره آزمون برابر با ۳۳.۶۴ و مقدار بحرانی با سطح معنی‌داری ۵ درصدی، برابر با ۵۵.۷۶ خواهد بود. بنابراین شواهد کافی برای رد فرض تطابق داده‌ها با توزیع نرمال مذکور وجود ندارد. بنابراین:

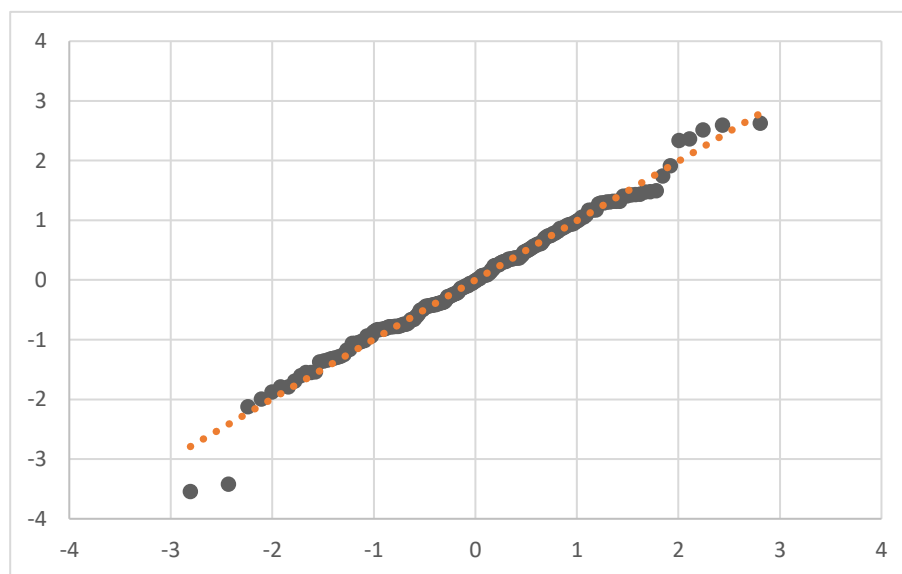
$$D_p \sim N(74.54^{\min}, 9.53)$$

۳.۳ توزیع زمان عمل پیچیده

به طور مشابه هیستوگرام داده‌های جمع‌آوری شده از مدت زمان عمل‌های پیچیده را در ۱۵ بازه (چون ۲۰۰ عدد داریم) رسم می‌کنیم. نمودار ۵ مشابه نمودار ۱ رفتاری شبیه به توزیع نرمال دارد. همچنین نمودار $q-q$ (نمودار ۶) به خوبی این موضوع را تایید می‌کند. (می‌توان در اینجا بدلیل اینکه دو داده ابتدایی در ابتدا بازه هستند و از اهمیت کمتری برخوردارند و به دلیل احتمال ایجاد اختلال در آزمون مربع کای و استدلال‌های مربوطه می‌توان این داده‌ها را به عنوان داده پرت حذف کرد).



نمودار ۵: هیستوگرام مدت زمان عمل‌های پیچیده (واحد: دقیقه)



نمودار ۶: $q-q$ مدت زمان عمل‌های پیچیده (واحد: دقیقه)

با استفاده از روش MLE میانگین این توزیع ۲۴۲.۰۳ دقیقه و واریانس آن ۶۳.۲۷ است. در نهایت آزمون فراوانی مربع کای را برای این توزیع تکرار می‌کنیم.

متغیر تصادفی بر توزیع نرمال با پارامترهای مذکور منطبق است: H_0 :

متغیر تصادفی بر توزیع نرمال منطبق نیست: H_1 :

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(E_i - O_i)^2}{E_i}$$

آماره:

مقدار آماره آزمون برابر با ۱۶.۰۷ و مقدار بحرانی با سطح معنی‌داری ۵ درصدی، برابر با ۲۱.۰۳ خواهد بود. بنابراین شواهد کافی برای رد فرض تطابق داده‌ها با توزیع نرمال مذکور وجود ندارد. بنابراین:

$$D_3 \sim N(242.03^{min}, 63.27)$$

۴ پیاده‌سازی

برای پیاده‌سازی این شبیه‌سازی از زبان برنامه‌نویسی پایتون^۱ استفاده شده نتایج خروجی نیز با استفاده از سیستمی با پردازنده Ryzen 9 و رم ۳۲ گیگابایت انجام شده است. روند توسعه کد و نسخه نهایی آن در [گیت‌هاب](#)^۲ قابل مشاهده است. توابع اصلی شبیه‌سازی در فایل base.py قرار دارد و برای گرفتن خروجی‌ها فایل get_result.py اجرا می‌شود.

^۱ Python

^۲ GitHub

۵ صحت‌سنجی و اعتبار‌سنجی

۵.۱ ردیابی^۳

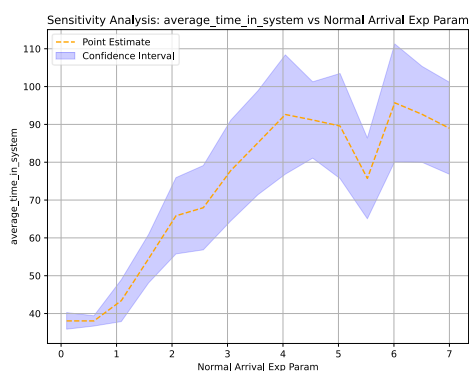
در اجرای این شبیه‌سازی این امکان به‌وجود آمده است که با فراخوانی تابع به‌خصوصی، فایل اکسلی ایجاد شود؛ در این فایل، هر پیشامد شبیه‌سازی، متغیرهای حالت سیستم، معیارهای اندازه‌گیری شده و فهرست پیشامدهای آتی به‌ترتیب زمان وقوع نشان داده می‌شود.

با مشاهده چند سطر از این جدول، دنبال کردن چند بیمار و بررسی متغیرهای حالت در طول شبیه‌سازی، می‌توان اعتبار صوری^۴ مدل را نتیجه‌گیری کرد.

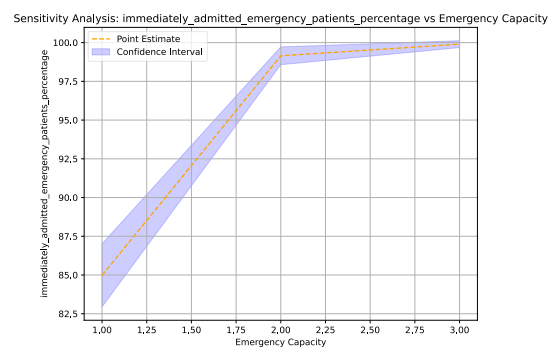
^۳ Trace

^۴ Face Validity

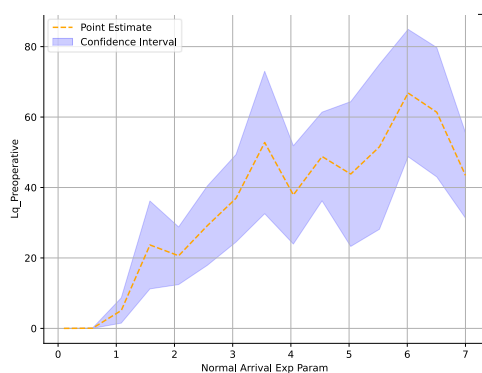
۲.۵ تحلیل حساسیت



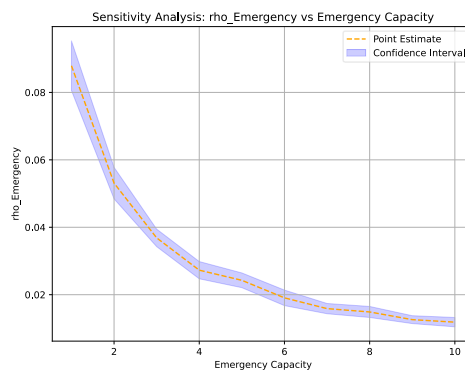
نمودار ۸



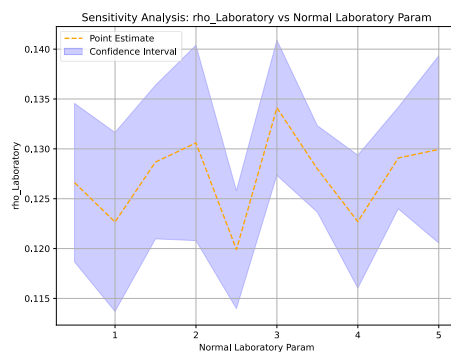
نمودار ۷



نمودار ۱۰



نمودار ۹



نمودار ۱۱

در نمودار ۱ با افزایش نرخ ورود بیماران عادی، میانگین طول صف بخش بستری پیش از عمل افزایش پیدا کرده است و از آنجایی که بیماران عادی وارد بخش بستری پیش از عمل می‌شوند، این اتفاق امری بدیهی است.

در نمودار ۲ نیز شاهد افزایش نرخ ورود بیماران عادی هستیم که به وضوح به دلیل افزایش بار در سیستم و عواملی مانند ایجاد صف در بخش بستری پیش از عمل، باعث افزایش میانگین مدت زمان ماندن بیماران در سیستم می‌شود.

در مورد نمودار ۳ باید گفت که با افزایش ظرفیت بخش اورژانس، درصد بیماران اورژانسی ای که بلافاصله پذیرفته می‌شوند به ۱۰۰ میل می‌کند که این اتفاق امری واضح است که زیرا که با گذشتن ظرفیت از حدی (در اینجا برابر با ۳ تخت)، دیگر صفی در این بخش تشکیل نخواهد شد. همچنین در نمودار ۴ نیز با افزایش همین ظرفیت می‌توان شاهد کاهش بهره‌وری در بخش اورژانس بود، زیرا تخت‌های بیشتری در مدت شبیه‌سازی خالی می‌مانند.

در نهایت در نمودار ۵ تغییرات بهره‌وری آزمایشگاه نسبت به تغییرات مدت زمان کارهای اداری برای بیماران عادی قبل از ورود به آزمایشگاه، بررسی شده است. همانطور که مشخص است، بهره‌وری رفتاری سینوسی از خود نشان می‌دهد که بیشینه و کمینه آن تفاوت چندانی با هم ندارد. این موضوع به این دلیل است که اولویت در آزمایشگاه با بیماران اورژانسی است و این افزایش مدت زمان انتظار تاثیر چندانی بر روی پر کردن تخت‌های آزمایشگاه از سمت بیماران عادی ندارد.

۶ نتایج عددی شبیه‌سازی

قابل ذکر است که تمامی برآوردهای بازه اطمینان ارائه شده در این بخش با سطح معناداری ۵٪ محاسبه شده‌اند؛ به بیان دیگر، این برآوردها بیانگر بازه اطمینان ۹۵٪ هستند. همچنین، این بازه‌های اطمینان از طریق ۲۰ مرتبه بازتکرار مستقل با استفاده از هسته‌های مختلف به دست آمده‌اند.

معیار	برآورد نقطه‌ای	برآورد فاصله اطمینان
میانگین مدت زمان ماندن در سیستم	41.74917954	[39.5317, 43.9667]
احتمال پر بودن ظرفیت صف اورژانس	0	[0.0, 0.0]

[0.0, 0.0]	0	متوسط تعداد دفعات عمل مجدد برای بیماران با عمل پیچیده	
[100.0, 100.0]	100	درصد بیماران اورژانسی که بلافاصله پذیرش می‌شوند	
[0.0108, 0.0122]	0.011468147	کارایی	
[0.5049, 0.5793]	0.542129116		
[0.1221, 0.1312]	0.126634892		
[0.0221, 0.0241]	0.023124865		
[0.0003, 0.0003]	0.000272479		
[0.0002, 0.0002]	0.000176042		
[0.0004, 0.0005]	0.000474084		
[0.0, 0.0]	0	میانگین طول صف	
[1.1278, 3.6463]	2.387006529		
[0.0002, 0.0004]	0.000294402		
[0.0, 0.0006]	0.000316228		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.0]	0		
[0.0, 0.			

[0.0, 0.0]	0	بخش CCU		
[10.8416, 16.7584]	13.8	بخش اورژانس		بیشینه طول صف
[0.0, 0.0]	0	بخش بستری پیش از عمل		
[0.6907, 1.1093]	0.9	بیماران عادی	آزمایشگاه	
[0.2954, 1.1046]	0.7	بیماران ضروری		
[0.0, 0.0]	0	بیماران عادی	اتاق عمل	
[0.0, 0.0]	0	بیماران ضروری		
[0.0, 0.0]	0	بخش عمومی		
[0.0, 0.0]	0	بخش ICU		
[0.0, 0.0]	0	بخش CCU		
[20.4253, 31.8597]	26.14249966	بخش اورژانس		بیشینه زمان انتظار در صف
[0.0, 0.0]	0	بخش بستری پیش از عمل		
[0.0884, 0.1911]	0.139772946	بیماران عادی	آزمایشگاه	
[0.0404, 0.2089]	0.124675012	بیماران ضروری		
[0.0, 0.0]	0	بیماران عادی	اتاق عمل	
[0.0, 0.0]	0	بیماران ضروری		
[0.0, 0.0]	0	بخش عمومی		
[0.0, 0.0]	0	بخش ICU		
[0.0, 0.0]	0	بخش CCU		

جدول ۱: برآورد نقطه‌ای و بازه اطمینان برای معیارهای ارزیابی عملکرد

در ابتدا باید گفت که در محاسبه میانگین مدت زمان ماندن بیماران در سیستم، بیماران فوت شده در نظر گرفته نشده‌اند.

در مورد احتمال پر بودن صف اورژانسی باید گفت از آنجایی که نرخ ورود به اورژانس بر اساس ظرفیت تخت‌های آن بخش و نرخ‌ی که بیماران از این بخش خارج می‌شوند، کم است، هیچ‌گاه شاهد پر شدن صف این بخش در این مدت زمان شبیه‌سازی نبودیم.

همچنین با توجه به درصد کمی که برای تکرار عمل جراحی پیچیده در مفروضات در نظر گرفته شده است، باید گفت که عدد بدست آمده برای معیار میانگین تعداد دفعات عمل مجدد برای بیماران با عمل پیچیده، منطقی است.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره کردیم، صف بخش اورژانس هیچ‌گاه پر نمی‌شود، اما طبق عددی که برای معیار درصد بیماران اورژانسی که بلافاصله پذیرش می‌شوند، بدست آمده است، می‌توان گفت که هیچ موقع بیماری در صف بخش اورژانس منتظر نمی‌ماند. علاوه بر دلایلی که قبلاً ذکر شد، باید به مدت زمان کم کارهای اداری برای بیماران اورژانسی و مدت زمان کوتاه بستری قبل از عمل این بیماران اشاره کرد که باعث رفاه حال هر چه بیشتر این بیماران نیز خواهد بود. شاید بتوان پیشنهاد کاهش ظرفیت اورژانس را داد، اما با توجه به امکان اختلال و ایجاد حوادث این امر به نظر نامعقول می‌رسد.

درباره میانگین طول صف و بیشینه آن در هر بخش باید گفت که به جز بخش بستری پیش از عمل که نرخ ورود بالایی به نسبت ظرفیت خود دارد، صف خاصی تشکیل نمی‌شود و میانگین صفر یا پایین و همچنین بیشینه صفر یا پایینی دارند که البته شایان ذکر است که این ویژگی برای یک بیمارستان کاملاً منطقی است زیرا وجود صف در پشت بسیاری از بخش‌ها به صورت مستقیم با جان بیماران سروکار دارد و ممکن است خطر مرگ را به وجود بیاورد. همچنین به طبع این منطق برای میانگین طول صف و بیشینه آن، همین اتفاق برای میانگین و بیشینه زمان انتظار در صف بیماران در بخش‌های مختلف نیز قابل مشاهده است.

اما در نهایت درباره بهره‌وری بخش‌های مختلف باید گفت که بخش‌های بستری پیش از عمل و آزمایشگاه از اعداد معقولی برخوردار هستند و همچنین طبق استدلالی که برای بخش اورژانس قبلاً ذکر شد، عدد بهره‌وری آن نیز معقول به نظر می‌رسد. اما درباره بقیه بخش‌ها باید گفت میزان بهره‌وری به شدت پایین است و این نرخ پایین می‌تواند هزینه‌های زیادی برای بیمارستان دربر داشته باشد، بنابراین می‌توان پیشنهاد کاهش ظرفیت در این بخش‌ها را داد، اما این سیاست باید با توجه به احتمال اختلالاتی مانند قطعی برق و حوادث مختلف اجرا شود تا در زمان هرج و مرج نیز بخش‌های مختلف بهره‌وری مناسبی داشته باشند.