



## ۱-۱. سیستم و اجزای آن

برای آشنایی با مفهوم سیستم، ابتدا مثال‌هایی از سیستم را ارائه می‌کنیم و سپس با جزئیات بیشتر به بحث خواهیم پرداخت. به تشکیلات یک بانک توجه کنید؛ یک بانک متشکل از عده‌ای انسان، ماشین، دفتر، کامپیوتر، مقررات اداری و قوانین پولی و اقتصادی است که همه به نوعی وابسته به یکدیگر بوده و با اثر گذاشتن بر هم، به منظور ارائه خدمات بانکی و کسب درآمدهای اقتصادی، دارای وحدت و هماهنگی هستند. یک واحد تولیدی، مثلاً تولید اتوموبیل، مثال دیگری از سیستم است که در این واحد، هم تعداد زیادی از مهندسان، کارگران، ماشین آلات، قوانین کار، فرمول‌های مهندسی، مواد اولیه و قوانین تولید، گردهم آمده و هریک در راه هدف نهایی یعنی تولید، دارای نقشی بوده و در اجرای این نقش، از دیگران تأثیر پذیر و بر دیگران تأثیرگذار هستند. مسلماً هدف از ایجاد یک سیستم یا مدیریت یک سیستم موجود، کسب بهترین نتایج حاصل از آن است. لذا، در مورد سیستم‌های موجود، باید تأثیر اجزای آن بر یکدیگر، قوانین و رابطه‌های حاکم بر آن‌ها و دیگر خصوصیات مربوط را شناخت. اگر هدف ایجاد یک سیستم است، باید بهترین تعداد و ترکیب اشیاء و مؤثرترین قوانین را برای آن برگزید. اما انتخاب بهترین‌ها، خود مستلزم شناخت رفتار سیستم با ترکیبات و قوانین متفاوت است. در هر حال، لازمه ایجاد یا اداره مطلوب یک سیستم، بررسی و تجزیه و تحلیل آن است. به طور کلی، سیستم را می‌توان چنین تعریف کرد "مجموعه‌ای از اشیاء با مشخصه‌های معلوم که روابط و قوانین حاکم بر آن‌ها مشخص است. اشیاء یک سیستم ممکن است دائمی یا موقت باشند." مثلاً در یک سیستم تولیدی، ماشین‌های تولیدی، جزو اشیاء دائمی هستند و مواد اولیه و یا تولیدات از اشیاء موقت سیستم به شمار می‌روند. هر یک از اشیاء دائمی یا موقت، یک یا چندین مشخصه دارند. اما در یک بررسی، تنها آن دسته مشخصه‌هایی که در ارتباط با هدف بررسی بوده و نتایج از آن‌ها تأثیرپذیر است، مدنظر قرار گرفته و به عنوان مشخصه در مدل سیستم گنجانیده می‌شوند. به چگونگی اشیاء، مشخصات و روابط یک سیستم در یک

لحظه‌زمانی را وضعیت سیستم در آن لحظه می‌گویند. اغلب، تغییرات خارجی سیستم مؤثر واقع شده و بعضی تغییرات در سیستم دارای اثراتی بر عوامل خارجی هستند. مجموعه این گونه عوامل خارجی که بر سیستم مؤثر و یا از آن تأثیر پذیرند را محیط سیستم خوانند. همراه با گذر زمان، مقدار بعضی از مشخصه‌های اشیاء سیستم تغییر می‌یابند. این تغییرات، نسبت به زمان ممکن است به صورت پیوسته یا ناپیوسته باشند. به طور مثال، در یک سیستم بانکی، تعداد مشتری‌ها یکی از مشخصه‌های سیستم است که تغییرات آن به صورت ناپیوسته با ورود و خروج مشتری‌ها صورت می‌گیرد. یک ورود باعث افزایش آن و یک خروج سبب کاهش آن می‌گردد. در عوض یک تصفیه خانه را در نظر بگیرید. مایعات تصفیه نشده و تصفیه شده، از اشیاء سیستم بوده و مقدار آن‌ها مشخصه‌ای برای سیستم هستند. تغییرات این مشخصه، با گذر زمان ارتباطی پیوسته دارد. به این نوع سیستم، سیستم پیوسته و به سیستم مثال قبل، یک سیستم گسسته گویند.

با توجه به مثال فوق، اجزای سیستم عبارت اند از:

**موجودیت یا نهاد (Entity):** عنصر مورد توجه در سیستم است. مثلاً، اگر سیستم یک بانک مورد بررسی قرار گیرد، مشتریان، نهاد سیستم به شمار می‌روند و یا در یک بیمارستان، نهادها همان بیماران هستند و بالاخره در یک کارخانه، قطعات، نقش نهاد را در سیستم ایفا می‌کنند. در این فصل، هر جا به لغت موجودیت اشاره شده، منظور همان عناصر مورد توجه در سیستم است؛

**خصیصه یا صفت (Attribute):** به ویژگی نهاد درون سیستم خصیصه گفته می‌شود. به طور مثال، در یک بانک، یکی از صفات مشتریان، مانده حساب جاری آن است؛

**فعالیت (Activity):** هر فعالیت، نمایش‌گر دوره‌ای زمانی با طول مشخص است. اگر همان مثال بانک را در نظر بگیریم، سپرده‌گذاری یک فعالیت به شمار می‌آید؛

**حالت یا وضعیت سیستم (Status):** مجموعه متغیرهای لازم برای تشریح سیستم در هر زمان، با توجه به اهداف بررسی را حالت یا وضعیت سیستم می‌نامند. در بررسی سیستم



بانک، متغیرهای ممکن حالت عبارتند از: تعداد تحویل‌داران مشغول کار، عده مشتریان منتظر در صف یا در حال خدمت‌گیری و...؛

**پیشامد (Event):** به یک رویداد یا واقعه لحظه‌ای که بتواند حالت سیستم را تغییر دهد، پیشامد گفته می‌شود. در بررسی مربوط به بانک، ورود هر مشتری، کامل‌سازی خدمت‌دهی به مشتری و یا خروج هر مشتری، یک پیشامد یا رویداد تلقی می‌شود. در جدول ۱-۱ اجزای چند سیستم نمونه را مشاهده می‌کنید:

جدول ۱-۱

سیستم	نهاد	خصیصه‌ها	فعالیتها	پیشامدها	متغیرهای حالت
قطار	مسافر	مبدأ- مقصد	سفر	ورود به ایستگاه	تعداد مسافران منتظر در ایستگاه - شمار مسافران
موجودی انبار	انبار	ظرفیت	خروج کالا از انبار و ورود کالا به انبار	تقاضای خروج کالا	مقاضی سرویس موجودی، تقاضا پس از کاهش موجودی

- بنابراین سیستم گسسته پیشامد سیستمی است که متغیرهای حالت آن به صورت گسسته است مانند بانک و...؛

- سیستم پیوسته پیشامد سیستمی است که متغیرهای حالت آن به صورت پیوسته است مانند آب پشت سد، نرخ جمعیت یک کشور و...

## ۱-۲. مدل و مدل‌سازی

اساسی‌ترین مفهوم در مطالعه سیستم‌ها چیزی به نام مدل و مدل‌سازی است که اصلی‌ترین فعالیت ما در مطالعه سیستم به شمار می‌رود. لذا، نیازمندیم که این دو را به خوبی بشناسیم.

مدل، چیزی است همانند واقعیت. مدل، در واقع تنها ابزار ما در مطالعه یک سیستم و یا

یک کلیت به‌طور انتزاعی است. شاید این شعار را شنیده‌اید که «ریسک نکنید، مدل کنید» در مجموع، مدل را می‌توان چنین تعریف کرد: «مدل، ترکیب مناسبی از ویژگی‌های یک سیستم و اطلاعات مربوط به آن است که به منظور بررسی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.» معمولاً نوع بررسی، مدل و میزان اطلاعات قرار داده شده در آن را تعیین می‌کند. لذا ممکن است بررسی‌های متفاوت، مدل‌های مختلفی از یک سیستم را لازم داشته باشند. به عبارت دیگر، سیستم‌ها در بررسی‌های گوناگون دارای یک مدل منحصر به فرد نیستند. مسئله‌ای که در این جا پیش می‌آید، فراگیری جزئیات سیستم به وسیله مدل و یا میزان نزدیک بودن مدل به واقعیت است. به بیان دیگر، در موقع مدل‌سازی دو سؤال مطرح می‌گردد:

در مدل کدام‌یک و به چه اندازه از خصوصیات و جزئیات سیستم باید وجود داشته باشد؟

میزان شباهت مدل به سیستم واقعی چقدر است؟

قدر مسلم، هرچه جزئیات بیشتر از سیستم در مدل گنجانده شود، شباهت زیادتری به سیستم واقعی پیدا کرده و رفتار آن را بهتر نمایش می‌دهد. در این صورت، اگر نتیجه‌ای از مطالعه و بررسی مدل حاصل گردد، به واقعیت نزدیک‌تر و لذا به کارگرفتن آن در سیستم واقعی عملی‌تر است. از طرف دیگر، وجود جزئیات بیشتر در مدل، سبب مشکل‌تر کردن مطالعه و رسیدن به نتیجه می‌گردد. اغلب، افزودن جزئیات بیش از حد به یک مدل باعث تغییر روش بررسی شده و کلیت بحث از دست می‌رود. بالعکس، از قلم انداختن بعضی جزئیات، تجزیه و تحلیل مدل ساده‌تر و راه رسیدن به نتیجه را آسان‌تر و کوتاه‌تر می‌سازد. از طرف دیگر، نتایج حاصل از واقعیت‌ها دورتر و به کارگیری آن‌ها را در سیستم واقعی بی‌ثمر خواهد ساخت. به هر حال، در مدل‌سازی معیاری برای قابل قبول بودن شمول جزئیات یک مدل قبل از به کارگیری نتایج در واقعیت وجود ندارد. از مسئولیت‌های تحلیل‌گر است که در ساخت مدل و گنجانیدن جزئیات سیستم در آن، با توجه به دقت



مورد نیاز در نتایج، جانب تعادل و اعتبار را رعایت کند. این تعادل باید به گونه‌ای باشد که اولاً به وسیله تکنیک‌ها و وسایل موجود، بررسی مدل امکان‌پذیر بوده و ثانیاً، نتایج بررسی منطبق یا نزدیک به واقعیت باشد.

مدل و عناصر آن مانند سیستم و عناصر آن است. همان‌طور که هر سیستم شامل عناصرش می‌شود، هر مدل نیز شامل عناصر آن مدل می‌گردد که این عناصر تا حدی متناظر با عناصر یک سیستم در دنیای واقعی است. بنابراین، مجموعه عناصر مرتبط به هم به طور انتزاعی مدل را می‌سازند در حالی که مجموعه عناصر مرتبط به هم در دنیای واقعی سیستم را می‌سازند.

یکی از چالش‌های اصلی تحلیل‌گر در فرآیند مدل‌سازی بعد از اعتبار مدل، شناسایی عناصر مدل متناظر با عناصر سیستم است؛ این که مدل باید شامل چه عناصری باشد.

### ۳-۱. انواع مدل

مدلهایی که برای مطالعه سیستم‌ها ساخته و به کار برده می‌شوند، با توجه به خصوصیات عمومی‌شان به طرق مختلف دسته‌بندی می‌گردند. با این دسته‌بندی‌ها، نه تنها انواع مدل‌ها را از یکدیگر متمایز می‌سازند، بلکه روش‌هایی برای بررسی هر گروه نیز تعیین می‌کنند. در مرحله اول، مدل‌ها را می‌توان به دو دسته فیزیکی و ریاضی تقسیم کرد:

**مدل‌های فیزیکی:** مدل‌هایی هستند که به صورت مادی و فیزیکی به وجود می‌آیند و در واقع، نمونه‌ای کوچک‌تر از سیستم واقعی هستند. به عنوان مثال، از این نوع مدل‌ها می‌توان به ماکت فرودگاه اشاره کرد؛

**مدل‌های تحلیلی یا ریاضی:** مدل‌هایی هستند که با استفاده از روابط ریاضی و ... به وجود می‌آیند؛ در واقع، نقطه مقابل مدل‌های فیزیکی هستند که در شبیه‌سازی، به وسیله کامپیوتر از این نوع مدل‌ها استفاده می‌شود. در مدل‌های ریاضی، مشخصه‌های سیستم به وسیله متغیرها، و روابط موجود بین آن‌ها نمایش داده می‌شوند.

در یک تقسیم‌بندی دیگر مدل‌ها، اعم از فیزیکی یا ریاضی، به دو دسته ایستا و پویا تقسیم می‌گردند:

**مدل‌های ایستا:** در این مدل‌ها، یا بُعد زمان به طور کلی نادیده گرفته می‌شوند یا وضعیت یک سیستم در یک لحظه زمانی را به طور ایستا نشان می‌دهند؛

**مدل‌های پویا:** به طور صریح، گذر زمان را شامل بوده و رابطه وضعیت سیستم و زمان به نمایش می‌گذارد.

مدل‌های ریاضی با یک دیدگاه دیگر شامل مدل‌های تحلیلی و عددی می‌شوند. این تقسیم‌بندی بیشتر با توجه به روش بررسی مدل و کسب نتایج انجام شده است.

سرانجام، نوع دیگر تقسیم‌بندی مدل‌ها، به صورت قطعی و احتمالی است:

**مدل قطعی:** کلیه تغییرات در این مدل معین و براساس روابط غیر احتمالی صورت می‌گیرد. به عبارتی، مدل در هر لحظه از زمان وضعیتی کاملاً مشخص دارد. در این مدل یک مجموعه ورودی مشخص، یک مجموعه خروجی مشخص را در اختیار می‌گذارد؛

**مدل احتمالی:** حداقل قسمتی از تغییرات یا روابط در این مدل، تصادفی و احتمالی است.

#### ۴-۱. شبیه‌سازی

شبیه‌سازی، یکی از مفیدترین و پرقدردترین ابزارهای تحلیل عمل‌کرد فرایندهای پیچیده سیستم‌هاست. شبیه‌سازی، تقلیدی از عمل‌کرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. صرف‌نظر از این‌که با دست یا به وسیله کامپیوتر انجام شود، به ایجاد ساختگی تاریخچه سیستم و بررسی آن به منظور دستیابی به نتیجه‌گیری‌ها در مورد ویژگی‌های عمل‌کرد سیستم واقعی مربوط می‌شود. همچنان‌که یک سیستم با گذشت زمان تکوین می‌یابد، رفتار آن با ایجاد و مدل شبیه‌سازی بررسی می‌شود. این مدل معمولاً به شکل مجموعه‌ای از فرض‌های مربوط به عمل‌کرد سیستم است. این فرض‌ها در چارچوب رابطه‌های ریاضی و منطقی قرار دارند.



## ۵-۱. چه موقع از شبیه‌سازی استفاده کنیم

مسئله یا مسائل مورد نظر در بررسی یک سیستم، اغلب روش بررسی و حل آن را تعیین می‌کنند. روش‌های تحلیل ریاضی هر جا که ممکن باشد، مطلوب‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای مطالعه سیستم‌ها هستند، زیرا این روش‌ها معمولاً با کمترین کوشش، جواب‌ها یا نتایجی را تولید می‌کنند که برای مقادیر مختلف پارامترهای مدل، قابل محاسبه بوده و میزان دقت آن‌ها صد درصد است. اما جایی که روش‌های تحلیلی، به علت پیچیدگی مدل‌ها یا نیاز به تولید واقعی‌تر رفتار سیستم غیرعملی است، روش‌های مطالعه سیستم از طریق شبیه‌سازی مطرح می‌گردد. شبیه‌سازی به عنوان آزمایش کردن با مدل یک سیستم واقعی تعریف می‌شود. یک مسئله آزمایشی، موقعی پدید می‌آید که به اطلاعات بخصوصی درباره یک سیستم نیاز بوده و آن‌ها را از منابع موجود نتوان تهیه کرد. آزمایش کردن روی سیستم واقعی، مشکلات زیادی را که در تطبیق دادن مناسب مدل با شرایطی واقعی وجود دارد، از بین می‌برد.

## ۶-۱ انواع شبیه‌سازی

### ۱-۶-۱ شبیه‌سازی دستی

به صورت دستی، متغیرهای وضعیت و انباشت‌گرهای آماری پی‌گیری می‌شوند و از زمان‌های بین دو ورود متوالی و زمان‌های سرویس به عنوان داده‌های مفروض استفاده می‌شود. فهرستی از وقایع، نگهداری می‌شود و ساعت شبیه‌سازی از یک واقعه به واقعه بعدی به یک‌باره جلو برده می‌شود (منتظر انجام سرویس نمی‌شویم)؛

### ۲-۶-۱ شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو که در دسته شبیه‌سازی‌های دستی قرار داده می‌شود، روشی است که برای حل مسائل پیچیده اعم از مسایل تصادفی و یا غیر تصادفی، از اعداد تصادفی

استفاده می‌کند. ویژگی اصلی شبیه‌سازی مونت کارلو این است که زمان نقشی در آن ندارد. تاریخچه این روش، به زمان جنگ جهانی دوم برمی‌گردد و با توجه به این که فعالیت‌های نظامی به وسیله آن تحلیل می‌گردید، تحت عنوان رمز Monte Carlo نامیده شد. این عنوان در سال 1940 توسط فیزیک‌دانانی که بر روی پروژه بمب اتمی کار می‌کردند، انتخاب شد. این روش، کاربرهای زیادی در تحلیل فرآیندهای تصادفی گسسته تغییر ناپذیر با زمان دارد. مونت کارلو در حل بسیاری از مسایل تئوریک و کاربردی که از طریق روش‌های دقیق نمی‌توان آن‌ها را حل کرد یا حل آن‌ها بسیار مشکل است، کاربرد دارد. روش مونت کارلو، یک شیوه نیست و محدوده وسیعی از تکنیک‌ها را شامل می‌شود ولی همگی این تکنیک‌ها در سه فاکتور زیر مشترک هستند:

- دامنه احتمالی ورودی‌ها تعیین می‌گردد؛

- ورودی‌های متعلق به دامنه مذکور به صورت تصادفی تولید شده و معیار مورد نظر محاسبه می‌شود؛

نتایج به دست آمده از تک تک مراحل تکرار را با یکدیگر جمع کرده و نتیجه نهایی استخراج می‌گردد.

### ۳-۶-۱ شبیه‌سازی کامپیوتری

به فرآیند مدل‌سازی با استفاده از روابط ریاضی-منطقی و همچنین اجرای مدل به وسیله کامپیوتر، شبیه‌سازی کامپیوتری گویند. از جمله سیستم‌هایی که می‌شود توسط کامپیوتر آن‌ها را شبیه‌سازی کرد، می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- یک کارخانه تولیدی به همراه ماشین‌ها، پرسنل، وسایل حمل و نقل و فضاهای انبار؛
- یک بانک با انواع مختلف مشتریان، خدمت‌دهندگان و تسهیلاتی نظیر پنجره‌های پاسخگویی، ماشین‌های ATM، میزهای وام و...؛
- یک شبکه توزیع کالا از کارخانه‌ها، انبارها و شبکه‌های حمل و نقل؛



- تسهیلات اضطراری در یک بیمارستان، شامل افراد، اتاق‌ها، تجهیزات، موجودی‌ها و انتقال بیماران
- یک شبکه کامپیوتری متشکل از خدمت‌دهنده‌ها، میزبان‌ها، دیسک‌خوان‌ها، نوارخوان‌ها، چاپگرها،
- امکانات شبکه‌ای و کاربرها؛
- یک سوپر مارکت با قسمت‌های کنترل موجودی، بازرسی و خدمات به مشتری و بسیاری از سیستم‌های خدماتی و تولیدی دیگر.

## ۷-۱ اجزای مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد

### ۱-۷-۱ نهاد<sup>۱</sup>

اغلب شبیه‌سازی‌ها، شامل بازی‌کنانی است که نهاد نامیده می‌شوند، به اطراف حرکت می‌کنند، وضعیت را تغییر می‌دهند، تأثیر می‌گذارند، از سایر نهادها و وضعیت سیستم تأثیر می‌پذیرند و معیارهای عمل‌کرد خروجی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. نهادها اجزای پویا در شبیه‌سازی هستند. آن‌ها معمولاً ایجاد می‌شوند، برای مدتی به اطراف حرکت می‌کنند و سپس از بین می‌روند یا به عبارتی سیستم را ترک می‌کنند. هرچند ممکن است نهادهایی داشت که هرگز سیستم را ترک نمی‌کنند و مرتباً در سیستم گردش دارند. البته تمامی نهادها باید ایجاد شوند، یا به وسیله کاربر و یا به طور اتوماتیک توسط نرم‌افزار.

### ۲-۷-۱ خصوصیت<sup>۲</sup>

برای مشخص کردن نهادها، خصوصیت‌ها را به آن‌ها ضمیمه می‌کنیم. یک خصوصیت، ویژگی معمول همه نهادها است اما با یک مقدار مشخص که می‌تواند از نهادی به نهاد دیگر متفاوت باشد.

1 Entity  
2 Attribute

هر موجودیت خاص، مقدار مشخصه مربوط به خود را داراست. بعضی خصیصه‌ها به طور خودکار توسط نرم‌افزار تعریف می‌شوند و برخی دیگر توسط مدل ساز تعریف و مقادیری به آن اختصاص می‌یابند.

### ۳-۷-۱ منابع<sup>۱</sup>

نهادها معمولاً بر سر سرویس‌گیری از منابع که مواردی همچون پرسنل، تجهیزات و یا فضا در یک انبار با محدودیت اندازه رو به رو هستند، با یکدیگر رقابت می‌کنند. نهاد (واحدهایی از) یک منبع را زمانی که در دسترس باشد، اشغال می‌کند<sup>۲</sup> و زمانی که کارش تمام می‌شود، آن (یا آن‌ها) را رها می‌کند<sup>۳</sup>. بهتر است منبع را به نهاد بدهیم تا این‌که نهاد را به منبع تخصیص بدهیم. چرا که نهاد (مثلاً یک قطعه) ممکن است هم زمان به چند منبع نیاز داشته باشد (مثلاً یک ماشین و یک اپراتور).

### ۴-۷-۱ صف<sup>۴</sup>

زمانی که یک نهاد، مثلاً به علت این‌که به واحدی از منبع احتیاج دارد که در اختیار نهاد دیگری است، نمی‌تواند به مسیر خود ادامه دهد و نیاز به مکانی برای انتظار دارد که همان مفهوم صف است.

### ۵-۷-۱ زمان (ساعت شبیه‌سازی)

مقدار جاری زمان در شبیه‌سازی، به سادگی در متغیری به نام "ساعت شبیه‌سازی"<sup>۵</sup> نگهداری می‌شود. برخلاف زمان واقعی، ساعت شبیه‌سازی تمامی مقادیر را نمی‌پذیرد و به

---

1 Resources  
2 Seize  
3 Release  
4 Queue  
5 Simulation clock