Business Dynamics

تفکر سیستمی
و مدلسازی برای
یک دنیای پیچیده

جان استرمن

بنجامین فرانکلین:

تجربه مدرسه با ارزشی است.

آننونیموس:

تجربه چیزی است که شما بدست

می‌آورید بعد از اینکه به آن نیاز دارید

استاد: پریسا موسوی

تهیه کننده: عسگر صدیقی

بخش اول:فرایند و دورنمای آن ۷

فصل اول: مدل و مفاهیم مدلسازی ۸

۱-۱- مدل چیست؟ ۸

۱-۲- هدف از ساخت مدل چیست؟ ۹

۱-۳- معیارهای طبقه بندی مدله ۱۰

۱-۴- مدلهای ریاضی ۱۳

۱-۵- اعتبارسنجی مدل ۱۴

۱-۶- تکنیکهای مدلسازی ۱۵

۱-۷- تکنیک مورد استفاده برای مدلسازی ۱۷

فصل دوم: شناخت سیستمهای پیچیده ۱۸

۲-۱- مقدمه ۱۸

۲-۱-۱- علکس العمل متضاد سیستم به سیاست (Policy Resistance) ۱۹

۲-۱-۲- علل عکس العمل سیستم ۱۹

۲-۱-۳- بازخورد ۲۰

۲-۲- یادگیری یک فرایند بازخوردی ۲۱

۲-۳- موانع یادگیری ۲۳

۲-۳-۱- پیچیدگی رفتار سیستم ۲٤

۲-۳-۲- محدودیت اطلاعات ۲۵

۲-۳-۳- گنگ و مبهم بودن برخی متغییرها ۲۵

۲-۳-۴- عقلانیت محدود و درک نادرست از بازخورد ۲۵

۲-۳-۵- برداشتهای ناصحیح ۲٦

۲-۳-۶- استنباط غلط در رابطه با رفتار ۲٦

۲-۳-۷- استدلال غیر علمی ۲۷

۲-۳-۸- تعصبات و موانع شخصی در یادگیری ۲۷

۲-۳-۹- مشکلات اجرا ۲۷

۲-۴- نیازمندیهای یادگیری موفق در سیستمهای پیچیده ۲۷
۲-۴-۱- بهبود فرایند یادگیری: مزایای جهان مجازی ۲۷

۳- فصل سوم: فرایند مدلسازی ۲۹

۳-۱- هدف از مدلسازی: مدیران به عنوان طراحان سازمان ۲۹

۳-۲- مدلساز و مشتری مدل ۲۹

۳-۳- قدمهای مدلسازی ۳۰

۳-۴- مدلسازی به عنوان یک فرایند تکراری ۳۱

۳-۵- مرور فرایند مدلسازی ۳۳
۳-۵-۱- تعریف مسئله: اهمیت هدف ۳۳
۳-۵-۲- تعیین یک فرضیه و تئوری دینامیک ۳٤
۳-۵-۳- ساخت یک مدل شبیه سازی ۳۷
۳-۵-۴- تست مدل ۳۸
۳-۵-۵- طراحی و ارزیابی سیاست ۳۸

۴- فصل چهارم:ساختار و رفتار سیستمهای پویا ۳۹

۴-۱- حالتهای پایه رفتار پویا ۳۹
۴-۱-۱- رشد نمایی ٤۰
۴-۱-۲- رفتار هدفجو ٤۱
۴-۱-۳- رفتار نوسانی ٤۲
۴-۱-۴- Process Point ٤۳

۴-۲- تقابل بین رفتارهای پایه ۴۴
۴-۲-۱- رشد S شکل ٤٤
۴-۲-۲- رشد S شکل همراه با Overshoot ٤٥
۴-۲-۳- رفتار رشد بیش از حد و سقوط ٤٦

۴-۳- سایر حالات رفتار ۴۷
۴-۳-۱- تعادل ٤۷

بخش دوم: ابزارهایی برای تفکر سیستمی ۴۹

۵- فصل پنجم:نمودارهای علی و معلولی ۵۰

۵-۱- علائم مورد استفاده در ترسیم نمودار علی و معلولی ۵۰

۵-۲- راهنمای نمودارهای علی و معلولی ۵۲
۵-۲-۱- علیت در مقابل همبستگی ۵۲
۵-۲-۲- تعیین علامت روابط علی ۵۳
۵-۲-۳- تعیین علامت حلقه علی ۵۳
۵-۲-۴- نام حلقهها علی ۵۵
۵-۲-۵- مشخص نمودن تاخیرهای مهم در روابط علی و معلولی ۵۶
۵-۲-۶- نامهای متغیر ۵۷
۵-۲-۷- نکاتی چند در رابطه با ساختار نمودار علی و معلولی ۵۹
۵-۲-۸- انتخاب مناسبترین سطح جزئیات ۵۹
۵-۲-۹- تمام حلقههای بازخوردی را در یک نمودار بزرگ قرار ندهید ۶۰
۵-۲-۱۰- اهداف(حالت تعادل) حلقههای علی منفی را مشخص نمائید ۶۰
۵-۲-۱۱- تمایز بین شرایط واقعی و درک شده ۶۱

۵-۳- ترسیم نمودار علی و معلولی با استفاده از دادههای حاصل از مصاحبه ۶۱

۶- فصل شش: حالتها و جریانها ۶۳

۶-۱- حالتها، جریانها و انباشتگی ۶۳
۶-۱-۱- سمبلهای مورد استفاده در ترسیم حالتها و جریانها ۶۴
۶-۱-۲- نمایش ریاضی حالتها و جریانها ۶۶
۶-۱-۳- نقش حالتها در ایجاد دینامیک سیستم ۶۷

۶-۲- مشخص نمودن متغیرهای حالت و جریان ۶۸
۶-۲-۱- واحدهای اندازهگیری برای متغیرهای حالت و جریان ۶۹
۶-۲-۲- تست تصویر لحظهای ۶۹
۶-۲-۳- حفظ مواد در شبکههای متغیر حالت و جریان ۷۱
۶-۲-۴- سیستمهای بر پایه متغیر حالت ۷۱
۶-۲-۵- متغیرهای کمکی ۷۲
۶-۲-۶- متغیرهای حالت تنها از طریق متغیرهای جریان تغییر میکنند ۷۲
۶-۲-۷- زمان پیوسته و متغیرهای جریان آنی ۷۳
۶-۲-۸- متغیرهای جریان پیوسته در مقابل گسسته ۷۴
۶-۲-۹- نکته عملی: ترسیم متغیرهای حالت و جریان بصورت عملی ۷۴

۶-۳- ترسیم متغیرهای حالت و جریان ۷۴
۶-۳-۱- میزان کلیات و جزئیات در ترسیم نمودارهای حالت-جریان ۷۴
۶-۳-۲- راهنمای تعیین سطح کلیات یا جزئیات مدل ۷۵

۷- فصل هفتم: دینامیک حالتها و جریانها ۷۷

۷-۱- ارتباط بین متغیرهای جریان و حالت..... ۷۸
۷-۱-۱- تعادل استاتیک و دینامیک (ایستا و پویا) ۷۸
۷-۱-۲- حساب دیفرانسیل و انتگرال بدون ریاضیات ۷۸
۷-۱-۳- انتگرال گیری گرافیکی..... ۸۰
۷-۱-۴- مشتق گیری گرافیکی ۸٤

۸- فصل هشتم: دینامیک ساختارهای ساده ۸۶

۸-۱- سیستمهای درجه یک ۸۶

۸-۲- بازخورد مثبت و رشد نمایی ۸۷
۸-۲-۱- تحلیل سیستم درجه یک خطی بصورت ریاضی..... ۸۸
۸-۲-۲- تحلیل سیستم درجه یک خطی یک بازخورد مثبت بصورت گرافیکی ۸۹
۸-۲-۳- قدرت بازخورد مثبت: زمانهای دوبرابر شدن متغیر حالت(قانون ۷۰)..... ۹۰
۸-۲-۴- عدم درک صحیح از رشد نمایی..... ۹۰
۸-۲-۵- نقطه نظر: غلبه اطمینان بیش از حد ۹۳

۸-۳- بازخورد منفی و رفتار تنزل نمایی ۹۳
۸-۳-۱- زمان تعدیل و مدت زمان نصف شدن مقدار سیستم ۹۸

۸-۴- سیستمهای چند حلقهای ۹۹

۸-۵- سیستمهای درجه یک غیرخطی: رشد S شکل..... ۱۰۲
۸-۵-۱- تعریف رسمی حلقه غالب..... ۱۰۵
۸-۵-۲- سیستمهای درجه یک نمیتوانند رفتار نوسانی داشته باشند ۱۰٦

۹- فصل نهم: رشد S شکل : بیماریهای همهگیر، اشاعه نوآوری و رشد و توسعه محصولات جدید ۱۰۷

۹-۱- مدل سازی رشد S شکل..... ۱۰۷
۹-۱-۱- رشد منطقی..... ۱۰۸
۹-۱-۲- راه حلهای آنالتیک (جبری) برای معادلات رشد منطقی..... ۱۰۹

فصل ۱۰: تاخیرها ۱۱۱

۱۰-۱- تاخیرها: یک مقدمه..... ۱۱۱
۱۰-۱-۱- تعریف تاخیرها ۱۱۱

۱۰-۲- تاخیرهای مواد: ساختار و رفتار ۱۱۳
۱۰-۲-۱- میانگین مدت زمان تاخیر چقدر است؟ ۱۱٤
۱۰-۲-۲- توزیع خروجی در اطراف میانگین زمان تاخیر چگونه خواهد بود؟ ۱۱٤
۱۰-۲-۳- تاخیر لولهای ۱۱٥
۱۰-۲-۴- تاخیر مواد درجه یک ۱۱٥
۱۰-۲-۵- تاخیرهای مواد درجه بالاتر ۱۱٦

۱۰-۳- تاخیرهای اطلاعاتی: ساختار و رفتار ۱۱۷
۱۰-۳-۱- مدلسازی ذهنیت و دریافت: دریافت تطبیقی و هموارسازی نمایی ۱۱۸
۱۰-۳-۲- تاخیرهای اطلاعاتی درجه بالاتر ۱۱۹

۱۰-۴- عکسالعمل نسبت به زمانهای تاخیر متغیر ۱۲۱
۱۰-۴-۱- زمانهای تعدیل غیرخطی: ۱۲۲

۱۰-۵- تخمین مدت زمان و توزیع تاخیر ۱۲۲
۱۰-۵-۱- تخمین تاخیرها هنگامی که دادههای عددی در دسترس میباشند ۱۲۲
۱۰-۵-۲- تخمین تاخیرها هنگامی که دادههای عددی در دسترس نیستند ۱۲۳

۱۰-۶- ریاضیات تاخیرها: تاخیرهای کویک و توزیعهای ارلانگ ۱۲۴
۱۰-۶-۱- فرمولاسیون کلی تاخیرها ۱۲٤

بخش اول:فرایند و دورنمای آن

در این بخش دیدگاه جهانی سیستم داینامیک و فرایند استفاده از آن در دنیای واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل اول مفاهیم مدل و مدلسازی مورد بررسی قرار گرفته سپس در فصل دوم ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده و علت اینکه درک رفتار اینگونه سیستم‌ها مشکل است مطالعه می‌شود. در فصل سوم فرایند استفاده از سیستم داینامیک با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار گرفته و نحوه تعامل مدلساز و مشتری مدل برای ساختن مدلی کاربری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل چهارم رفتارهای پایه‌ای که رفتارهای پیچیده دینامیک را ایجاد می‌کنند مطالعه می‌شوند.

فصل اول: مدل و مفاهیم مدلسازی

مدل یکی از مفاهیمی است که همهٔ افراد بشر از کودکی با آن آشنا بوده و ناخودآگاه از آن استفاده نموده‌اند. به عنوان مثال، اغلب افراد در زمان کودکی حرکت مورچه را درون ماز[1] مشاهده نموده‌اند. ماز یک مدل ساده از لانه مورچه است که کودک را در درک رفتار مورچه در لانهٔ واقعی‌اش کمک می کند. همچنین تصمیماتی که افراد در طول شبانه روز اتخاذ می‌کنند نمونه بارز دیگری از مفهوم مدل و مدلسازی است. زیرا شخص با استفاده از برداشت ذهنی خود از واقعیت تصمیم‌گیری می‌کند و به مرور زمان با مشاهده نتایج تصمیمات، مدل ذهنی خود را توسعه می‌دهد. این روش که از طریق انجام مشاهده و تجربه، آموزش می دهد، قویترین روش یادگیری است.

امروزه، با پیشرفت علم، مدلسازی همانند سایر مفاهیم، پیچیدگی‌هایی پیدا کرده‌است. به همین دلیل در این فصل ابتدا مفهوم مدل و هدف از ساخت مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس به روشهای مختلف ساخت مدل و طبقه‌بندی‌های موجود برای مدلها، اشاره می‌شود و در نهایت جایگاه روش شناسی و تکنیک مورد استفاده در این در از نظر تقسیم بندی‌های مختلف مدلسازی، مورد بررسی قرار خواهدگرفت.

۱-۱- مدل چیست؟

"مدل تصویر ساده شده ای از جهان واقعی است که در حد فهم سازنده آن از واقعیت شکل می گیرد". برای درک کامل این تعریف، به مرور کلیه عبارات آن پرداخته می‌شود.

[1] -Maze: جای پرپیچ و خم، پلکان مارپیچ

●مدل" *تصویر*" ساده شده ای از جهان واقعی در حد فهم سازنده آن است. این بدان معناست که مدل، خود واقعیت نیست بلکه تصویری از آن است. وقتی که مفهوم تصویر مطرح می شود، زاویه دید اهمیت پیدا می کند. مثلاً یک تصویر اگر دو بعدی باشد بخشی از واقعیت را منعکس می کند در حالیکه اگر سه بعدی باشد قسمت بیشتری از واقعیت را نشان خواهد داد. مدلها نیز با توجه به نوع نگاه به موضوع و زاویه دید، دارای انواع مختلفی هستند و هر نوع نیز انعکاس دهنده بخشی از واقعیت می‌باشند.

●مدل "تصویر *ساده شده ای*" از جهان واقعی در حد فهم سازنده آن است. این بدان معناست که یک مدل تنها برخی قسمت‌های واقعیت را که برای موضوع مورد نظر مناسب است در بر می‌گیرد. در واقع، وارد کردن همه متغیرها باعث پیچیده شدن سیستم شده و این کار موجب پنهان ماندن سازوکارهای کلیدی سیستم و در نتیجه عدم تحلیل صحیح سیستم می گردد. میزان و نوع متغیرهای لازم برای بررسی سیستم با توجه به کاربرد هر مدل، تعیین می گردد.

●مدل تصویر ساده‌شده ای از "*جهان واقعی*" در حد فهم سازنده آن است. یعنی مدلها برای نشان دادن جهان فیزیکی به‌کار می روند نه برای نمایش دادن ساختار متافیزیکی آن.

●مدل تصویر ساده شده ای از جهان واقعی *"در حد فهم سازنده آن"* است. آگاهی بشر از واقعیت محدود است، بنابراین نمی‌توان مدلی از واقعیت همانند آنچه هست ایجاد کرد. هرچه دانش بشر از جهان افزایش یابد، کیفیت مدلهای طراحی شده نیز بیشتر خواهد شد. همچنین استفاده از مدلها، باعث افزایش درک شخص از واقعیت می شود و افزایش درک شخص از واقعیت، وی را به سمت مدلسازی بهتر هدایت می کند. لذا برهمکنش متقابلی بین دانش و معرفت بشر و فرآیند ساخت مدل وجود دارد.

۱-۲- هدف از ساخت مدل چیست؟

همان‌گونه که از تعریف مدل نیز مشخص است، مهمترین هدف از مدلسازی، کسب دانش در مورد رفتار سیستم واقعی است. در واقع مدل ابزار مناسبی برای بررسی تصمیمات مختلف و آثار و نتایج حاصل از آن‌ها می‌باشد. همچنین در مواردی که انجام آزمایش در سیستم های فیزیکی ممکن نباشد (مانند بررسی اثرات رشد تکنولوژی در تولید ناخالص ملی) و یا آزمایش سیستم های واقعی هزینه بالایی داشته باشد (مانند ساخت و عملیاتی کردن نیروگاه‌ها برای مقایسه هزینه‌هایشان) معمولاً از مدل استفاده می شود.

از دیگر اهداف مدلسازی، اتخاذ تصمیمات مناسب در کوتاهترین زمان است. زیرا با استفاده از مدل روابط درون سیستم ترسیم شده و به این ترتیب رفتار سیستم را می توان پیش بینی کرد[۱].

مدلسازی، فرآیند ایجاد مدل و به کارگیری آن برای مسائل علمی است. مدلها به روش‌های مختلفی ایجاد می-شوند، در این بخش به معرفی دیدگاه‌های مختلفی که در ساخت مدل مورد توجه قرار می‌گیرد، پرداخته می‌شود. با توجه به مجهولی که مدلساز در پی یافتن آن است، ساختارهای متفاوتی در مدلسازی مورد توجه قرار گرفته است که در ادامه، هر یک مورد بررسی قرار می گیرند.

۱-۳- معیارهای طبقه بندی مدل‌ها

به دلیل گستردگی انواع مدل‌ها، طبقه بندی انواع مدلها بر اساس معیارهای مختلفی صورت گرفته‌است که در ادامه، هر یک به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱ - طبقه بندی براساس نحوه مدلسازی

مدل‌های مادی[۱]: این مدلها بیشتر در علوم تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرند و نمایش کوچکی از سیستم واقعی هستند. آزمایشاتی که در علوم مختلف از جمله فیزیک، شیمی، زیست شناسی و ... انجام می گیرد از این دسته است.

مدل‌های ذهنی[۲] : مدلی که در ذهن از واقعیات بیرون ساخته می شود، مدل ذهنی نامیده می شود مانند تفکر درباره اقتصاد یک کشور و مجسم نمودن آن در ذهن. این مدلها محدود و ضعیف می باشند؛ زیرا تعداد عواملی که می توان به طور همزمان در یک مدل ذهنی مجسم نمود محدود می‌باشد، بنابراین استنتاج حاصل از این مدلها غیرقابل اعتماد است. از سوی دیگر انتقال این مدلها به دیگران نیز دشوار است. لذا این مدلها به خودی خود معمولاً ارزش استفاده ندارند؛ بلکه پایه ای برای مدلهای دقیقتر از جمله مدلهای ریاضی می باشند[۲].

مدل‌های تشریحی[۳] : در این مدلها، ذهنیات شخص در قالب عبارات و جملات در آمده و به صورت مکتوب ارائه می‌شود. علوم اجتماعی و سیاسی معمولاً در این قالب ارائه می شوند. استنتاج از این مدلها نیز ضعیف است.

---

۱ - Material Models
۲ - Mental Models
۳ - Verbal Models

مدل‌های ریاضی[۱] : در این‌گونه مدلها، عوامل و روابط بین پارامترهای مدل با علائم ریاضی نشان داده می شود. در این‌گونه مدلها هیچ‌گونه ابهامی وجود ندارد و تعداد عوامل مدل می تواند زیاد باشد و از این نظر هیچ‌گونه محدودیتی در آن وجود ندارد. نتایج حاصل از این مدلها دقیق است و چون براساس منطق ریاضی به دست آمده قابل استفاده می‌باشد. از خصوصیات این مدلها، پیچیدگی آن‌ها، نسبت به انواع دیگر مدلها می باشد[۳].

۲ – طبقه بندی براساس محتوا

مدل‌های علی[۲]: روابط علت و معلولی میان پدیده‌ها را بیان می‌کنند. دو عامل B,A دارای یک رابطه علت و معلولی می باشند اگر تغییر در A موجب تغییر در B گردد به شرطی که سایر عوامل ثابت باشند. روابط علت و معلولی می‌توانند مثبت و منفی باشند. اگر علت در یک جهت حرکت کند و معلول هم در همان جهت حرکت نماید در آن‌صورت به آن یک رابطهٔ علت و معلولی مثبت گفته می شود. اگر علت در یک جهت حرکت کند و معلول در جهت مخالف آن حرکت نماید به آن یک رابطه علت و معلولی منفی گفته می شود.

به مدل‌های علی که به تشریح این روابط می پردازند مدل‌های مفهومی[۳] نیز گفته می‌شود. در این مدل‌ها موضوع مورد نظر از دیدگاه پدیده‌شناسی[۴] مورد بررسی قرارگرفته و روابط اجزای درون سیستم به طور جزئی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مدل‌ها به سیستم به عنوان یک جعبه سفید[۵] (که درون آن مشخص است) نگاه می شود.

مدل‌های توصیفی[۶]: در این مدل‌ها روابط بین پدیده‌ها به صورت تجربی مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در یک مدار الکتریکی با تغییر ولتاژ، جریان نیز تغییر خواهد کرد. رسم داده های حاصل از این آزمایش با استفاده از یک رگرسیون خطی ساده نشان می دهد که جریان متناسب با ولتاژ تغییر می کند اما بیان این موضوع به این معنا نیست که ولتاژ و جریان با یکدیگر رابطه علت و معلولی دارند.

---

۱ - Mathematical models
۲ - Causal models
۳ - Conceptual models
۴ - Phenomenological
۵ – White box
۶ - Descriptive models

این رابطه تنها ارتباط ورودی و خروجی را بدون توجه به فرآیندهای درونی سیستم بررسی می‌کند. یعنی این مدل‌ها به سیستم به عنوان یک جعبه سیاه[۱] نگاه می‌کنند و به اجزاء درون سیستم و ارتباط آن‌ها با یکدیگر نمی‌پردازند. در این مدل‌ها رابطه ورودی و خروجی بر پایه همبستگی آماری است که از طریق روش‌هایی از قبیل تکنیک‌های رگرسیون شکل می گیرد[۴] .

۳- طبقه بندی براساس نوع کاربرد مدل‌ها

مدل‌های شبیه سازی [۲] : در این مدل‌ها، وضعیت فعلی سیستم با توجه به روندها و رفتارهای گذشته مدل می‌شود تا درک بهتری از رفتار سیستم واقعی حاصل شود. در مدل‌های فوق معمولاً برای سیستم هدفی تعریف می‌شود و سایر متغیرها برای رسیدن به آن هدف تغییر می‌کنند. این مدل‌ها را اصطلاحاً مدل‌های هدف محور[۳] می نامند.

مدل‌های بهینه‌یابی[۴] : این مدل‌ها در صدد پاسخگویی به این سئوال هستند که چگونه می‌توان به حالت مطلوب در بهترین شرایط آن دست یافت. در این مدل‌ها نیز با شناخت رفتار سیستم، نقاط بهینه یک منطقه موجه با توجه به یک تابع هدف از پیش تعیین‌شده شناخته می‌شود.

پس از مرور اجمالی دیدگاه‌های مختلفی که در ساخت مدل وجود دارد، در این بخش به معرفی تکنیک‌هایی که به کمک آن‌ها ساختار ریاضی یک مدل شکل گرفته و مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد اشاره خواهد شد. انتخاب هر یک از این تکنیک‌ها با توجه به داده های در دسترس و انتظارات مدلساز از مدل صورت می گیرد.

از میان مدل‌های معرفی شده، مدل‌هایی برای کاربردهای پیشرفته و پیچیده، مفید می‌باشند که بتوان با استفاده از آن‌ها تعداد زیادی از متغیرها و نیز روابط پیچیدهٔ میان آن‌ها را مدل کرد. علاوه بر این چون این مدل‌ها برای تصمیم-گیری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند باید قدرت استنتاج بالایی داشته باشند. با این تفاسیر مدل‌های ریاضی مفیدتر به نظر می‌رسند، لذا در این بخش به معرفی دقیق این مدلها پرداخته می شود.

---

۱ - Black box
۲ - Simulation Models
۳ - Objective oriented
۴ - Optimization Models

۱-۴- مدل‌های ریاضی

امروزه مدل‌های ریاضی پیشرفت‌های فراوانی داشته‌اند و دسته‌بندی‌های زیادی در این مدل‌ها ایجاد شده است، در ادامه به این دسته‌بندی‌ها اشاره می‌شود.

٤ – طبقه‌بندی براساس درجه قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل

مدل‌های قطعی[۱] : در یک مدل قطعی، متوسط رفتار متغیرها در مشاهدات مختلف، مدل می‌شود. در این مدل‌ها، توزیع احتمال متغیرها در نظر گرفته نمی‌شود بلکه مقدار متوسط آن‌ها منظور می‌شود . این مدل‌ها بیشتر در مواردی که قانون فیزیکی مشخصی وجود داشته‌باشد، مفید می‌باشند چون در این موارد پراکندگی داده‌ها بسیار ناچیز می‌باشد.

مدل‌های تصادفی[۲]: در این مدل‌ها، فرآیند ساخت مدل بر پایهٔ این فرض بناشده‌است که داده‌هایی که از آن‌ها برای فرآیند مدلسازی استفاده می‌شود دارای یک توزیع احتمال مشخص می‌باشند. به این ترتیب با داشتن توزیع احتمال متغیرها، می‌توان توزیع احتمال خروجی را نیز به دست‌آورد. این مدل‌ها امروزه توسعهٔ فراوانی یافته‌اند و ابزارهای مختلفی برای آن‌ها به وجود آمده‌است که از جمله این ابزارها می‌توان به زنجیرهٔ مارکوف، تئوری صف و ... اشاره کرد.[۵]

٥ – طبقه بندی براساس نوع برخورد با زمان

مدل‌های ایستا[۳] : در این مدل‌ها، تصویری از سیستم واقعی در یک نقطه زمانی تهیه می‌شود. مشخصه اصلی این مدل‌ها، حذف عنصر زمان از فرمول‌بندی مدل می‌باشد. این مدل‌ها معمولاً در سیستم‌های در حال تعادل و پایا مفید می باشند.

مدل‌های پویا [۴]: در این مدل‌ها، تغییرات سیستم در طول زمان و با کمک معادلات دیفرانسیلی یا معادلات تفاضلی (با توجه به اینکه زمان به صورت پیوسته یا گسسته منظور شود) بررسی می شود.

---

۱ - Deterministic models
۲ - Stochastic models
۳ - Static Models
۴ - Dynamic Models

٦ – طبقه بندی براساس نوع روابط مدل

مدل‌های خطی[1] : مدل‌هایی که در آن ها روابط بین متغیرها خطی باشد مدل‌های خطی نامیده می شوند. این مدل‌ها به دلیل سادگی، در مدلسازی‌های اولیه کاربردهای فراوانی یافته‌اند.

مدل‌های غیرخطی[2] *:* مدل‌هایی که روابط بین متغیرها را به صورت غیرخطی نمایش می دهند، مدل‌های غیرخطی نامیده می‌شوند. این مدل‌ها دارای پیچیدگی‌های زیادی هستند، لذا در بسیاری از موارد سعی می شود تا آن‌ها را به مدل‌های خطی تبدیل کرده و سپس از آن‌ها استفاده کرد.

مدل‌های ترکیبی[3] *:* مهم‌ترین ویژگی این مدل‌ها، وجود بازخورد[4] درون مدل می باشد. در این مدل‌ها، تأثیر نتایج هر پدیده برخود آن پدیده بررسی می‌شود. یعنی یک متغیر پس از اینکه موجب تغییر عوامل دیگر می شود از طریق تأثیر بر آن عوامل موجب تغییر در خودش نیز می شود. این مدل‌ها دارای عمق و پیچیدگی بیشتری هستند. در این مدل‌ها ممکن است روابط، خطی یا غیرخطی باشند.

۱-۵- اعتبارسنجی[5] مدل

یکی از دغدغه‌های اساسی مدل‌سازان ارزیابی میزان اعتبار مدل و تطابق آن با واقعیت می‌باشد. همان‌طورکه در تعریف مدل ذکر شد، مدل تصویر ساده شده‌ای از یک سیستم واقعی است، به همین دلیل ارزیابی یا اعتبارسنجی مطلق یک مدل ممکن نیست. لذا اعتبارسنجی مدل به صورت نسبی انجام می‌شود و عملکرد مناسب یک مدل در رابطه با هدف آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش‌هایی که به‌طور عمومی برای سنجش اعتبار همه مدل‌ها می توان اعمال کرد به این شرح می‌باشد:

- با طراحی سناریوهای مختلف ساختار مدل آزمایش شود. مدلی ساختار درستی دارد که با اعمال شرایط مختلف، پاسخ‌های معقولی تولید کند.

---

[1] - Linear Models
[2] - Nonlinear Models
[3] - Cybernetic Models
[4] - Feed Back
[5] –Validation

- آزمایش روابط به کمک تست‌های آماری (درجه توزیع آماری خوب به معنی وجود رابطهٔ علت و معلولی نیست؛ بلکه به معنی آن است که روابط تخمین زده‌شده آماری، قابل اعتماد هستند).
- تولید مجدد رفتار گذشته سیستم واقعی با کمک مدل و مقایسه آن با اطلاعات تاریخی.
- بررسی رفتار مدل با توجه به انتظارات و نیز بررسی رفتار مدل در کران‌های سیستم
- ارزیابی مدل به وسیله متخصصین و تصمیم‌گیران.

۱-۶- تکنیک‌های مدلسازی

تکنیک‌های مدلسازی با توجه به نوع کارکردشان دارای انواع مختلف می باشند که برخی از آنها در زیر معرفی شده است.

اقتصادسنجی[۱] : این روش که بر پایه آمار بنا شده است رابطه میان متغیر وابسته (y) و متغیر مستقل (x) را بررسی می کند به‌طوریکه: $Y=F(x)+u$ (۱-۱)

Y بردار متغیرهای وابسته، x بردار متغیرهای مستقل و u بردار خطاها می باشد که امید ریاضی خطا در یک معادله باید صفر باشد تا معادله مورد نظر از اعتبار لازم برخوردار باشد. این روش بیشتر برای برقراری ارتباط میان نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مشاهدات مختلف در یک سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. البته در تعیین رابطه متغیرهای مختلف به لحاظ آماری ممکن است مشکلاتی پیش بیاید. از قبیل همبستگی، ناهمسانی واریانس[۲] و ..... که با پیشرفت روزافزون علم آمار، این مشکلات نیز مرتفع گشته است. این روش امروزه توسعه بسیاری یافته‌است و در علوم اقتصادی کاربردهای فراوانی دارد و به عنوان ابزار اساسی دردست اقتصاددانان برای سنجش روابط اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آنالیز سری های زمانی و روندها[۳] : این روش نیز از جمله روش‌های متکی بر آمار می‌باشد و روند متغیرها را در بستر زمان مورد بررسی قرار می‌دهد. $Y_t = f(t)$ (۲-۱)

---

۱ -Econometrics

۲- Homoscedasticity یکی از مهمترین فرض‌های مدل رگرسیون خطی این است که اجزای اخلال(u) که در تابع رگرسیون ظاهر می شوند دارای واریانس همسان می‌باشند. صادق نبودن چنین فرضی به نام خطای هموسکدستیسیتی یا ناهمسانی واریانس شناخته می شود.

۳ -Time series

داده‌های تاریخی حاصل از مشاهدات و تجزیه و تحلیل آن‌ها پایه ای برای تصمیم‌گیری، برنامه ریزی و پیش-بینی فراهم می آورد. یک مدل سری زمانی، مرکب از چهار جزء اصلی است که عبارتند از:

۱- جزء روند : این جزء تحولات بلند مدت اعم از رشد، نزول یا رکورد را نشان می‌دهد.

۲- جزء فعالیت اقتصادی : حرکت چرخه ای رشد اقتصادی در طول سال‌های متمادی را نمایش می‌دهد.

۳- جزء فصلی : تحول تناوبی تکرارشونده در یک سال با استفاده از این جزء بیان می‌شود.

۴- جزء تصادفی یا نامنظم : سایر تحولات سری‌های زمانی که تصادفی و نامنظم هستند توسط این جزء نشان داده می شود.

یک مدل سری زمانی ترکیبی از چهار جزء فوق می‌باشد.

آنالیز داده- ستانده: داده- ستانده مدلی است شامل یک سیستم از معادلات همزمان که سطوح تعادل همهٔ صنایع را نشان می دهد. از محاسن این روش انعطاف زیاد آن است؛ به طوریکه می‌توان با فرض‌های خاص اقتصادی مکمل، پویایی را وارد معادلات کرد و سیستم معادلات دیفرانسیل یا معادلات تفاضلی را به‌دست آورد. البته باید توجه داشت که این روش براساس این فرضیه بنا شده‌است که امکان جایگزینی نهاده‌های مختلف با یکدیگر وجود ندارد، بعضی از صاحب‌نظران به همین دلیل آن را فاقد اعتبار کافی می‌دانند.

سیستم دینامیک[۱]: این روش بر پایه ساختار مدارکنترلی بنا شده‌است و امکان مطالعه ساختار و رفتار سیستم-های پیچیده اقتصادی، اجتماعی، زیستی و فنی را فراهم می‌کند. در این روش سیستم‌های پیچیده واقعی توسط باز-خوردهای متعدد، تأخیر زمانی، ذخیره‌سازی و از طریق معادلات دیفرانسیل مربوط به هم توصیف می‌شوند. هدف سیستم‌های پویا، پیش‌بینی کمی آینده نیست بلکه به دنبال دست یافتن به دانش وسیع در مورد ارتباطات دینامیکی متقابل میان سیستم های اجتماعی، اقتصادی، زیستی و فنی می‌باشد[۵].

برنامه‌ریزی ریاضی[۲]: این روش که برای یافتن نقطه بهینه (بهینه‌یابی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، شامل یک تابع هدف می باشد که در این تابع متغیر وابسته باید بیشینه یا کمینه شود و متغیرهای مستقل تعیین کننده مقدار تابع

---

۱ -System Dynamic

۲ - Mathematical Programming

هدف می باشند . مقدار متغیرهای مستقل نیز با توجه به محدودیتهای موجود تعیین می شود. یعنی در یک مسأله برنامه ریزی ریاضی مقدار تابع هدف به شرط برآورده شدن مجموعه محدودیتهای حاکم بر سیستم ماکسیمم یا مینیمم می شود . به عنوان مثال یک مسأله برنامه ریزی ریاضی به این ترتیب مطرح می‌شود.

$$\begin{aligned} &\max \quad w = f(x,y) \\ &\textit{subject to} \quad g(x,y) = c \\ &x, y \geq 0 \end{aligned} \qquad (۳-۱)$$

با توجه به این‌که معادلات مربوط به تابع هدف یا محدودیت‌ها، خطی یا غیرخطی باشند روش‌های مختلفی برای حل یک مسأله برنامه‌ریزی ریاضی وجود دارد. اگر هر دو معادله (تابع هدف و محدودیت‌ها) خطی باشند روش سیمپلکس به عنوان روش حل مسأله استفاده می شود و در صورتی‌که یکی از این دو غیرخطی باشند سایر روش‌ها از قبیل قضیهٔ کوهن– تاکر[۱] مورد استفاده قرار می گیرد.

برنامه‌ریزی پویا[۲] : این روش یک روش ریاضی است که برای بهینه‌یابی فرآیندهای چند مرحله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که امکان شکستن تصمیمات به اجزاء کوچکتر[۳] و ترکیب[۴] دوبارهٔ تصمیمات اخیر در فرم جدید برای رسیدن به جواب مطلوب وجود داشته باشد. این روش، حل چند مرحله‌ای مسأله نامیده می شود و برنامه ریزی پویا یک تکنیک سیستماتیک برای رسیدن به جواب چنین مسائلی است.

۱-۷- تکنیک مورد استفاده برای مدلسازی

با توجه به توضیحات فوق در رابطه با تقسیم بندی‌های مختلف برای مدل‌ها و وجود تکنیک‌های مختلف مدلسازی در زمینه مدل‌های ریاضی، در ادامه به معرفی و تشریح نوع مدل و تکنیک مورد استفاده برای مدلسازی در این درس پرداخته خواهد شد. تکنیک سیستم داینامیک از نوع مدل‌های شبیه‌سازی است.

---

۱ -Kuhen- Tucker
۲ - Dynamic Programming
۳ - Decomposition
۴ - Composition

فصل دوم: شناخت سیستم‌های پیچیده

بنجامین فرانکلین: تجربه مدرسه با ارزشی است.

آننونیموس: تجربه چیزی است که شما بدست می‌آورید بعد از اینکه به آن نیاز دارید.

۲-۱- مقدمه

بزرگترین ثابت تغییر است. شتاب موجود در تغییرات تکنولوژی ، جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی منجر به تغییر در جهان از حالت ثابت و یکنواخت به حالتی پویا گردیده است- تأثیر تکنولوژی اطلاعات بر استفاده از تلفن و یا تأثیر گازهای گلخانه‌ای بر وضعیت آب و هوا-برخی از تغییرات فوق برای بشر خطرناک بوده و برخی نیز مفید می‌باشند. برخی مواقع عکس العمل ما برای حل مسئله منجر به وخیم‌تر شدن اوضاع می‌شود.

در تفکر سیستمی با استفاده از ابزارها و فرایندهای معرفی شده، درک رفتار سیستم‌های پیچیده ممکن شده و به تبع آن در تصمیم گیری‌ها، سیاستهای مناسب اتخاذ می‌شود تا بتوان تغییرات را در مسیر صحیح هدایت نمود. البته درک رفتار سیستم‌های پیچیده هنگامی که خود نیز جزئی از آن سیستم می‌باشیم کاری مشکل است. سیستم داینامیک مانند یک شبیه ساز پرواز برای آموزش خلبانان برای درک رفتار سیستم‌های پیچیده مناسب است. برای بررسی رفتار سیستم در سیستم داینامیک از ابزارهایی برای ساخت مدلهای ریاضی استفاده می‌شود.

سیستم داینامیک بر پایه تئوری دینامیک غیرخطی و کنترل بازخوردی در ریاضیات، فیزیک و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در سیستم داینامیک ابزارهای فوق برای مدل نمودن رفتار انسان مورد

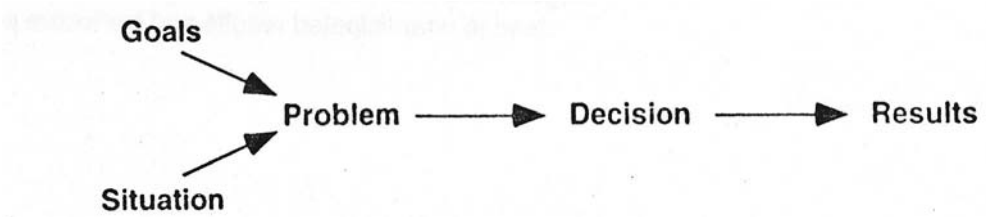
استفاده قرار می‌گیرند لذا سیستم داینامیک بر علوم جامعه شناسی، اقتصاد و سایر علوم اجتماعی بنا نهاده شده است. با توجه به اینکه در سیستم داینامیک، ما مسائل و مشکلات جهانی واقعی را مدل می‌کنیم لذا باید نحوه دسته بندی تغییرات سازمان و نحوه تعامل مؤثر با افراد سیاست گذار را بدانیم.

در این بخش در رابطه با مهارت‌های لازم جهت توسعه تفکر سیستمی ، نحوه درک رفتار سیستم‌های پیچیده و نحوه استفاده از سیستم داینامیک جهت حل مشکلات سازمان بحث خواهد شد. درک رفتار سیستم‌ها مشکل است چرا که رفتار سیستم متأثر از بازخوردهای داخل سیستم می‌باشد. برای درک مناسب از رفتار سیستم نیاز به (۱): ابزارهایی جهت ارائه مدل ذهنی ما از مسائل پیچیده سازمان (۲): استفاده از ابزارهای شبیه سازی جهت تست مدل ذهنی، طراحی سیاست‌های جدید و بررسی نتایج حاصل از آنها است.

۲-۱-۱- عکس العمل متضاد سیستم به سیاست (Policy Resistance)

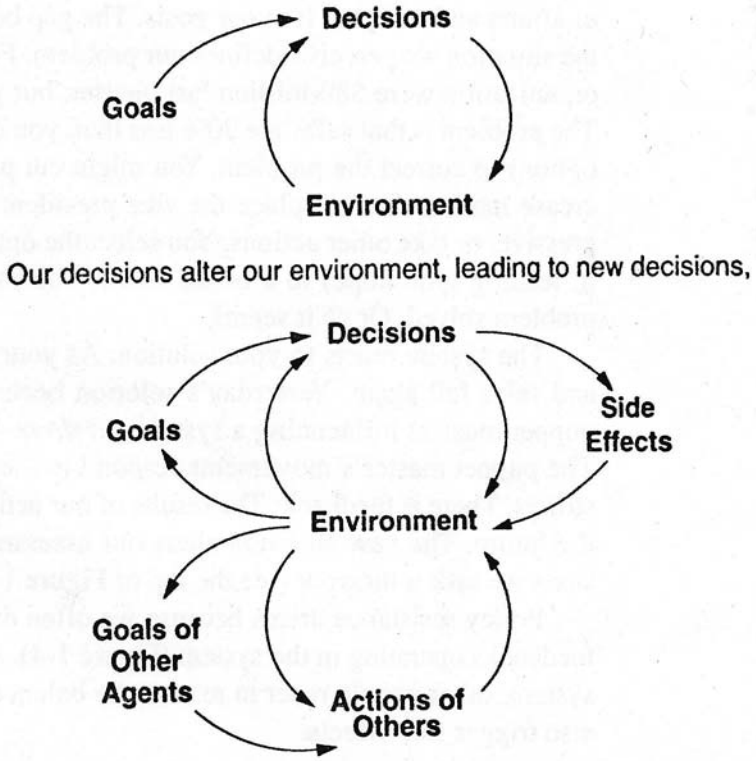
۲-۱-۲- علل عکس العمل سیستم

علت علکس العمل متضاد سیستم به سیاست‌های اعمال شده در این است که ما معمولاً علاقه‌مندیم تجربیات خود را بصورت سری از وقایع تفسیر نمائیم . به عنوان مثال "موجودی انبار افزایش یافت" و یا " فروش کاهش یافت" بدین ترتیب سعی می‌نماییم با ساده‌ترین مسیر ممکن واقعه فوق را برطرف نماییم. در صورتی که ممکن است افزایش موجودی بدلیل کاهش فروش و آنهم بدلیل کاهش قیمت محصول رقبای ما باشد و خود کاهش قیمت رقبا نیز به صورت سلسله وار دارای دلایل دیگری باشد. بنابراین نگرش واقعه گرا منجر به اتخاذ روش‌های واقعه گرا برای حل مسائل می‌شود.



شکل (۲-۱): نگرش واقعه گرا برای حل مسائل

در عالم واقعیت عملکرد ما منجر به بازخوردهایی می‌شود که وضعیت ما را نسبت به گذشته تغییر می‌دهد. بدین ترتیب عکس العمل متضاد سیستم به سیاست‌های ما افزایش خواهد یافت چراکه ما تمام محدوده بازخوردهای ممکن را در سیستم در نظر نمی‌گیریم. معمولاً ما اثراتی را که انتظار داریم مدنظر قرار می‌دهیم و از اثراتی که برای ما قابل پیش بینی نبودند صرف نظر می‌کنیم. بنابراین عکس العمل متضاد سیستم معمولاً بسرعت رخ می‌دهد چراکه معمولاً دلیل و اثر اعمال ما از نظر زمانی و مکانی به یکدیگر نزدیک می‌باشند.



شکل (۲-۲): بازخورد

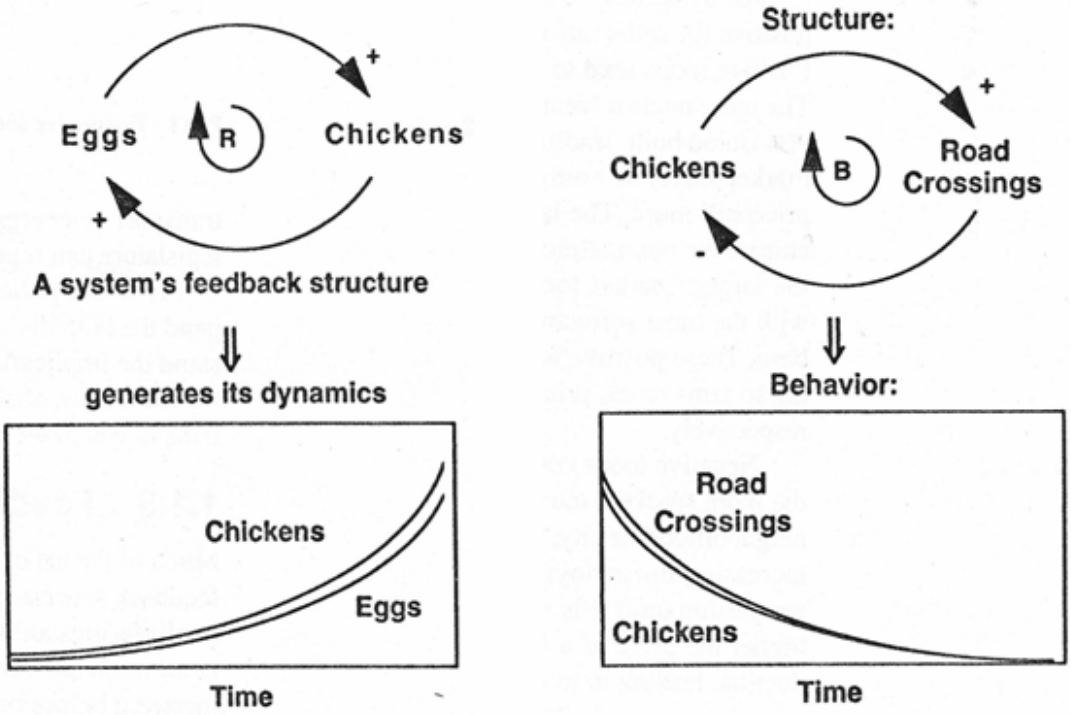
برای اجتناب از عکس العمل متضاد سیستم به سیاست‌ها باید مرز مدل ذهنی خود را گسترش داده و بازخوردهای ممکن را درنظر گرفت.

۲-۱-۳- بازخورد

هنر سیستم داینامیک ترسیم رفتار سیستم با استفاده از مدلسازی فرایندهای بازخوردی داخل سیستم از طریق ساختارهای حالت-جریان، تأخیرهای زمانی و روابط غیر خطی می‌باشد.

اغلب رفتار های پیچیده سیستم بدلیل تعاملات (بازخوردها) بین اجزاء سیستم است و نه بدلیل پیچیدگی اجزاء آنها.

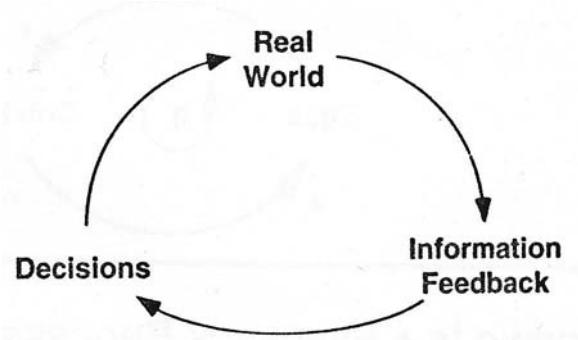
رفتارهای سیستم متأثر از دو نوع بازخورد است. بازخوردهای مثبت و منفی .بازخورد مثبت منجر به تقویت هر آنچه در سیستم رخ می‌دهد می‌شوند ولی بازخوردهای منفی در جهت تعادل اتفاقات داخل سیستم رفتار می-کنند.



شکل (۲-۳): بازخوردهای مثبت و منفی

۲-۲- یادگیری یک فرایند بازخوردی

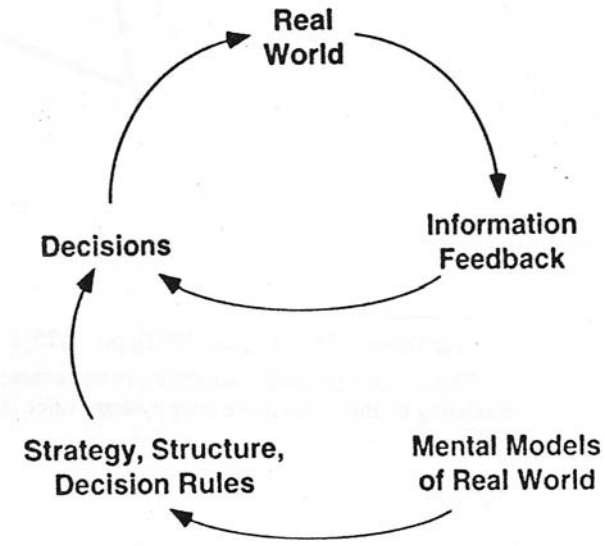
یادگیری، یک فرایند بازخوردی است که در آن با استفاده از اطلاعات گرفته شده از جهان واقعی و مقایسه آن با هدف ، تصمیم اتخاذ شده و عمل انجام شده منجر به ایجاد تغییر در وضعیف فعلی می‌شود.



شکل (۲-۴): یادگیری یک فرایند بازخوردی است

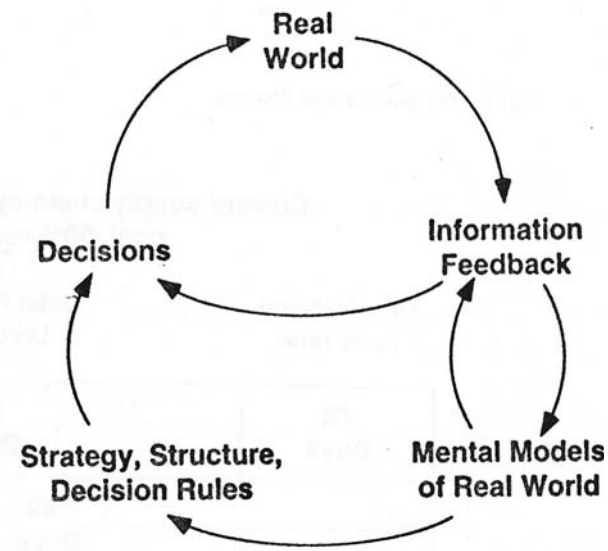
بازخورد مفهومی است که در سایر رشته‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در چرخه دمینگ-شوارت از این مفهوم برای بیان چرخه بهبود کیفیت استفاده شده است.(Plan-Do-Check-Act)

در حلقه تصمیم تنها ورودی برای اتخاذ تصمیم، اطلاعات جهان واقعی نیست بلکه قوانین و سیاست‌های تصمیم نیز از ورودی‌های دیگرند که در نهایت تصمیم را می‌سازند. قوانین و سیاست‌های تصمیم متأثر از مدلهای ذهنی تصمیم گیرنده هستند. در سیستم داینامیک "مدل ذهنی" همان برداشت‌های شخص از مجموعه شبکه علل و تأثیرات آنها می‌باشد که مشخص می‌کند سیستم چگونه عمل می‌کند.



شکل (۲-۵): تک حلقه بازخوردی یادگیری

مدل ذهنی شخص به مرور زمان با گرفتن بازخورد از اطلاعات دنیای واقعی خود را تعدیل می‌نماید. بدین ترتیب مکانیسم تصمیم گیری از دو حلقه تشکیل شده است که یکی بصورت کوتاه مدت سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و دیگری بصورت بلند مدت.

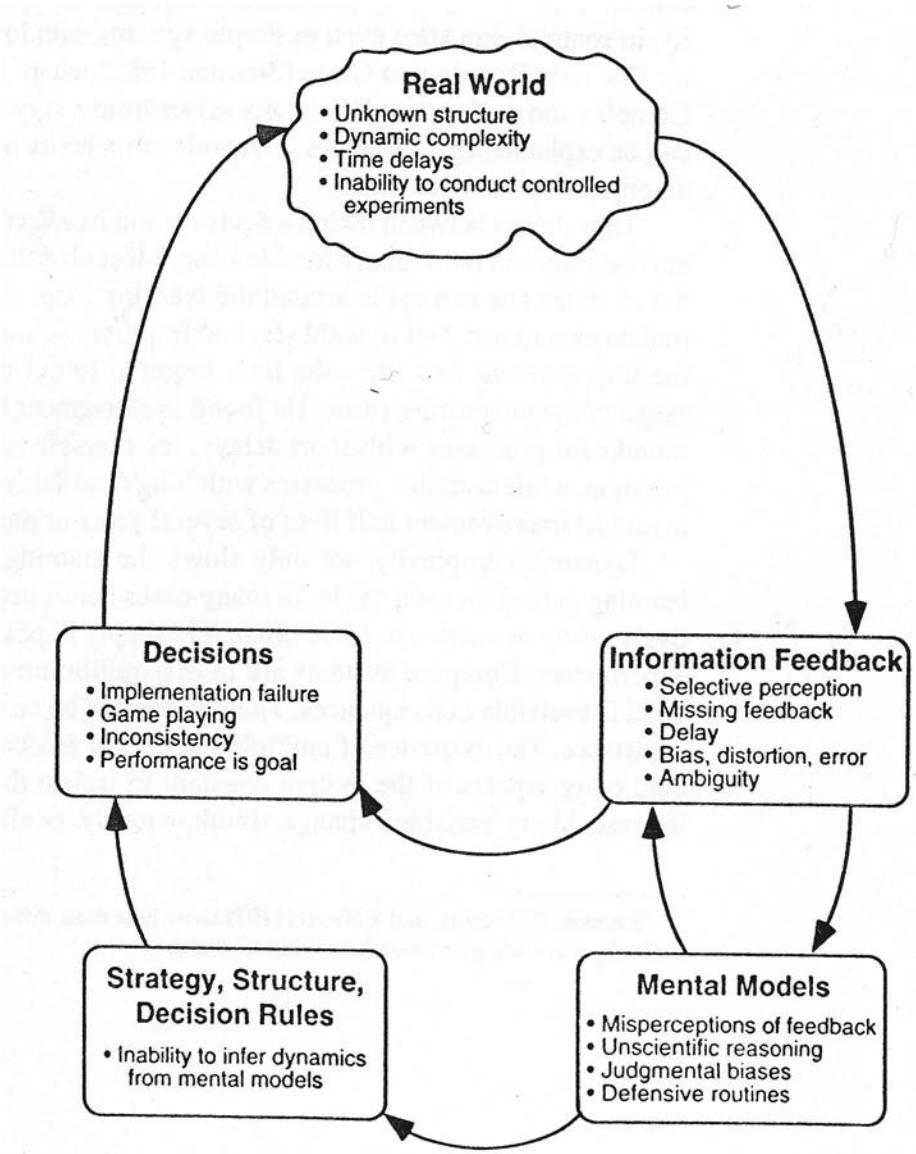


شکل (۲-۶): حلقه بازخوردی تصمیم اصلاًح شده

۲-۳- موانع یادگیری

در عصر حاضر نیز ما ناگزیر به مدل نمودن مسائل هستیم چراکه در برخی موارد ما امکان کسب تجربه را نداریم و برخی حالات نیز مدت زمان تأخیر بین عمل و عکس العمل سیستم به قدری زیاد است که در عمل امکان کسب تجربه را ناکارامد می‌کند.

در حلقه‌های دوگانه بازخوردی یادگیری، موانعی رخ می‌دهد که فرایند یادگیری را کند می‌کند. از جمله موانع فوق؛ پیچیدگی در رفتار سیستم، عدم وجود اطلاعات کافی از دنیای واقعی، وجود برخی متغیرهای مبهم در مسئله، توان علمی ضعیف در تحلیل مسائل، اجرای نامناسب تصمیمات می‌باشند.



شکل (۲-۷): موانع یادگیری

۲-۳-۱- پیچیدگی رفتار سیستم

در اغلب علوم از یادگیری بصورت یک بازخورد منفی ساده یاد می‌شود. درصورتی که در دنیای واقعی مسئله کمی پیچیده‌تر است. برخی افراد فکر می‌کنند که این پیچیدگی بدلیل تعدد عوامل تأثیرگذار بر سیستم است. درصورتی که پیچیدگی رفتار در سیستم های ساده‌ای همچون بازی نوشابه نیز دیده می‌شود. پیچیدگی رفتار سیستم‌ها بدلیل وجود تعاملات اجزاء سیستم در طول زمان است. زمان تأخیر بین اتخاذ تصمیم و مشاهد نتایج آن از عوامل اصلی در ایجاد پیچیدگی رفتار سیستم است. بدیهی است که تأخیر باعث می‌شود مدت زمان لازم برای

طی چرخه یادگیری افزایش یابد لذا ما به دفعات کمتری می‌توانیم چرخه یادگیری را طی نموده و تجربیات خود را افزایش دهیم. پیچیدگی رفتار علاوه بر اینکه یادگیری را کند می‌کند، میزان یادگیری حاصل از طی یک چرخه یادگیری را نیز کاهش می‌دهد.

تأخیر منجر به ایجاد بی‌ثباتی در سیستم‌های پویا می‌شود. با افزودن تأخیر به یک حلقه بازخوردی منفی تمایل سیستم به ایجاد رفتار نوسانی افزایش می‌یابد.

۲-۳-۲- محدودیت اطلاعات

با توجه به اینکه در عمل ما اطلاعات را از طریق تخمین با روش‌های مختلفی چون نمونه‌گیری، میانگین‌گیری از داده‌های اندازه گیری شده با تأخیر بدست می‌آوریم لذا همواره اطلاعات ما با داده‌های واقعی متفاوت است.

در برخی مواقع نیز داده‌های بدست آمده با واقعیت مطابق نیستند چراکه " چشمان ما آنچه را ذهن ما ترجیح می‌دهد می‌بینند".

۲-۳-۳- گنگ و مبهم بودن برخی متغیرها

با توجه به اینکه در حلقه تصمیم بر اساس اطلاعات دریافتی از وضعیت موجود، تصمیم اتخاذ می‌شود لذا در صورتی که این اطلاعات ناقص باشد در نتیجه ممکن است تصمیم نادرستی اتخاذ شود. اطلاعات ممکن است از دو جنبه کیفی و کمی دارای نقص باشد. در زمینه کیفی با توجه به اینکه در زبان گفتاری برخی از اصطلاحات دارای چندین معنی می‌باشند لذا ممکن است برداشت نادرست از وضعیت موجود ایجاد شود. در زمینه کمی نیز بین مهندسین و اقتصادیون کشمکش چندین ساله در رابطه با استفاده از یک روش یگانه برای تخمین ساختار و پارامترهای یک سیستم از طریق مشاهده رفتار سیستم فوق وجود دارد.

۲-۳-۴- عقلانیت محدود و درک نادرست از بازخورد

پیچیدگی رفتار سیستم و محدودیت اطلاعات با کاهش آگاهی ما نسبت به جهان واقعی پتانسیل شناخت را کاهش می‌دهند. ولی درصورتی که داده‌ها مناسب وجود داشته باشد آیا ما قادر به اتخاذ تصمیم مناسب هستیم؟ ظرفیت ذهن انسان برای فرموله کردن و حل مسائل پیچیده در مقایسه با ابعاد مسائل بسیار ناتوان است. بنابراین بدلیل

محدودیت فوق در حل مسائل ما معمولاً واقع‌گرا عمل نموده و حلقه‌ها را بصورت باز فرض می‌کنیم، همچنین تأخیرهای زمانی بین تصمیم و اثرات آن را در نظر نمی‌گیریم و درک صحیحی از مفاهیم جریان و حالت نداریم.

۲-۳-۵- برداشت‌های ناصحیح

روابط علی از ویژگی‌های اصلی مدلهای ذهنی است. ما همواره سعی در ساختن و بروز نمودن برداشت‌های خود از روابط علی و معلولی بین موجودیت‌های اطرافمان هستیم. مطالعات نشان می‌دهد که معمولاً برداشت‌های ما شامل حلقه‌های علی بسیار محدود و اندکی است. معمولاً افراد سعی می‌کنند بر اساس دریافت‌های شهودی خود یک درخت تصمیم برای حالات مختلف ممکن ایجاد نمایند. در این راستا افراد به پدیده‌ها بصورت یک حلقه تنها نگاه می‌کنند و هر اتفاقی را متأثر از یک علت می‌دانند. بنابراین به محض اینکه به اولین علت می‌رسند جواب سؤال خود را یافته‌اند و مطالعه مسئله را رها می‌کنند.

یک اصل اساسی در سیستم داینامیک ایجاد رفتار به واسطه ساختار سیستم است. در صورتی که افراد به این مسئله توجهی ننموده و در هر مسئله‌ای بدنبال مقصر گشته و او را سرزنش می‌کنند. درصورتی که مطالعات نشان داده که در برخی سیستم‌ها مانند بازی نوشابه نوع تصمیم افراد مختلف یکسان است. بنابراین باید ساختار سیستم را شناخت تا بتوان تصمیم مناسبی اتخاذ نمود.

۲-۳-۶- استنباط غلط در رابطه با رفتار

حتی اگر درک صحیحی از جهان واقعی در مدل ذهنی شخص ایجاد شود لزوماً منجر به اتخاذ تصمیم صحیح نخواهد شد. در مدل تصمیم گیری با دو حلقه بازخورد پس از ایجاد مدل ذهنی براساس اطلاعات حاصل از دنیای واقعی، استراتژی‌ها و سیاست‌ها تعیین می‌شود. جهت تعیین استراتژی‌ها و سیاست‌های مختلف باید نتایج قوانین مختلف روی مدل بررسی شده و بهترین آنها انتخاب شود. با توجه به محدودیت انسان در نگرش همه جانبه و عدم توانایی وی در تحلیل همزمان چندین عامل، حتی با فرض وجود یک مدل ذهنی مناسب نیز ممکن است تصمیم مناسب اتخاذ نشود.

۲-۳-۷- استدلال غیر علمی

اشخاص در تصمیم گیری‌ها و داوری خود معمولاً به گزینه‌های موجود اطمینان بیش از حد می‌کنند (تخمین کمتر از مقدار واقعی) و یا در داوری‌های خود از نگرش آرزو و امید استفاده می‌نمایند و فرض را بر کنترل اوضاع قرار می‌دهند. بنابراین افراد در تصمیم گیری‌های خود حتی برخی از قوانین اولیه نظیر قانون احتمالات و یا قوانین آمار را نقض می‌کنند.

۲-۳-۸- تعصبات و موانع شخصی در یادگیری

با استفاده از تعصبات، برای خود وجهای ایجاد کرده و به هر طریق ممکن سعی در اعمال نظرات خود بر دیگران داریم و تمام اعمال و رفتار خود را عین حقیقت و صحیح می‌دانیم. در این حالت ما با مخفی نمودن برخی اطلاعات مهم از دیگران و اجتناب از برخی آزمون‌ها سعی در مخفی نمودن مدل ذهنی خود از دیگران می‌نمائیم. این روش معمولاً در مباحث گروهی رخ می‌دهد. بگونه‌ای که گروهی سعی در اعمال نظرات خود به دیگران می‌نمایند.

۲-۳-۹- مشکلات اجرا

در عمل ممکن است اطلاعات بصورت صحیح رسیده و مدل ذهنی بصورت مناسبی شکل گیرد و براساس مدل فوق، استراتژی‌ها و سیاست‌ها مناسبی اتخاذ شود ولی در حین اجرا موارد فوق درست پیاده نشوند. بنابراین با توجه به اینکه مدیریت به نتیجه می‌اندیشد ممکن است بدون اینکه به علت بروز نتیجه نامطلوب بنگرد کل سیستم را کنار بگذارد.

۲-۴- نیازمندی‌های یادگیری موفق در سیستم‌های پیچیده

۲-۴-۱- بهبود فرایند یادگیری: مزایای جهان مجازی

با توجه به شکل ذیل برای رفع موانع یادگیری باید زمان لازم برای تجربه یک دور کامل نمودار بازخوردی یادگیری را کوتاه نمود. برای این منظور از جهان مجازی استفاده شده است که همانند جهان واقعی رفتار می‌نماید با این اختلاف که زمان لازم برای طی یک دور کامل نمودار از طریق جهان مجازی بسیار کوتاه خواهد شد بنابراین با استفاده از روش فوق در کوتاه‌ترین زمان می‌توان چندین بار نتایج تصمیمات مختلف را تجربه نموده و بهترین تصمیم را اتخاذ نمود.

۳- فصل سوم: فرایند مدلسازی

در فصل دوم مفهوم دنیای مجازی به عنوان روشی جهت تسریع در فرایند یادگیری اشاره شد. مدلسازی جزئی از یک فرایند یادگیری است که بصورت پیوسته در حال فرموله نمودن فرضیات، تست و اصلاًح مدلهای ذهنی و ساخت-یافته می‌باشد. در این فصل هدف از مدلسازی و فرایند مدلسازی در سیستم داینامیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- هدف از مدلسازی: مدیران به عنوان طراحان سازمان

آقای فارستر اغلب سئوال می‌کند به نظر شما کار یک خلبان آموزشی مهمتر است و یا طراح شبیه ساز پرواز؟ به نظر ایشان کار طراح مشکل‌تر است از این جهت که او باید بتواند تمام شرایط غیر معمول را در طراحی خود در نظر بگیرد. مدیران در سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی هر دو نقش خلبان و طراح را دارند. چرا که باید همانند یک خلبان آزمایشی در شرایط مختلف تصمیم بگیرند و همانند یک طراح، ساختار سازمان، استراتژی‌ها، قوانین و قواعد تصمیم گیری در سازمان را طراحی نمایند. متأسفانه در اغلب سازمان‌ها مدیران ارشد بیشتر نقش خلبان آموزشی را بازی می-کنند و کمتر توجهی به طراحی سازمان خود دارند. بنابراین مدلسازی ابزاری است برای کمک به مدیران در راستای انجام فعالیت‌های جاری و طراحی مناسب‌تر سازمان.

۳-۲- مدلساز و مشتری مدل

قبل از شروع مدلسازی، مدلساز باید با سازمان مربوطه آشنا شده و مشتری مدل خود را تعیین نماید. مشتری مدل شما شخصی که شما را به سازمان مربوطه می‌برد و یا شخصی که مسئولیت پرداخت هزینه کار را برعهده دارد و

در کار مدلسازی از شما پشتیبانی می‌کند نیست بلکه کسی است که در کار مدلسازی برای حل مسئله شما را یاری می-کند. برای اینکه مدل شما مؤثر و مفید باشد باید بر نیازمندی‌های مشتری مدل خود تمرکز نمائید. البته در این مسیر مدلساز نباید نسبت به جزئیات نیازمندی‌های مشتری مدل نیز توجه کند بلکه فقط در طراحی مدل خود مشتری خود را همیشه مد نظر داشته باشد. شما باید به فرایند مدلسازی اجازه دهید تا بتواند مدل ذهنی شما را تغییر دهد. اگر در برخی موارد مدل نشان می‌دهد که نظرات مشتری مدل شما اشتباه است، صادقانه آن را مطرح نمائید. اگر مدل ذهنی مدلساز شما را در امر مدلسازی به سمت خاصی متمایل می‌کند سعی نمائید آن را کنار زنید و اگر در بدترین حالت مشتری مدل شما سعی در اعمال نظرت خود در روند مدلسازی است سعی کنید مشتری دیگری برای خود انتخاب کنید.

۳-۳- قدم‌های مدلسازی

در مدلسازی قدم اول شناخت دقیق صورت مسئله و مشتری مدل می‌باشد. قدم‌های بعدی مدلسازی معمولاً یک حالت روتین و ساخت یافته ندارد چراکه مدلسازی خلق کردن است و این مسئله نیز حالت ذاتی و فطری دارد. ولی می-توان فرایند ساخت مدل را به چند مرحله تقسیم نمود:

۱. تشریح دقیق صورت مسئله (تعیین مرز مدل)
   a. انتخاب موضوع: مسئله و مشکل چیست؟
   b. متغیرها و مفاهیم کلیدی چیست؟
   c. افق زمانی؟ مسئله مورد نظر از نظر زمانی چه بازه‌ای از گذشته و آینده را شامل می‌شود؟
   d. ترسیم رفتار متغیرها در گذشته و احتمال رفتار آن در آینده: Reference Mode
۲. تعیین تئوری و فرضیه دینامیک درباره علل بروز مسئله
   a. فرضیه اولیه برای رفتار مدل: در حال حاضر برای رفتار سیستم چه تئوری و فرضیه‌ای وجود دارد؟
   b. تمرکز بر عوامل درونزا: تعیین روابط علی داخلی در ایجاد رفتار سیستم
   c. ترسیم روابط علی و معلولی : با استفاده از فرضیه ها و تئوری‌های اولیه، متغیرها و مفاهیم کلیدی، رفتار سیستم در گذشته، سایر داده‌های در دسترس و استفاده از ابزارهایی همچون:
      i. نمودارهای مرز مدل
      ii. نمودارهای زیرسیستم
      iii. نمودارهای علی و معلولی
      iv. نمودارهای حالت–جریان
      v. نمودارهای ساختار سیاست
      vi. سایر ابزارها
۳. ساختن یک مدل شبیه سازی برای تست فرضیه فوق
   a. تعیین ساختار و قواعد تصمیم

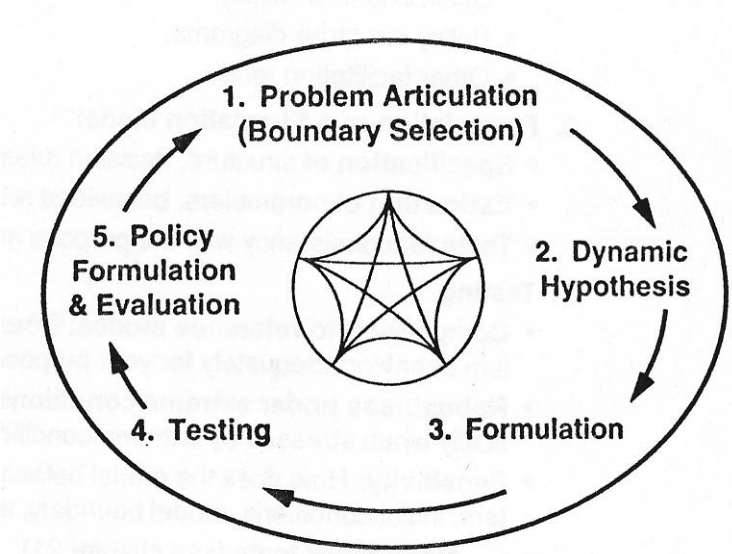
b. تخمین مقادیر اولیه، پارامترهای مدل و ارتباطات رفتاری
c. تست میزان سازگاری مدل با اهداف و مرز آن

۴. تست مدل برای اطمینان از صحت عملکرد آن
a. مقایسه رفتار مدل با رفتار مرجع (رفتار گذشته سیستم)
b. بررسی رفتار مدل در شرایط حدی: آیا مدل با وارد نمودن شرایط حدی منطقی رفتار می‌کند؟
c. تحلیل حساسیت: بررسی رفتار مدل در صورت تغییر مقادیر اولیه، پارامترها و مرز مدل
d. چندین تست دیگر ...

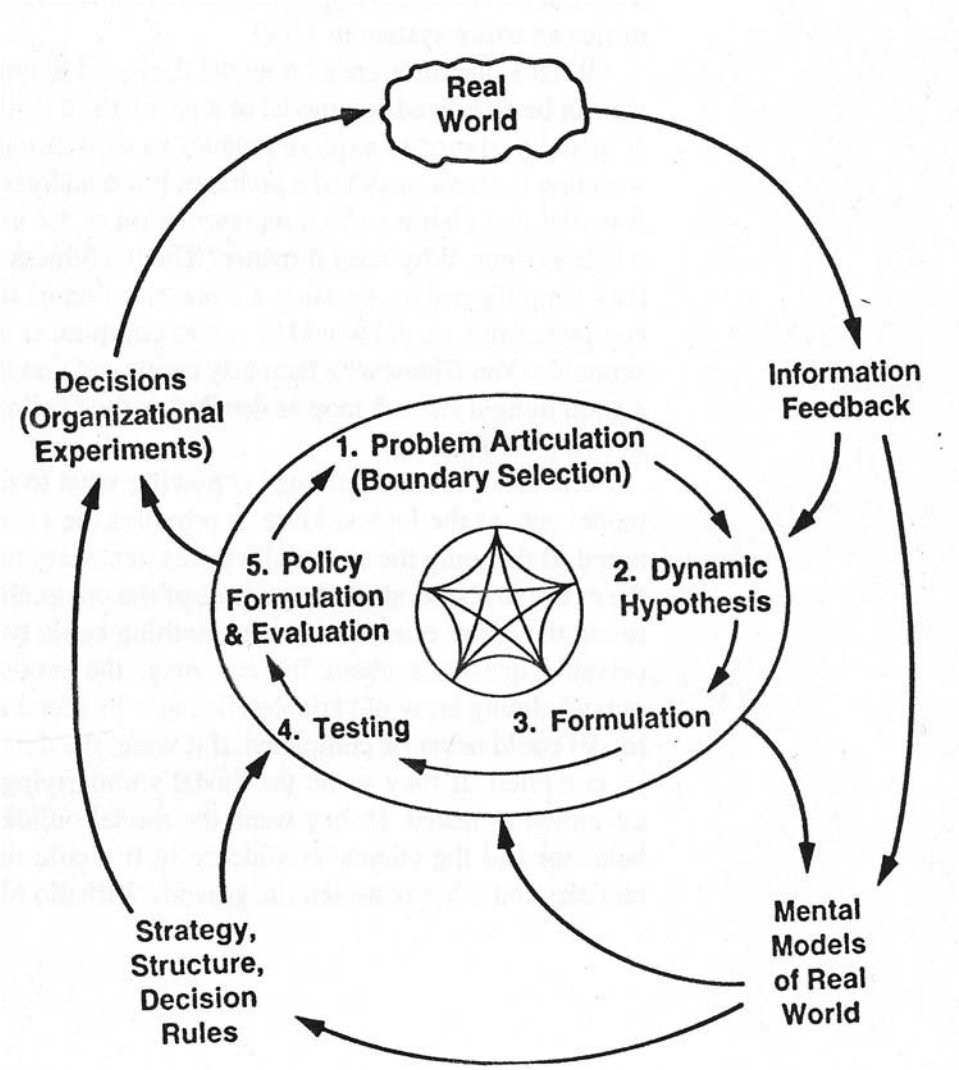
۵. طراحی سیاست‌های مختلف و ارزیابی آنها بوسیله مدل
a. طراحی سناریو: چه شرایط محیطی ممکن است رخ دهد؟
b. طراحی سیاست: چه قوانین و استراتژی‌هایی می‌توان در دنیای واقعی پیاده نمود؟
c. آنالیز: بررسی نتایج اعمال سیاست‌های مختلف
d. آنالیز تحلیل حساسیت: بررسی نتایج مدل در صورت وقوع سناریوهای مختلف
e. بررسی تعامل بین سیاست‌ها: آیا سیاست‌های مختلف با یکدیگر در تعامل و اثر متقابل می‌باشند؟

۳-۴- مدلسازی به عنوان یک فرایند تکراری

مدلسازی یک فرایند بازخوردی است و نه یک توالی خطی از مجموعه‌ای از فعالیت‌ها. طبق شکل ۳-۱ در قدم اول مدلسازی محدوده و مرز مدل و صورت مسئله تعیین شده سپس در قدم دوم رفتار دینامیک مدل و یا رفتار مرجع متغیرهای مورد نظر بررسی شده و در قدم سوم سیستم فوق شبیه‌سازی شده و پس از تست مدل و اطمینان از صحت عملکرد مدل، سیاست‌های مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. نکته قابل توجه این است که با بررسی سیاست‌های مختلف روی مدل ممکن است مجدداً در مرز مدل و تعریف صورت مسئله تغییری رخ داده و چرخه فوق دوباره تکرار شود. در تکرارهای بعدی لزوماً ترتیب قدم‌ها رعایت نخواهد شده و ممکن از از مرحله اول به مرحله n ام مراجعه نمود.



شکل ۳-۱: مدلسازی به عنوان یک فرایند تکراری



شکل ۳-۲: مدلسازی قرار گرفته در داخل مدل دینامیک تصمیم گیری

۳-۵- مرور فرایند مدلسازی

۳-۵-۱- تعریف مسئله: اهمیت هدف

مهمترین قدم در مدلسازی تعیین صحیح صورت مسئله است. آنچه که برای مشتری مدل مهم بوده و مورد علاقه او است. در تعیین صورت مسئله نیز مهمترین مسئله تعیین هدف از مدلسازی است. به عبارت دیگر مدل قرار است به چه سئوال یا سئولاتی پاسخ دهد. **در مجموع باید یک مسئله را مدل نمود و نه یک سیستم را.** برای تعریف صورت مسئله دو ابزار مهم استفاده از رفتار مرجع و تعیین افق زمانی است.

رفتار مرجع[1]

رفتار مرجع بررسی رفتار مسئله و یا متغیر مورد نظر در طول زمان می‌باشد. بدین ترتیب با بررسی رفتار گذشته می‌توان برآوردی از رفتار متغیر در آینده داشت. رفتار مرجع را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از نمودارها و یا شرح عملکرد متغیر ترسیم نمود. با ترسیم رفتار مرجع شما و مشتری مدل از نگرش واقعه‌گرا و کوتاه مدت به مسائل دور شده و رفتار سیستم را در گذر زمان مورد توجه قرار خواهید داد. برای مطالعه رفتار مرجع باید افق زمانی و متغیرها و مفاهیم مهم مورد نیاز تعیین شوند.

افق زمانی

افق زمانی باید به اندازه‌ای باشد که با نگاه به گذشته در طول افق زمانی بتوان علل و نحوه رخداد پدیده مورد مطالعه را دریافت. همچنین افق زمانی باید به اندازه‌ای باشد که با نگاه به آینده در طول افق زمانی بتوان اثرات تأخیرات سیستم و تأثیرات غیرمستقیم تصمیمات بر سیستم را مشاهده نمود. درنظر گرفتن یک افق زمانی طولانی نیز یک راه حل مشروط برای فارغ شدن از نگرش واقعه‌گرا است. چراکه افق زمانی بیش از حد بلندمدت نیز مشکلات و تبعات خاص خود را دارد. تعیین مدت افق زمانی، نوع سیاست‌های مورد ارزیابی در مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از روش‌های مفید برای تعیین افق زمانی این است که آن را معدل چندین برابر طولانی‌ترین تأخیر موجود در مدل در نظر بگیرید.

۳-۵-۲- تعیین یک فرضیه و تئوری دینامیک

پس از تعریف صورت مسئله، مدلساز باید برای رفتار مسئله مورد نظر تئوری و فرضیه‌ای را ارائه کند. تئوری دینامیک علت رفتار مسئله را تشریح می‌کند. در فرایند مدلسازی روش‌های مختلفی برای بررسی صحت فرضیه ارائه شده وجود دارد. با استفاده از مدل شبیه سازی شده و داده‌های حاصل از جهان واقعی می‌توان صحت آن را تست نمود.

در این مرحله مدلساز باید به عنوان یک شنونده متفکر و صبور با گوش دادن به سخنان افراد شاغل در سیستم، بدون فیلتر کردن مسائل مورد نظر خود، مدل ذهنی آنها را در رابطه با علت رفتار مسئله درک نماید. برای نمایش مدل ذهنی افراد داخل سیستم از برخی ابزارها و نمودارها می‌توان استفاده نمود.

[1] Reference Modes

تفسیر درونزا

سیستم داینامیک بدنبال تفسیر درونزا از علل وقوع پدیده‌ها است. درونزا بودن در سیستم داینامیک بدین معنی است که علل رفتار دینامیک مسئله از تعامل بین اجزاء داخلی سیستم نشأت می‌گیرد. با تعیین ساختار سیستم و قواعد مؤثر در عملکرد سیستم می‌توان پی به رفتار سیستم برد. تمرکز سیستم داینامیک بر متغیرهای درونزا دلیل آن نیست که مفهوم متغیرهای برونزا کنار گذاشته شود. ولی تعداد متغیرهای برونزا باید کم باشد. همچنین در تعیین متغیرهای برونزا باید دقت شود که بازخوردی بین متغیرهای درونزا و برونزا وجود نداشته باشد، که در این صورت باید مرز مدل گسترش یافته و متغیر فوق درونزا فرض شود. باید دقت نمود که محدود نمودن مرز مدل و اعتماد بیش از حد به متغیرهای برونزا می‌تواند مدل را با مشکل مواجه سازد.

ترسیم ساختار سیستم

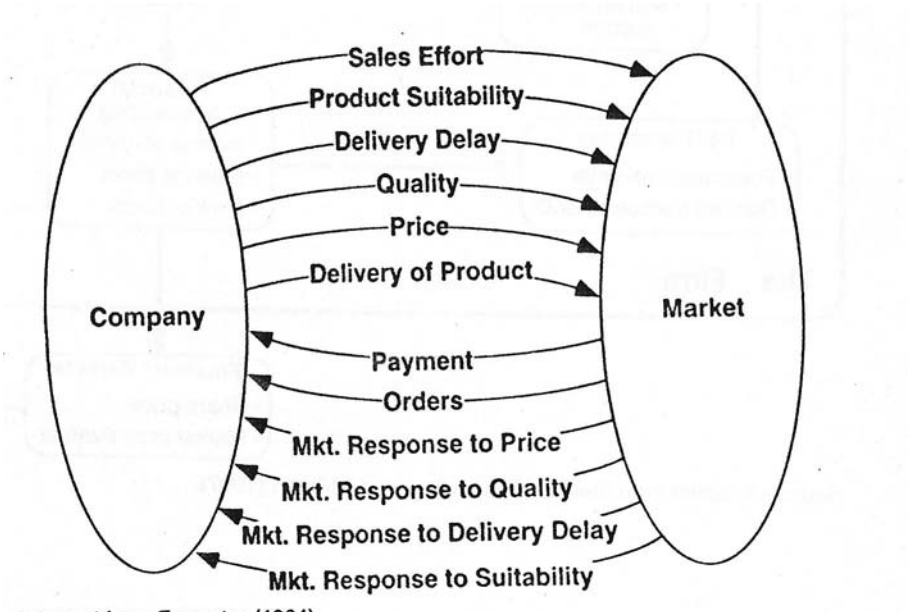
در سیستم داینامیک ابزارهای مختلفی جهت نمایش مدل و ارائه ساختار علی و معلولی مسئله وجود دارد. برخی از ابزارهای فوق شامل نمودارهای مرز مدل، نمودارهای زیرسیستم، نمودارهای علی و معلولی و نمودارهای حالت – جریان می‌باشند.

نمودار مرز مدل

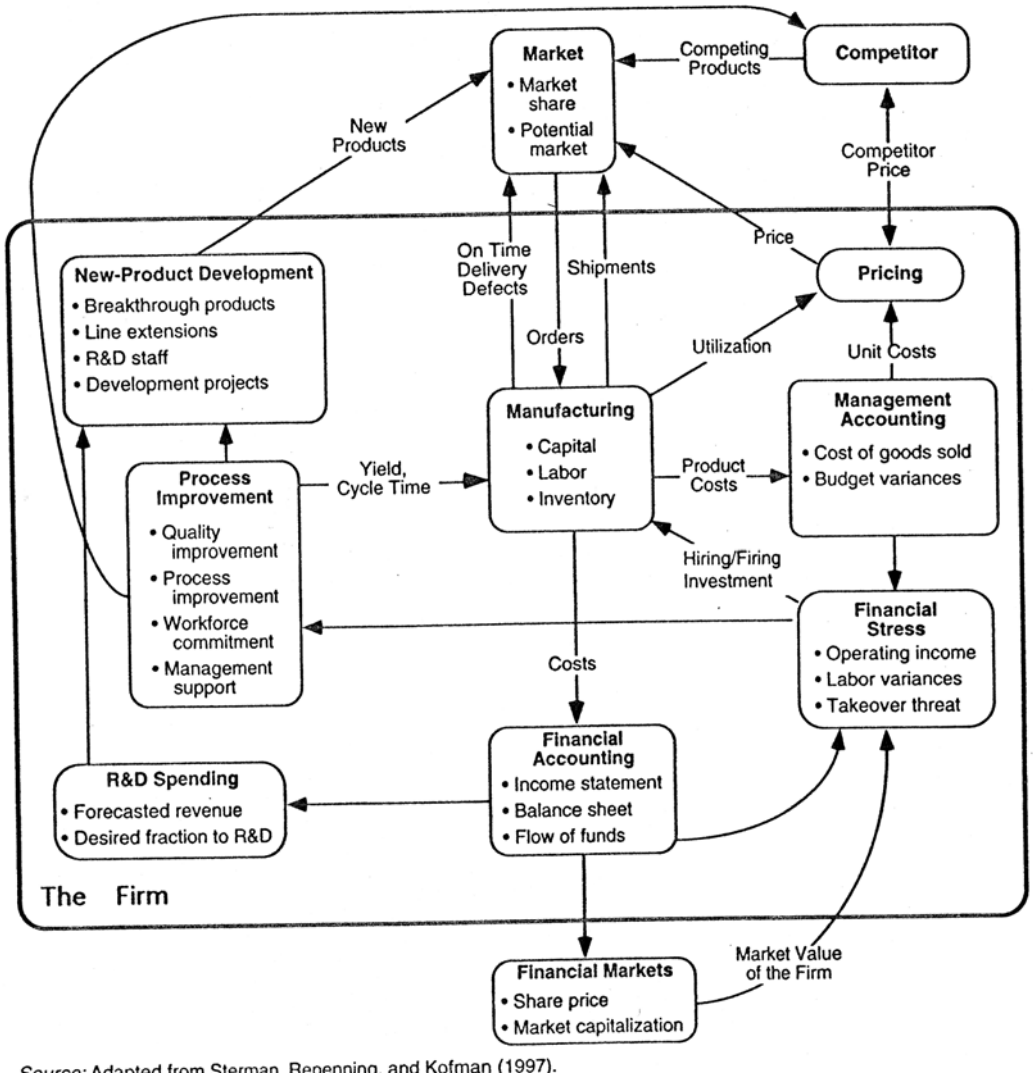
این ابزار محدوده مدل را با لیست نمودن متغیرهای درونزا، برونزا و متغیرهای غیر مؤثر بر مدل نمایش می‌دهد.

نمودار زیر سیستم

این نمودار معماری کلی مدل را نشان می‌دهد. در این نمودار زیرسیستم‌ها می‌توانند نشان دهنده جریان مواد، پول، کالا و اطلاعات باشند که با یکدیگر در تعاملند. همچنین زیرسیستم‌ها می‌توانند بصورت بخش‌های تشکیل دهنده یک سازمان مانند فروش، تولید، طراحی و توسعه محصول و غیره باشند. نمودار زیر سیستم با ترسیم تعداد و نوع عوامل تأثیر گذار بر مسئله، نشان دهنده مرز مدل و میزان یکپارچگی آن است.



شکل ۳-۳: نمودار زیرسیستم برای مدل رشد شرکت



Source: Adapted from Sterman, Repenning, and Kofman (1997).

شکل ۳-۴: نمودار زیرسیستم برای مدل یک شرکت نیمه‌هادی و برنامه‌های توسعه کیفیت

نمودارهای علی و معلولی

نمودارهای مرز مدل و زیرسیستم‌ها مرز مدل و معماری اصلی مدل را نشان می‌دهند ولی ارتباطات بین متغیرها را نشان نمی‌دهند. نمودارهای علی و معلولی نحوه تأثیر علت بر معلول را نمایش می‌دهند و ابزاری مناسب جهت ترسیم ساختار بازخوردی سیستم‌ها می‌باشند.

نمودارهای حالت-جریان

نمودارهای علی و معلولی بر ساختار بازخوردی یک سیستم توجه دارد و نمودارهای حالت-جریان به ساختارهای فیزیکی بوجود آورنده آن ساختار بازخوردی تمرکز می‌نماید. در نمودار حالت-جریان متغیرهای حالت نشان دهنده وضعیت سیستم از قبیل تعداد جمعیت، موجودی مواد، بدهی‌ها و ارزش دفتری سرمایه می‌باشد درصورتی که متغیرهای نرخ نشان دهنده نرخ تغییرات سیستم همانند مرگ و میر، نرخ تولید، نرخ دریافت وام و بازپرداخت آن و نرخ سرمایه گذاری و استهلاک سرمایه. در سیستم‌ها بر اساس متغیرهای حالت تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان آن تصمیمات اعمال می‌شود.

نمودارهای ساختار سیاست

نمودارهای فوق متشکل از نمودارهای علی می‌باشند که ورودی‌های اطلاعاتی برای یک قائده تصمیم‌گیری را ترسیم می‌نمایند. در این نمودارها تمرکز بر داده‌هایی است که مدلساز از آنها برای تصمیم گیری استفاده می‌نماید.

۳-۵-۳- ساخت یک مدل شبیه سازی

پس از اینکه فرضیه و تئوری اولیه برای علت رفتار مسئله ایجاد شد و به تبع آن مرز مدل و مدل مفهومی طراحی شد، باید بتوان آن را تست نمود. برخی مواقع با استفاده از مجموعه داده‌های واقعی و یا آزمایش فرضیات فوق در جهان واقعی می‌توان آن را تست نمود. ولی در اغلب مواقع مدل مفهومی ایجاد شده به قدری پیچیده است که نمی-توان به سادگی آن را ارزیابی نمود. لذا نیاز به مدلسازی آن می‌باشد.

۳-۵-۴- تست مدل

با نوشتن اولین معادله، تست مدل نیز شروع خواهد شد. یکی از انواع تست مقایسه رفتار مدل با رفتار واقعی آن می‌باشد. همچنین در مدل ساخته شده باید تمام معادلات از نظر دیمانسیون درست باشند. همچنین تحلیل حساسیت مدل و بررسی سیاست‌های مختلف نباید طبق شرایط خاصی صورت بگیرد، چه از نظر پارامتری و چه از نظر ساختاری. یکی دیگر از تست‌ها بررسی مدل در شرایط مرزی است. شرایط مرزی حدود پارامترهای مدل می‌باشند که ممکن است در واقعیت اصلاً رخ ندهد ولی مدل طبق این شرایط باید درست عمل کند.

۳-۵-۵- طراحی و ارزیابی سیاست

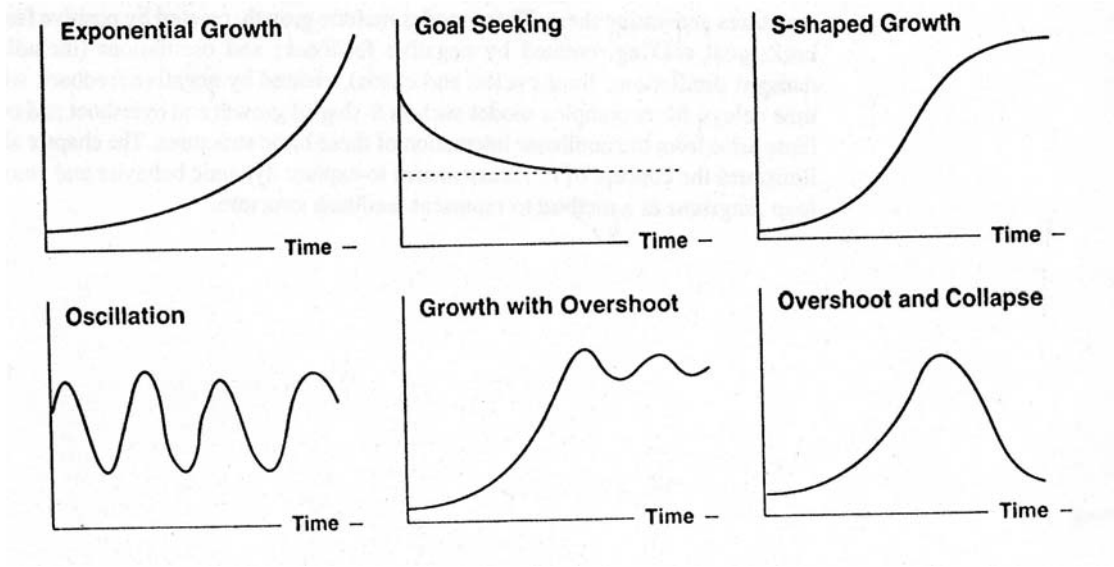
پس از اینکه مدل ساخته شد و شما و مشتری مدل از عملکرد صحیح آن اطمینان حاصل نمودید، می‌توان سیاست‌های مختلف را با استفاده از مدل آزمود. طراحی سیاست فراتر از تغییر یک پارامتر مانند نرخ مالیات در مدل می-باشد. طراحی سیاست به منزله طراحی یک ساختار و یا یک استراتژی جدید و یا تغییر قواعد تصمیم گیری است. با توجه به اینکه رفتار سیستم متأثر از حلقه‌های بازخوردی سیستم می‌باشد لذا بهترین روش طراحی سیاست، تغییر حلقه‌های بازخوردی غالب در مدل، با تغییر ساختار متغیرهای حالت – جریان می‌باشد.. همچنین بدلیل تأثیر تأخیرات سیستم بر رفتار آن با رفع تأخیرهای فوق نیز می‌توان سیاست‌های مختلفی طراحی نمود.

۴- فصل چهارم:ساختار و رفتار سیستم‌های پویا

رفتار سیستم متأثر از ساختار آن است. ساختار نیز شامل مجموعه‌ای از حلقه‌های بازخوردی، متغیرهای حالت و جریان و روابط غیر خطی متأثر از فرایندهای تصمیم گیری داخل سیستم می‌باشد. بنابراین در این فصل به بررسی رابطه بین ساختار و رفتار سیستم پرداخته خواهد شد. رفتارهای مرجع توسط ساختارهای مختلف بازخوردی ایجاد می‌شوند. به عنوان مثال رفتار رشد نمایی حاصل یک حلقه بازخوردی مثبت، رفتار هدفجو حاصل یک حلقه بازخوردی منفی و رفتار نوسانی نیز متأثر از حلقه بازخوردی منفی با تأخیر زمانی است. سایر رفتارهای مرجع نظیر رفتار S شکل و Overshoot از تعامل بین ساختارهای پایه حاصل می‌شوند. همچنین در این فصل به مفاهیم نمودارهای رفتار مرجع برای ترسیم رفتار سیستم و نمودار علی و معلولی برای ترسیم ساختار بازخوردی سیستم پرداخته خواهد شد.

۴-۱- حالت‌های پایه رفتار پویا

تغییرات موجود در دنیا در شکل‌های مختلف روی می‌دهند ولی مطالعه آنها نشان می‌دهد که چند رفتار پایه برای تغییرات وجود دارد بطوری که با ترکیب این رفتارهای پایه می‌توان رفتارهای پیچیده دیگر را تولید نمود. به عنوان مثال رفتارهای رشد نمایی، رشد هدفجو و نوسانی جزء رفتارهای پایه می‌باشند که با ترکیب آنها با یکدیگر می‌توان رفتارهایی نظیر رشد Sشکل، رشد بیش از حد به همراه نوسانات بعد از آن و سایر رفتارها را ایجاد نمود.

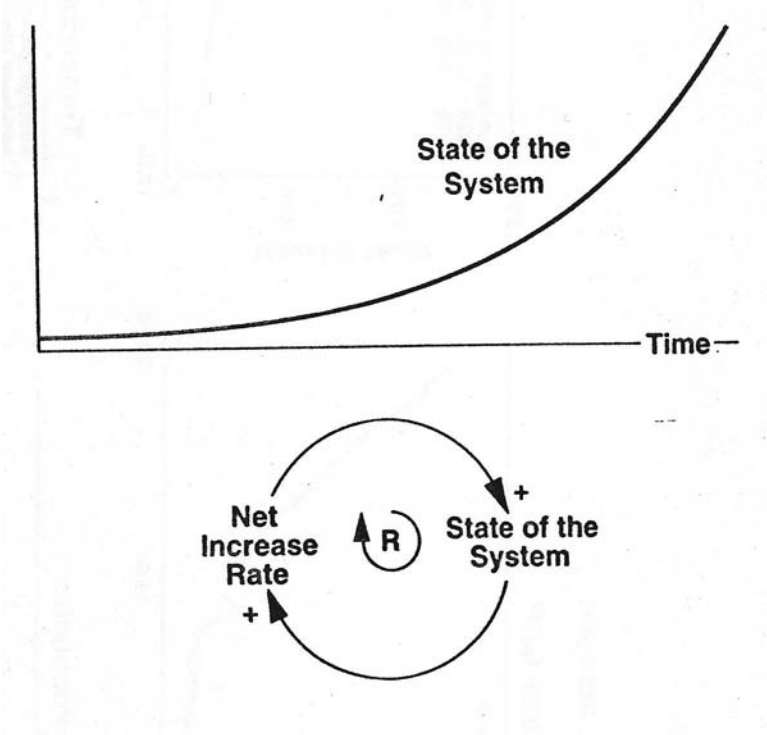


شکل ۴-۱ : رفتارهای معمول در سیستم‌های دینامیک

۴-۱-۱- رشد نمایی

رشد نمایی توسط یک حلقه بازخوردی مثبت ایجاد می‌شود. به عنوان مثال جمعیت موجود هر چه بیشتر باشد خالص زاد و ولد نیز بیشتر شده و در نتیجه تعداد جمعیت زیاد می‌شود و این چرخه همینطور ادامه پیدا کرده و باعث رشد جمعیت بصورت نمایی می‌شود. در یک رشد نمایی مدت زمان لازم برای دو برابر شدن مقدار متغیر ثابت است.

رشد خطی معمولاً نادر و کمیاب است چراکه در این نوع رشد خالص تغیرات مستقل از مقدار متغیر حالت می‌باشد و در سیستم‌های واقعی این مسئله به ندرت رخ می‌دهد. طبق شکل ۴-۲ با توجه به اینکه مدت زمان لازم برای دو برابر شدن جمعیت ۴۰ سال می‌باشد لذا قسمت اول نمودار به نظر می‌رسد که دارای رشد خطی است در صورتی که واقیعت چنین نیست.

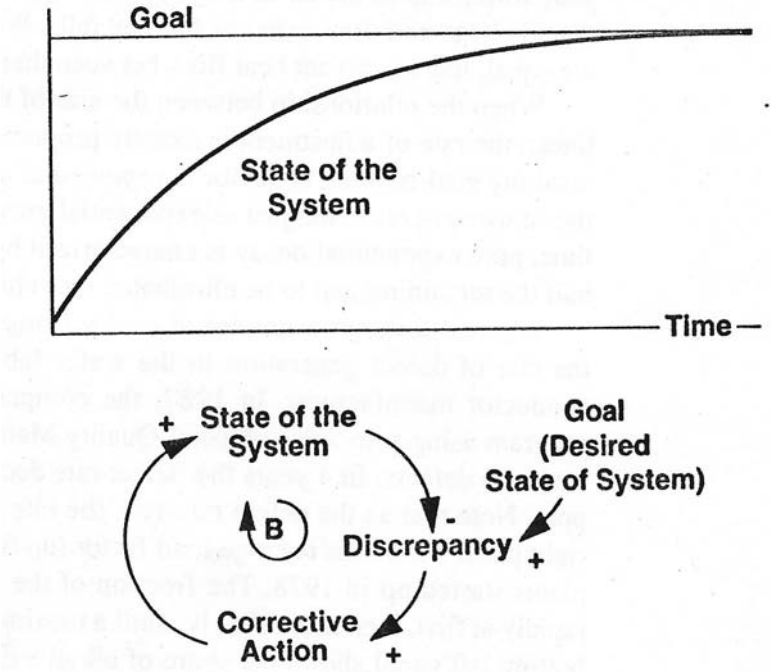


شکل ۴-۲: رشد نمایی : رفتار و ساختار

۴-۱-۲- رفتار هدفجو

بازخورد مثبت منجر به رشد سیستم می‌شود ولی بازخورد منفی سعی در ایجاد تعادل در سیستم و رساندن متغیر حالت آن به یک مقدار مطلوب دارد. در رفتار هدفجو مقدار فعلی متغیر حالت با مقدار مطلوب مقایسه شده و در صورت اختلاف، سیستم به گونه‌ای عمل می‌کند که اختلاف فوق رفع گردد. بنابراین پس از مدتی سیستم به مقدار مطلوب خواهد رسید. به عنوان مثال وقتی شخصی گرسنه می‌شود به مقداری که رفع گرسنگی نماید غذا می‌خورد و پس از اینکه احساس گرسنگی رفع گردید دست از غذا خوردن خواهد کشید. در برخی مواقع مقدار هدف روشن و تحت کنترل تصمیم‌گیر است مانند سطح مطلوب موجودی و در برخی مواقع شفاف و تحت کنترل آگاهانه نیست مانند میزان استراحت مورد نیاز جهت رفع خستگی.

با توجه به اینکه تغییرات سیستم تابعی از اختلاف سیستم با وضعیت مطلوب می‌باشد لذا در ابتدا تغییرات دارای مقدار بیشتر و به مرور مقدار تغیرات کم می‌شود. در این حالت میزان تغییرات سیستم تابعی خطی از اختلاف وضعیت سیستم با مقدار مطلوب است. در رفتار هدفجو نیز مانند رفتار رشد نمایی مدت زمان لازم برای نصف شدن یا دو برابر شدن متغیر حالت همواره در هر نقطه از منحنی ثابت است.

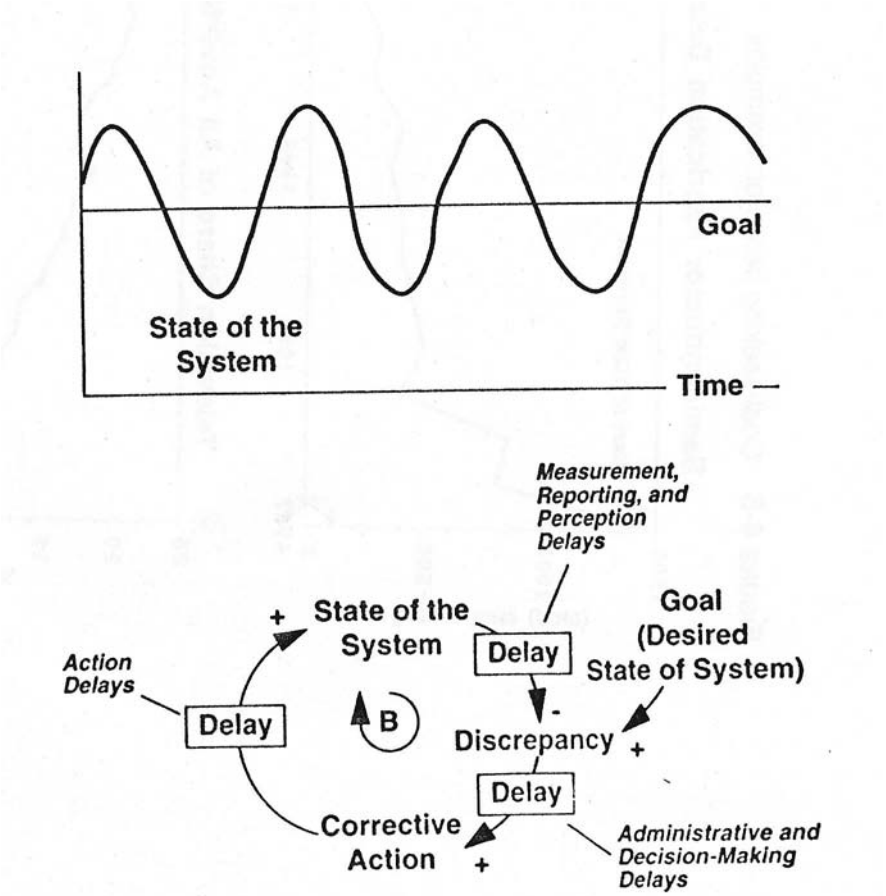


شکل ۴-۳: رفتار و ساختار هدفجو

۴-۱-۳- رفتار نوسانی

رفتار نوسانی سومین نوع از رفتارهای پایه می‌باشد که مانند رفتار هدف‌جو از یک بازخورد منفی حاصل می‌شود. با این تفاوت که این بازخورد منفی دارای زمان تأخیر قابل ملاحظه‌ای است. علت رفتار نوسانی بدین ترتیب است که بدلیل وجود تأخیر در قسمت‌های مختلف بازخورد نظیر تأخیر در دریافت اطلاعات درباره وضعیت فعلی متغیر حالت و یا تأخیر در اعمال تصمیمات در سیستم، مقدار متغیر بیش از حالت تعادل می‌شود سپس تصمیم اتخاذ شده اعمال شده و مقدار متغیر را بیش از مقدار تعادل کاهش می‌دهد بنابراین با تأخیر وضعیت فوق درک شده و درنتیجه تصمیم دیگری مبنی بر افزایش مقدار متغیر اتخاذ می‌شود و به همین ترتیب این چرخه تکرار می‌شود.

مشاهده نوسانات سیستم‌های واقعی نشان می‌دهد که دامنه نوسان و بازه‌های زمانی نوسان مانند نوسانات پاندول یک ساعت منظیم و دقیق نیست. این مسئله طبیعی است چراکه در سیستم‌های واقعی بیولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی تعداد عوامل تأثیرگذار بسیار زیاد است.



شکل ۴-۴: رفتار و ساختار نوسانی

۴-۱-۴- نکته‌ی عملی

وجود ارتباط بین ساختار و رفتار ما را در شناخت ساختار سیستم‌ها با مشاهده رفتار آنها کمک می‌کند. به عنوان مثال با مشاهده رفتار رشد نمایی در سیستم می‌توان نتیجه گرفت که در سیستم فوق حداقل یک بازخورد مثبت وجود دارد. البته امکان وجود بازخورد منفی نیز است ولی بازخورد غالب در این سیستم بازخورد مثبت است. ممکن است تیم مدلساز برای مسئله مورد نظر چندین بازخورد مثبت ترسیم کرده باشد. با یقین نمی‌توان در رابطه با میزان تأثیر هر یک از حلقه‌های بازخوردی فوق اظهار نظر نمود مگر درصورت وجود داده‌های مناسب و یا مدل شبیه سازی شده. با استفاده از ایده وجود ارتباط بین ساختار و رفتار می‌توان تئوری و فرضیه‌های مناسبی برای حلقه‌های کلیدی طرح نمود.

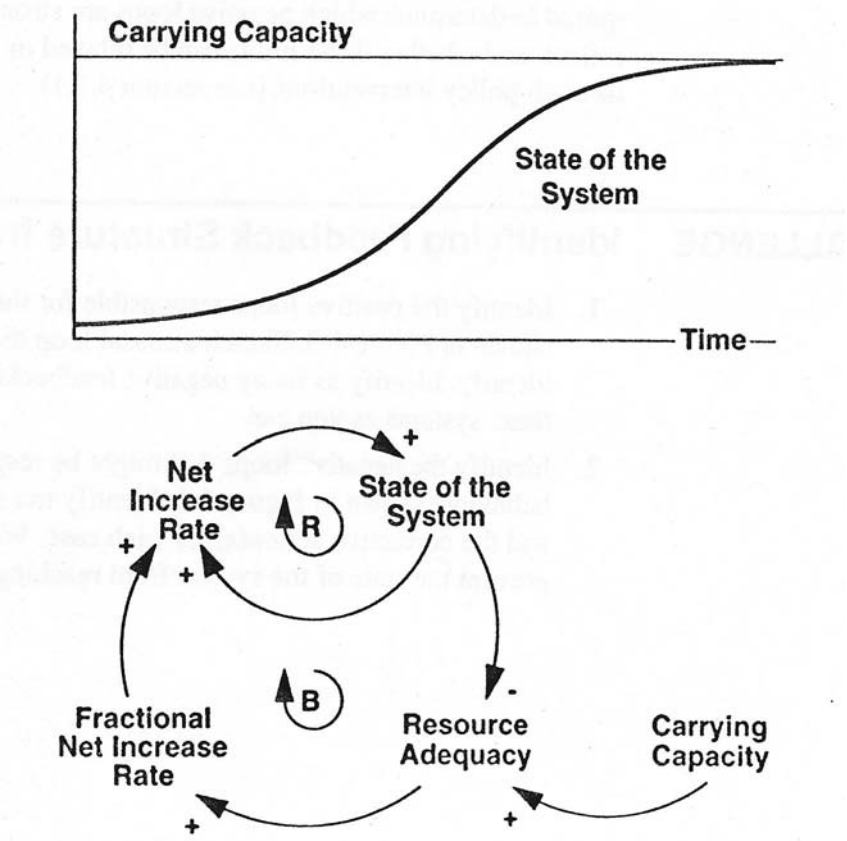
در عالم واقعی هیچگاه رشد نمایی فرض شده برای یک سیستم تا بی‌نهایت ادامه پیدا نخواهد نمود. زیرا برخی بازخوردهای منفی وجود دارند که با رشد متغیر پس از مدتی فعال شده و مانع رشد سیستم می‌شوند. بنابراین پس از مشخص نمودن حلقه‌های بازخوردی مثبت سیستم باید در رابطه با محدودیت‌های سیستم نیز فکر نمود.

۴-۲- تقابل بین رفتارهای پایه

سه رفتار پایه رشد نمایی، هدفجو و نوسانی بواسطه سه ساختار ساده بازخورد مثبت، منفی و منفی همراه با تأخیر صورت می‌گیرد. سایر رفتارهای پیچیده از ترکیب غیرخطی بین سه ساختار ساده فوق تشکیل شده است.

۴-۲-۱- رشد S شکل

در جهان واقعی رشد سیستم‌ها بصورت نامحدود صورت نمی‌گیرد بلکه با گذشت زمان برخی محدودیت‌ها برای سیستم ایجاد می‌شود که رشد آن را کند می‌کند. رایج‌ترین رفتار موجود رفتار S شکل است که در این نوع رفتار ابتدا سیستم بصورت نمایی رشد می‌کند ولی پس از مدتی رشد سیستم کاهش یافته و به سمت یک مقدار تعادل حرکت می-کند.



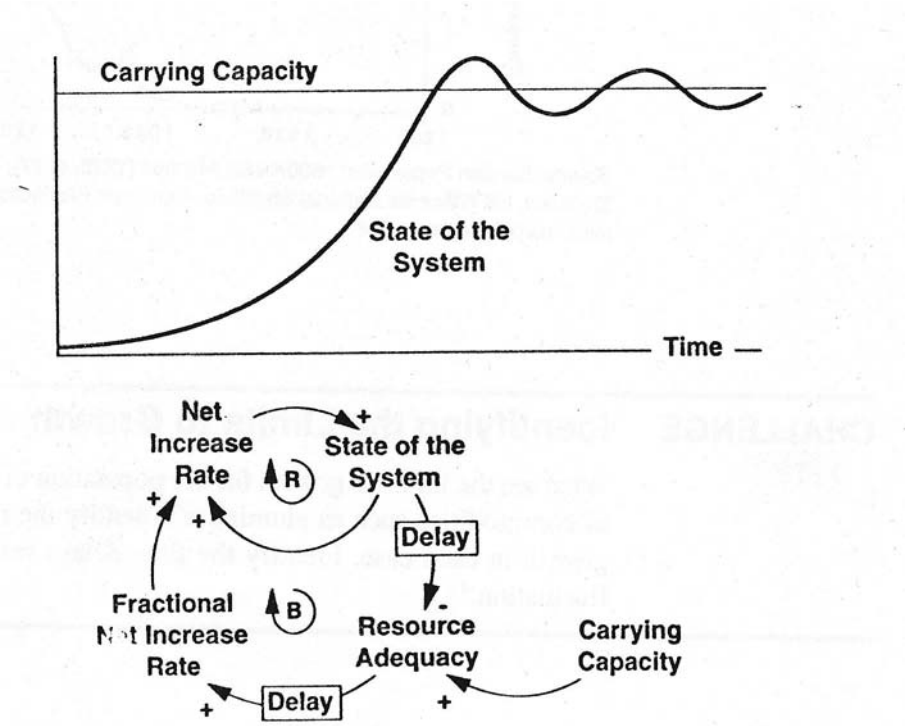
شکل ۴-۵: رفتار و ساختار رشد S شکل

برای اینکه یک سیستم دارای رفتار S شکل باشد باید دو فرض صادق باشد: اولاً حلقه بازخوردی منفی نباید دارای تأخیر قابل ملاحظه‌ای باشد و ثانیاً منبع محدود کننده رشد باید ثابت باشد. به عبارت دیگر منبع فوق نباید ضریبی از متغیر حالت سیستم باشد. یکی از جنبه‌های کلیدی در ساختار S شکل وجود رابطه غیرخطی بین بازخورد مثبت و منفی است. به این ترتیب که در ابتدا بازخورد مثبت حلقه غالب در سیستم است ولی پس از مدتی حلقه غالب به سمت بازخورد منفی منتقل می‌شود. نقطه عطف منحنی نیز جایی است که این انتقال رخ می‌دهد.

۴-۲-۲- رشد S شکل همراه با Overshoot

رشد S شکل نیاز به بازخوردی منفی دارد تا رشد نمایی سیستم را محدود کند. درصورتی که بازخورد منفی دارای زمان تأخیر قابل ملاحظه‌ای باشد، سیستم ابتدا دارای رشد نمایی است و با فعال شدن بازخورد منفی نرخ رشد کاهش

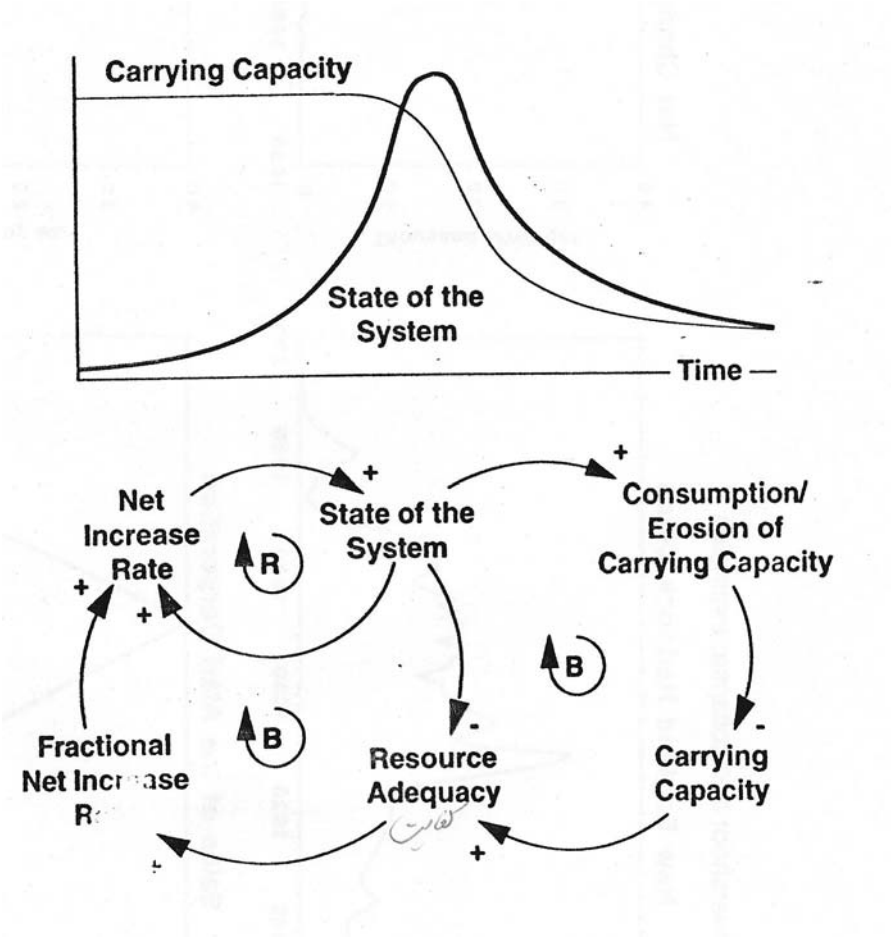
می‌یابد ولی با توجه به اینکه بازخورد منفی با تأخیر عمل می‌کند لذا مقدار متغیر حالت از حالت تعادل بیشتر شده و سپس با فعال شدن بازخورد منفی مجدداً کاهش یافته و حول مقدار تعادل بصورت نوسانی رفتار می‌کند.



شکل ۴-۶: رشد S شکل همراه با رفتار Overshoot و نوسانی و ساختار آن

۴-۲-۳- رفتار رشد بیش از حد و سقوط

در رفتار S شکل فرض دوم، ثابت بودن سطح منابع محدود کننده رشد بود. در برخی مواقع رشد سیستم منجر به از بین رفتن و کاهش سطح کل منابع نیز می‌شود. بدین ترتیب رشد سیستم دارای دو تأثیر عمده خواهد بود: اولاً سرانه منبع کاهش می‌یابد و ثانیاً سطح کل منبع کاهش خواهد یافت. به عنوان مثال رشد جمعیت آهوها در یک منطقه حفاظت شده منجر به از بین رفتن مراتع آن منطقه خواهد شد.



شکل ۴-۷: رفتار و ساختار رشد بیش از حد و سقوط

۴-۳- سایر حالات رفتار

رشد نمایی، رفتار هدفجو، نوسانی و ترکیبات آنها تنها رفتارهای موجود نمی‌باشند ولی اغلب رفتارهای پویای سیستم‌ها در این چند نوع رفتار خلاصه می‌شود ولی علاوه بر رفتارهای فوق رفتارهای دیگر نظیر ۱- تعادل و ۲- تغییر تصادفی نیز وجود دارد.

۴-۳-۱- تعادل

پایداری و ثبات نیز در سیستم‌ها ممکن است وجود داشته باشد چراکه در برخی موارد اثرات دینامیک به قدری کند و آهسته می‌باشند که تغییرات سیستم نامحسوس خواهد بود. در حالت دیگر بدلیل وجود حلقه‌های بازخوردی قوی

منفی در سیستم مقدار سیستم در اطراف حالت مطلوب نگه داشته شده باشد. در رابطه با حالت اول می‌توان به شکل گیری کوه‌ها اشاره نمود و برای حالت دوم به جاذبه زمین اشاره کرد که اشیاء را به سمت خود می‌کشد.

بخش دوم: ابزارهایی برای تفکر سیستمی

این بخش به برخی ابزارهای پایه برای نگرش سیستمی و سیستم داینامیک می‌پردازد. فصل پنجم به نمودارهای علی و معلولی می‌پردازد که ابزاری است برای ترسیم حلقه‌های بازخوردی سیستم. در فصل ششم به متغیرهای حالت و جریان پرداخته خواهد شد. در این فصل نشان داده خواهد شد که چگونه براساس نمودارهای علی و معلولی می‌توان مدل حالت–جریان سیستم را ترسیم نمود. در فصل هفتم به دینامیک متغیرهای حالت و جریان پرداخته خواهد شد و بدون استفاده از ریاضیات پیچیده نشان داده می‌شود که چگونه ساختار منجر به رفتار می‌شود. در فصل نهم با ترکیب متغیر حالت و جریان رفتارهای رشد نمایی و هدفجو مدل خواهد شد و نشان داده می‌شود که چگونه یک بازخورد مثبت منجر به رشد نمایی و یک بازخورد منفی منجر به رفتار هدفجو می‌شود.

۵- فصل پنجم:نمودارهای علی و معلولی

بازخورد یکی از مفاهیم اصلی در سیستم داینامیک است. در سیستم داینامیک با استفاده از ابزاهایی همچون نمودارهای علی و معلولی و حالت–جریان ساختار سیستم نمایش داده می‌شود. در این فصل به نمودارهای علی و معلولی پرداخته می‌شود که شامل راهنمای ترسیم نمودار علی و معلولی و دام‌های محتمل در رسم این نمودارها و چند مثال می‌باشد.

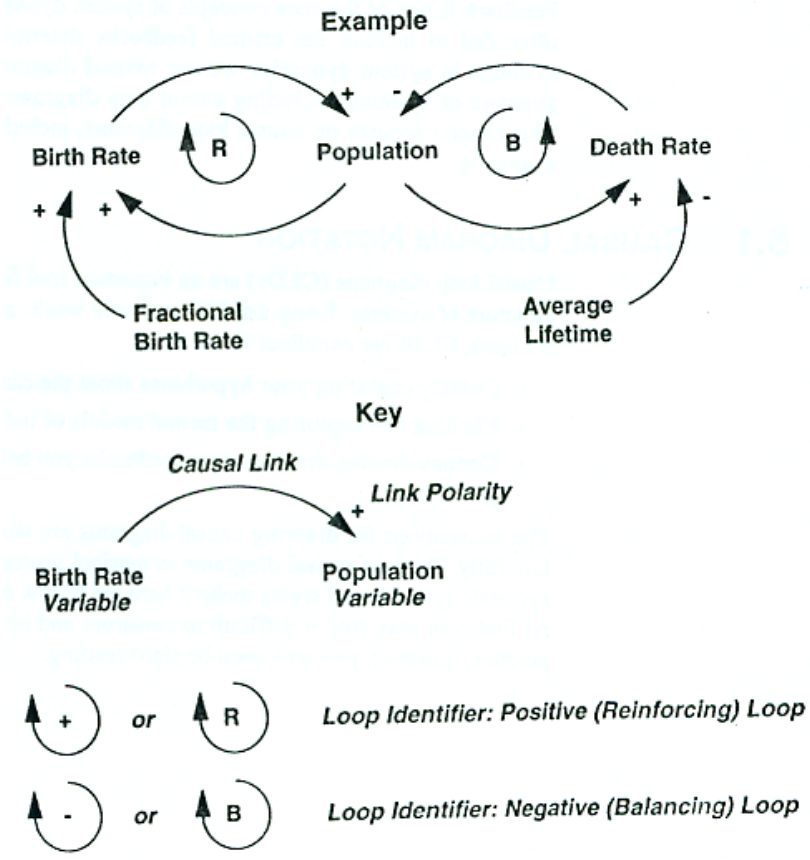
۵-۱- علائم مورد استفاده در ترسیم نمودار علی و معلولی

نمودارهای علی و معلولی یکی از مهمترین ابزارها در ترسیم ساختار بازخوردی سیستم می‌باشند که سابق طولانی در کارهای دانشگاهی دارند. این نمودارها برای موارد زیر بسیار مناسب می‌باشند:

- با استفاده از این نمودارها به سرعت می‌توان فرضیه‌ها و تئوری‌های مورد نظر در رابطه با علل رفتار سیستم را ارائه نمود
- ترسیم مدل ذهنی اشخاص و یا اعضای تیم
- ترسیم بازخوردهای مهمی که به نظر شما در صورت بروز مسئله اتفاق خواهد افتاد

نمودار علی و معلولی شامل متغیرهایی است که توسط فلش نحوه تأثیر هر یک بر دیگری را نشان می‌دهند. رابطه علی با دو علامت مثبت و منفی نشان داده می‌شود. درصورتی که تغییرات متغیر مستقل و وابسته در یک جهت باشند رابطه علی مثبت خواهیم داشت و درصورتی که تغییرات متغیر مستقل و وابسته عکس یکدیگر باشند رابطه علی منفی خواهیم داشت. به عنوان مثال افزایش جمعیت منجر به افزایش زاد و ولد می‌شود بنابراین رابطه فوق یک رابطه علی مثبت می‌باشد و یا با افزایش مرگ و میر جمعیت کاهش می‌یابد لذا رابطه فوق یک رابطه علی منفی است. در

تعیین علامت رابطه علی فرض بر آن است که سایر متغیرها ثابت بوده و هدف بررسی اثر تغییرات متغیر مستقل بر متغیر وابسته است. از ترکیب روابط علی و معلولی در یک دایره بسته، بازخورد یا دایره علی و معلولی حاصل می‌شود. حلقه بازخورد نیز دارای دو حالت مثبت(Reinforcing) یا منفی(Balancing) است. در بازخورد مثبت تغییر یک متغیر منجر به تغییر خود در همان جهت شده درصورتی که در بازخورد منفی تغییر یک متغیر منجر به تغییر خود در جهت عکس خواهد شد. به عنوان مثال افزایش زاد و ولد منجر به افزایش جمعیت و افزایش جمعیت نیز منجر به افزایش زاد و ولد خواهد شد. پس زاد و ولد طی یک بازخورد مثبت منجر به افزایش جمعیت می‌شود. همچنین افزایش مرگ و میر منجر به کاهش جمعیت و کاهش جمعیت نیز منجر به کاهش مرگ و میر می‌شود. بنابراین مرگ و میر توسط یک بازخورد منفی منجر به کاهش جمعیت می‌شود.



شکل ۵-۱: نماد مورد استفاده در نمودار علی و معلولی

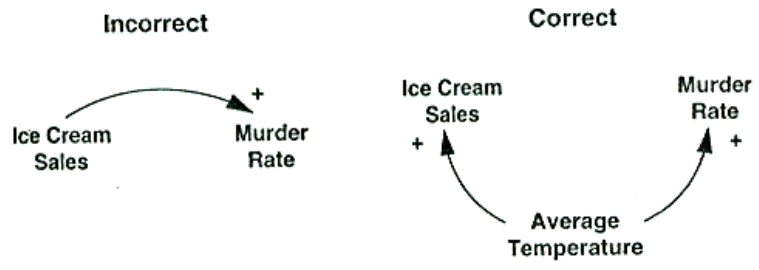
نکته‌ی عملی: نکته‌ای در رابطه با نمادهای مورد استفاده در روابط علی و معلولی

در برخی مستندات سیستم داینامیک جهت تعیین نوع روابط علی و معلولی بجای علامت مثبت و منفی از حروف اول کلمات **S**ame و **O**pposite استفاده می‌شود. استفاده از S بدین معنی است که علت و معلول در یک جهت حرکت می‌کنند و استفاده از O بدین معنی است که علت و معلول در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند.

۵-۲- راهنمای نمودارهای علی و معلولی

۵-۲-۱- علیت در مقابل همبستگی

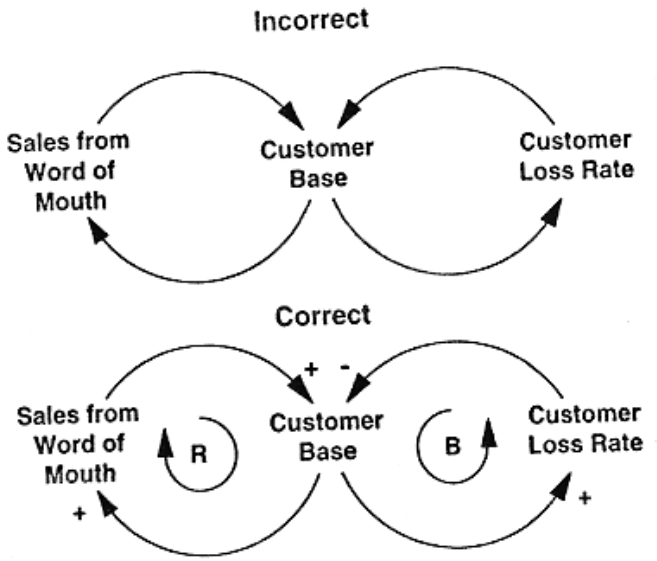
در ترسیم نمودار علی و معلولی داشتن همبستگی بین متغیرها مهم نیست بلکه باید بین دو متغیر رابطه علی برقرار باشد. شبیه سازی به معنای تقلید می‌باشد. یک مدل شبیه سازی در سیستم داینامیک باید بتواند ساختار سیستم را تقلید نماید و بگونه‌ای رفتار آن را ایجاد کند. ایجاد رفتار فقط به این معنی نیست که مدل تجربه گذشته را تولید نماید بلکه باید بتواند به رویدادها و سیاست‌های کاملاً جدید پاسخ دهد. همبستگی بین متغیرها نشان دهنده وضعیت سیستم در گذشته است و ساختار سیستم را نشان نمی‌دهد. بدین ترتیب با بروز رویدادهای جدید و یا اعمال سیاست‌های نو و یا با فعال شدن برخی از حلقه‌های بازخوردی غیرفعال در گذشته ممکن است همبستگی بین متغیرها صادق نباشد. به عنوان مثال داده‌ها نشان از وجود همبستگی بین تقاضا برای بستنی و تعداد قتل می‌باشد بدین ترتیب آیا می‌توان گفت مصرف بستنی منجر به قتل خواهد شد. با بررسی دقیق‌تر مشخص شده است که با افزایش دما مصرف بستنی و میزان قتل افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت افزایش دما علت مصرف بالای بستنی و تعداد زیاد قتل می‌باشد. عدم تفکیک بین همبستگی و علیت ممکن است منجر به داوری و قضاوت‌های اشتباه شود.



شکل ۵-۲: نمودارهای علی باید فقط شامل ارتباطات علی واقعی باشند.

۵-۲-۲- تعیین علامت روابط علی

مطمئن شوید که حتماً علائم مربوط به روابط علی نمودار خود را تعیین نمایید. همچنین علامت حلقه‌های بازخوردی اصلی مدل را نیز تعیین نمایید. برای حلقه‌های مثبت از علامت + یا R و برای حلقه‌های منفی از علامت - یا B استفاده نمائید.



شکل ۵-۳: علائم روابط علی و حلقه‌های بازخوردی

تمرین: تعیین علائم روابط علی و معلولی

اثر عوامل مختلف بر جذابیت محصول و به تبع آن تقاضای محصول را تعیین نموده و نمودار علی و معلولی آن به همراه علائم روابط علی را مشخص نمائید.

۵-۲-۳- تعیین علامت حلقه علی

دو روش برای تعیین علامت حلقه های علی وجود دارد:

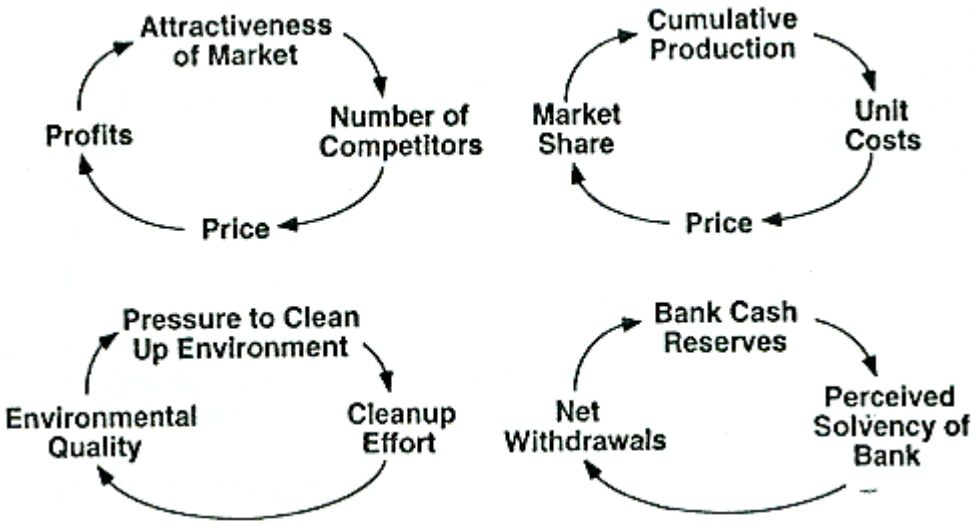
روش سریع: شمارش تعداد روابط علی منفی

در این روش تعداد روابط علی منفی را بشمارید اگر فرد بود حلقه فوق منفی است و اگر زوج باشد حلقه علی مثبت خواهید داشت.

روش صحیح: بررسی اثر تغییرات از طریق طی کامل حلقه علی

در روش فوق بر اساس علائم هر یک از روابط علی به ترتیب اثر تغییر متغیر منتخب خود را بر متغیر بعدی به ترتیب توالی آنها بررسی نمائید. درصورتی که تغییر متغیر اولیه پس از طی یک دور کامل با تغییر اولیه هم راستا باشد حلقه فوق مثبت و در غیر اینصورت منفی خواهد بود.

تمرین: علائم روابط علی و معلولی و حلقه‌های بازخوردی را تعیین نمائید.

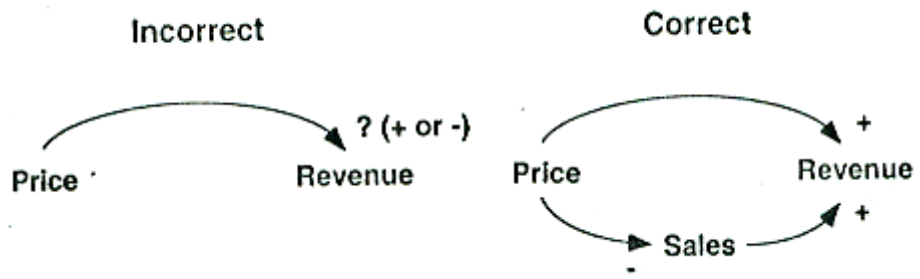


شکل۵-۴: مثال‌های حلقه بازخوردی

تمام روابط علی باید دارای علائم دقیق و غیرمبهم باشند

در برخی مواقع روابط علی ترسیم می‌شود که با توجه به سایر پارامترها و یا در شرایط مختلف دارای علامت مختلفی است. به عنوان مثال رابطه بین قیمت کالا و درآمد شرکت بصورت یک رابطه علی ترسیم شده است. درصورتی که بسته به کشش تقاضا نسبت به قیمت رابطه فوق می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

در مواقعی که یک رابطه علی بیش از یک علامت می‌پذیرد معنی آن این است بیش از یک مسیر برای ترسیم رابطه علی بین دو متغیر فوق وجود دارد. در مثال قبل، افزایش قیمت، میزان قیمت واحد کالا را افزایش می‌دهد و همزمان افزایش قیمت میزان تقاضا را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب افزایش قیمت واحد کالا درآمد را افزایش می‌دهد و کاهش تقاضا نیز درآمد شرکت را کاهش می‌دهد.



شکل ۵-۶: روابط علی نباید دارای ابهام باشند.

همچنین جداسازی مسیرهای تأثیر قیمت بر درآمد شرکت منجر به شناخت دقیق‌تری از انواع تأخیرات سیستم نیز خواهد شد. به عنوان مثال تغییر قیمت واحد کالا بدون تأخیر بر درآمد شرکت تأثیر خواهد گذاشت. درصورتی که تغییر قیمت و تأثیر آن از طریق کاهش فروش بر درآمد دارای تأخیر بیشتری است.

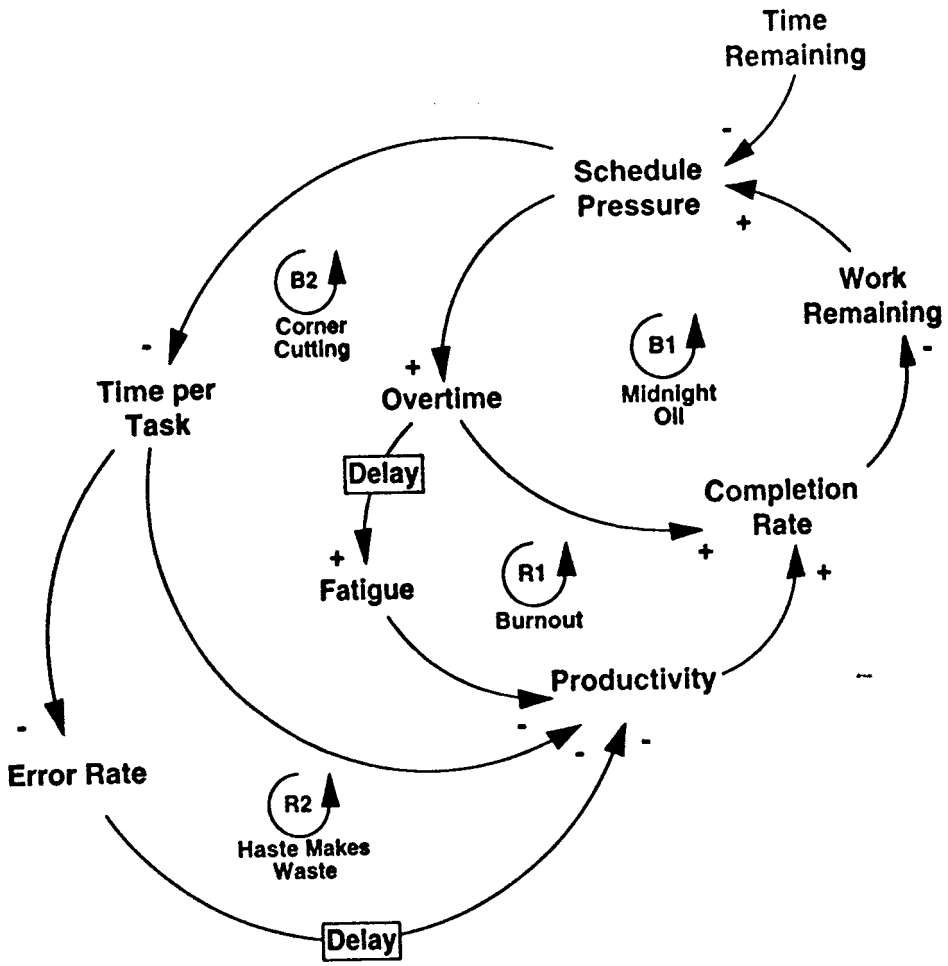
تمرین: انگیزش کارکنان

فاصله بین کارایی مطلوب و کارایی فعلی هر کارمند عامل مؤثر در میزان انگیزه وی برای ادامه کار و رشد و ترقی است. بحث این است که این فاصله آیا دارای تأثیر منفی است و یا مثبت؟ و آیا اصلاً با یک رابطه مستقیم می‌توان این اثر این دو مفهوم بر یکدیگر را مطالعه نمود؟ رابطه علی و معلولی زیر را کامل کنید.

شکل ۵-۷: روابط علی و معلولی نباید دارای علامت مبهم باشند.

۵-۲-۴- نام حلقه‌های علی و معلولی

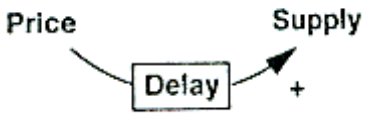
هنگامی که شما سعی در ترسیم مدل ذهنی مشتری مدل خود می‌کنید پس از مدتی با انبوهی از حلقه‌های علی روبرو خواهید شد که ممکن است خواننده مدل شما را سردرگم نماید. لذا بهتر است حلقه‌های بازخوردی اصلی مدل را با استفاده از یک شماره و نام تفکیک کنید. شماره حلقه در یافتن آن و نام حلقه در درک عملکرد حلقه مؤثر است.



شکل ۵-۸: شماره گذاری و نام گذاری حلقه‌های بازخوردی اصلی برای شفاف شدن و درک بهتر مدل

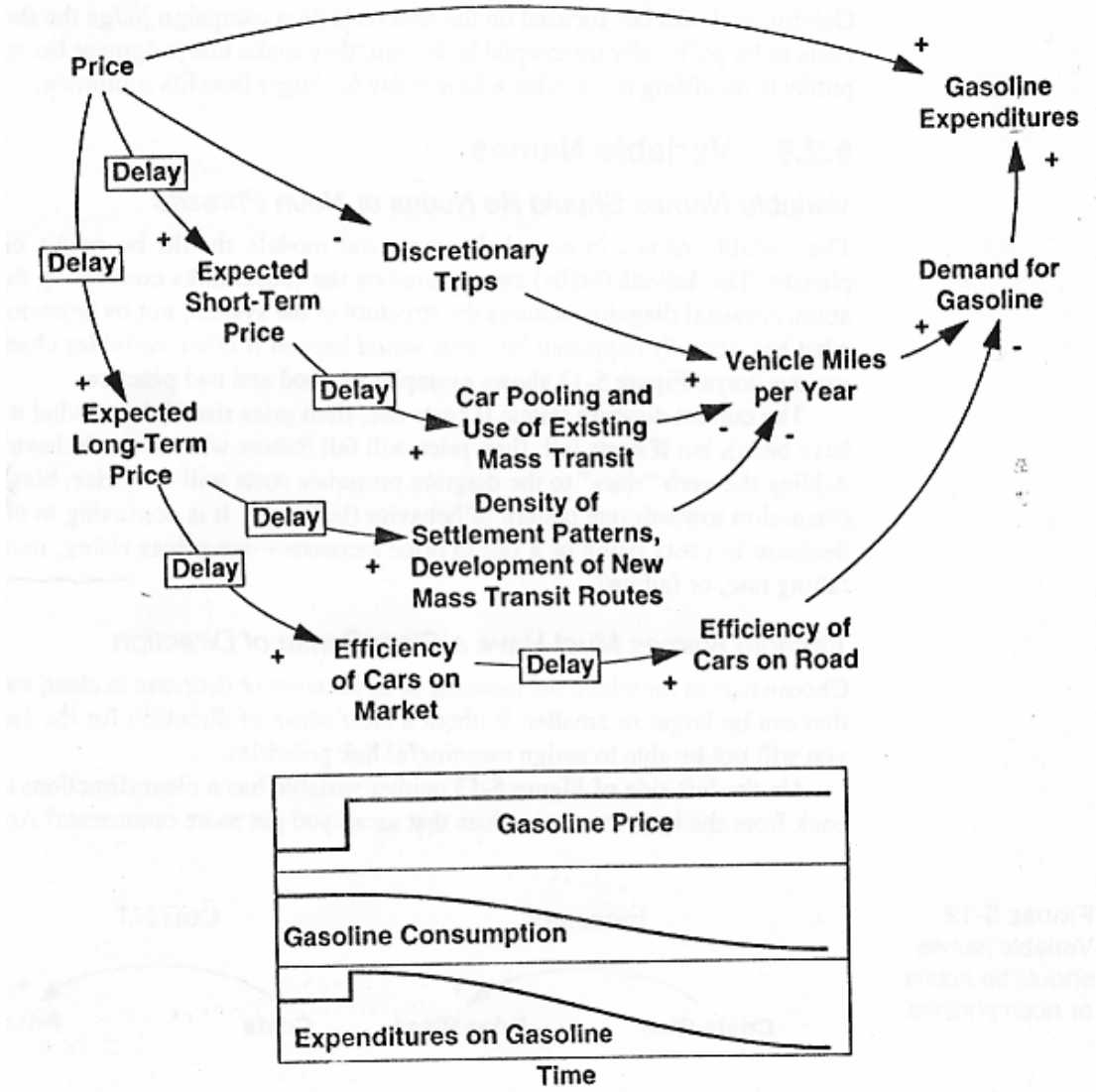
۵-۲-۵- مشخص نمودن تأخیرهای مهم در روابط علی و معلولی

تأخیرها از عوامل اصلی در ایجاد رفتار سیستم می‌باشند. تأخیرها با ایجاد یک سکون و اینرسی در سیستم منجر به رفتار نوسانی می‌شوند. معمولاً تأخیرها مرز بین اثرات کوتاه مدت و بلند مدت مدل را نشان می‌دهند. بنابراین مدل علی شما باید تأخیرها را نیز نشان دهد.



شکل ۵-۹: نمایش تأخیر در مدل علی و معلولی

مثال: تقاضای انرژی: افزایش قیمت گازوئیل و اثرات آن با وجود تأخیرهای مختلف

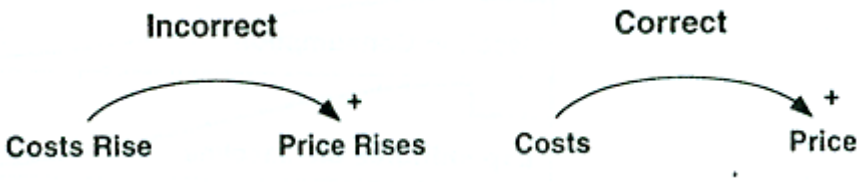


شکل ۵-۱۰: تأخیرات مختلف در پاسخ تقاضای گازوئیل به افزایش قیمت

۵-۲-۶- نام‌های متغیر

نام‌های متغیر باید بصورت اسم و یا عبارات اسمی باشند

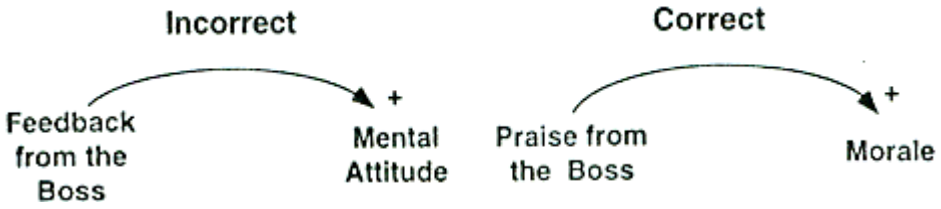
در نمودارهای علی و معلولی برای نام متغیرها باید از یک اسم و یا عبارت اسمی استفاده کرد. زیرا روابط علی بیان کننده عمل انجام شده(فعل) می‌باشند و نمودار علی می‌خواهد ساختار مدل را بیان کند و نه رفتار آن را. به عنوان مثال اگر هزینه‌ها افزایش یابد قیمت نیز افزایش خواهد یافت و یا اگر هزینه‌ها کاهش یابند قیمت نیز کاهش خواهد یافت.



شکل ۵-۱۱: نام‌های متغیر باید بصورت اسم و یا عبارات اسمی باشند

نام‌های متغیر باید یک برداشت روشنی از رابطه علی ارائه دهد

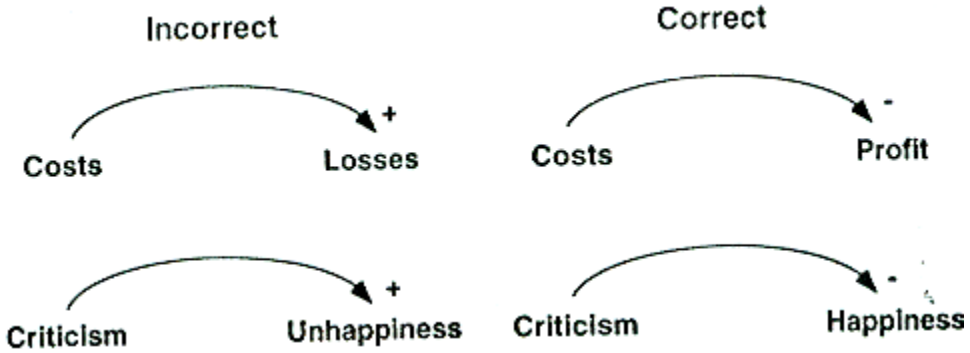
نام متغیرها باید بسیار گویا باشد به گونه‌ای که به صراحت و با شفافیت کامل نشان‌دهنده نوع رابطه علی باشد. به عنوان مثال در شکل ۵-۱۲ بازخورد از طرف رئیس منجر به افزایش روحیه شخص شده است. درصورتی که رابطه فوق در همه حالات صادق نیست به عنوان مثال تمجید رئیس منجر به افزایش روحیه شخص می‌شود.



شکل ۵-۱۲: نام‌های متغیر باید یک برداشت روشنی از رابطه علی ارائه دهد

استفاده از کلمات و مفاهیم مثبت برای نام‌گذاری متغیرها

در نام‌گذاری متغیرها از کلمات مثبت استفاده شود. به عنوان مثال در شکل ۵-۱۳ با افزایش هزینه‌ها مقدار ضرر افزایش می‌یابد. توصیه می‌شود بجای آن از رابطه؛ افزایش هزینه‌ها منجر به کاهش سود می‌شود استفاده شود.



شکل ۵-۱۳: برای نام‌های متغیر از کلمات مثبت استفاده شود.

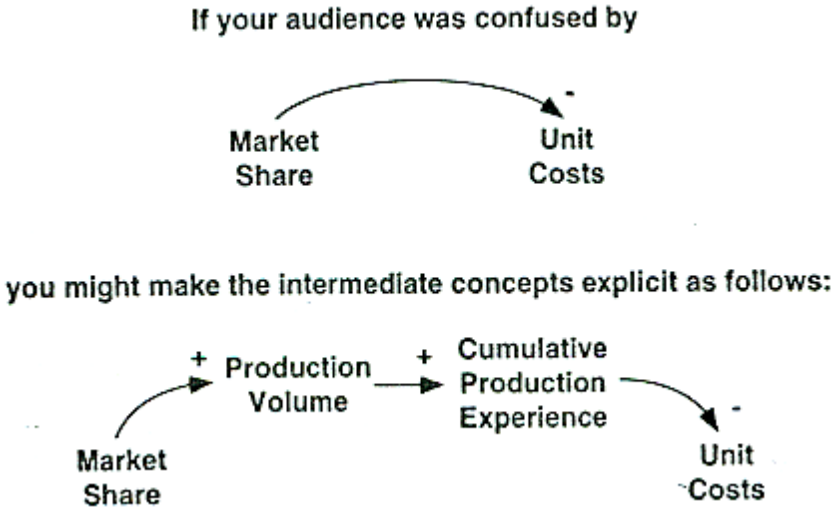
۵-۲-۷- نکاتی چند در رابطه با ساختار نمودار علی و معلولی

- برای نشان دادن بازخوردها از فلش‌های منحنی استفاده نمائید چراکه نسبت به فلش مستقیم مفهوم بازخورد را بهتر نمایش می‌دهد
- حلقه‌های بازخوردی مهم را به شکل دایره یا بیضی نمایش دهید.
- نمودارهای علی و معلولی خود را بگونه‌ای ترسیم کنید که کمترین برخورد بین خطوط باشد.
- برای رسیدن به بهترین وضعیت نمودار علی را چندین بار ترسیم کنید (تکرار).

۵-۲-۸- انتخاب مناسب‌ترین سطح جزئیات

نمودار علی و معلولی ابزاری است برای نشان دادن ساختارهای بازخوردی اصلی مدل ذهنی شما در رابطه با یک مسئله می‌باشد. لذا در ترسیم این نمودارها میزان جزئیات نمودار باید بگونه‌ای باشد که نه خیلی وارد جزئیات شده و نه خیلی کلی و مبهم به روابط علی و معلولی پرداخته باشد. زیرا جزئیات زیاد درک مدل را مشکل نموده و کلی گویی نیز به منطق روابط علی و معلولی صدمه می‌زند.

برای رسیدن به حالت مطلوب سعی کنید ابتدا در کلی‌ترین حالت نمودار را ترسیم نمائید سپس روابطی کلی را که خواننده مدل قادر به درک منطق آن نمی‌باشد بگونه‌ای اصلاًح کنید که قابل فهم باشند.



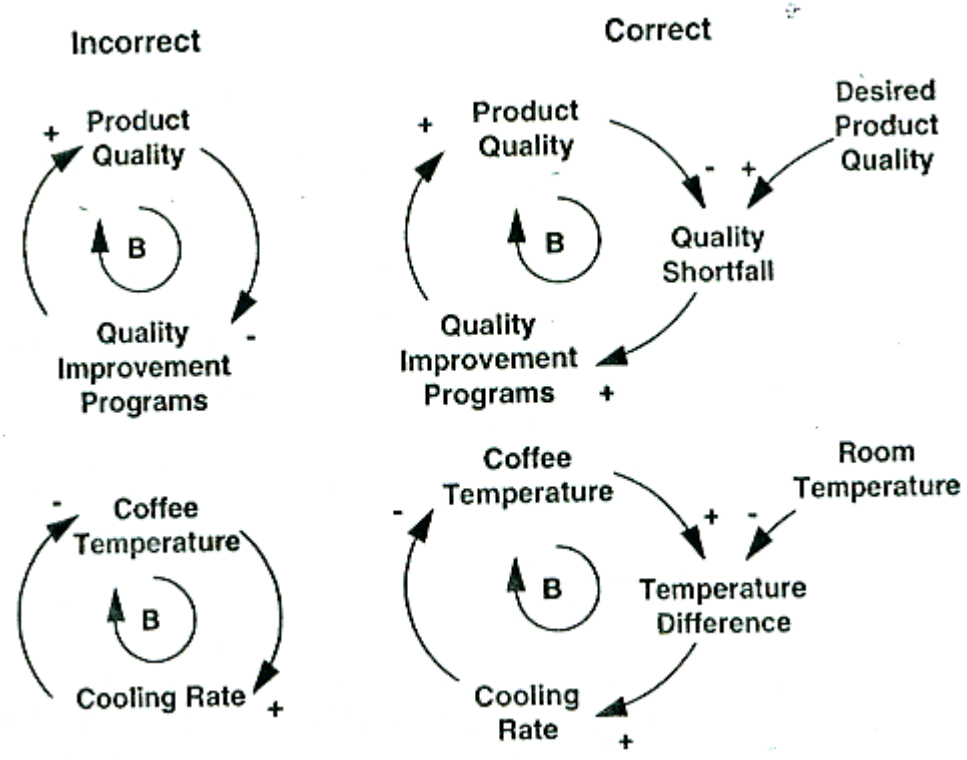
شکل ۵-۱۴: روابط علی کلی را با افزودن ارتباطات بیشتر گویا و شفاف نمائید

۵-۲-۹- تمام حلقه‌های بازخوردی را در یک نمودار بزرگ قرار ندهید

حافظه کوتاه مدت قابل درک ۷ مثبت منفی ۲ عدد تکه اطلاعاتی را بصورت همزمان دارا می‌باشد لذا مبحث فوق محدودیتی در رابطه با اندازه و پیچیدگی نمودارهای علی ایجاد می‌کند. استفاده از روابط علی پیچیده و بزرگ بررسی و درک نمودار و اینکه نمودار فوق چگونه رفتار دینامیک سیستم را ایجاد می‌کند مشکل خواهد نمود. بنابراین شما باید مدل خود را در طی چند مرحله و شامل مجموعه کوچک و ساده‌ای از روابط علی و معلولی ترسیم نمائید.

۵-۲-۱۰- اهداف (حالت تعادل) حلقه‌های علی منفی را مشخص نمائید

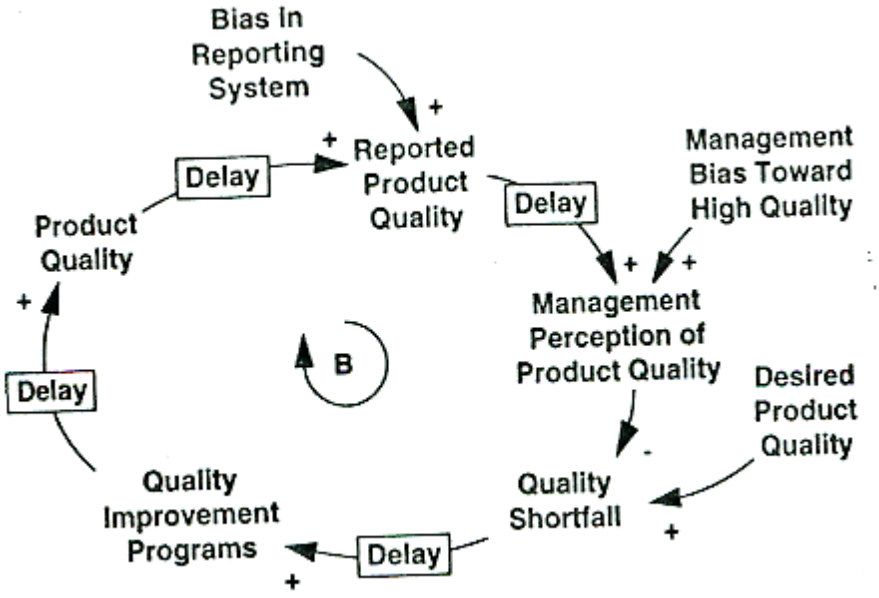
هر حلقه علی منفی دارای یک هدف است. هدف حلقه علی منفی نشان دهنده وضعیت مطلوب سیستم می‌باشد. بنابراین حلقه علی منفی با مقایسه وضعیت فعلی با هدف براساس میزان اختلاف موجود بین آنها عکس‌العمل نشان می‌دهد. در ترسیم حلقه‌های علی منفی، هدف حلقه را نیز بیان کنید. اهداف حلقه‌های بازخوردی منفی خود متأثر از شرایط محیط بوده و در گذر زمان تغییر خواهند نمود.



شکل ۵-۱۵: اهداف حلقه‌های علی و معلولی منفی را مشخص نمائید

۵-۲-۱۱- تمایز بین شرایط واقعی و درک شده

معمولاً بین وضعیت صحیح و وضعیت درک شده از سیستم اختلاف وجود دارد. و این اختلاف متأثر از برخی عوامل مثل زمان‌های تأخیر (تأخیر در گزارش دهی و یا تأخیر در فرایند محاسبات)، خطای اندازه‌گیری، خطای انحراف به یک سمت خاص، تحریف و ابهام در اطلاعات می‌باشد. به عنوان مثال در مسئله کیفیت، تأخیری در ارزیابی کیفیت محصول و نیز تأخیر دیگری در قانع نمودن مدیریت در راستای تصمیم‌گیری در مورد مسائل کیفی منجر به وجود اختلاف در شرایط واقعی و درک شده مسئله می‌شود.



شکل۵-۱۶: اختلاف بین شرایط واقعی و درک شده

۵-۳- ترسیم نمودار علی و معلولی با استفاده از داده‌های حاصل از مصاحبه

برای ارائه فرضیه‌ای در مورد رفتار دینامیک سیستم نیاز به داده می‌باشد. داده‌های فوق را به روش‌های مختلفی می‌توان جمع آوری نمود که عبارتند از: بازدید و مشاهده، مصاحبه و استفاده از مستندات موجود در رابطه با سیستم فوق.

روش بازدید و مشاهده معمولاً برای مدل‌های سیستم داینامیک روش مناسبی نمی‌باشد ولی استفاده از روش مصاحبه بسیار مفید و مناسب است. البته قابل توجه است که مصاحبه به تنهایی کافی نبوده و باید از مستنداتی که در رابطه با سیستم فوق نیز وجود دارد در کنار مصاحبه استفاده کرد. با توجه به اینکه افراد معمولاً دارای درک

منطقه‌ای و جزئی از مسائل و مشکلات یک سیستم می‌باشند لذا سعی کنید از تمام افراد مربوطه در لایه‌های مختلف مصاحبه کنید حتی از لایه‌های بیرونی نظیر مشتریان و تأمین‌کنندگان سیستم.

داده‌های حاصل از مصاحبه مجموعه‌ای غنی خواهد بود که شامل: شرح فرایندهای تصمیم‌گیری، سیاست‌های داخلی و ویژگی‌های انگیزشی موجود در سیستم و غیره می‌باشد. البته اطلاعات فوق بصورت تفکیک شده در سیستم وجود ندارد و باید از میان داده‌های مختلف سیستم استخراج شوند.

۶- فصل ششم: حالت‌ها و جریان‌ها

در این فصل به مفاهیم حالت و جریان که جزء ایده‌های اصلی سیستم داینامیک می‌باشند پرداخته خواهد شد. بدین ترتیب به حالت و جریان بصورت مفهومی و ریاضی پرداخته شده سپس نحوه ترسیم نمودار حالت-جریان شرح داده شده و در انتها به چند مثال برای درک بهتر نحوه استفاده از مفاهیم فوق اشاره می‌شود. قابل توجه است که برای ایجاد و توسعه مدل کسب مهارت در ترسیم نمودار حالت-جریان بسیار مهم است.

۶-۱- حالت‌ها، جریان‌ها و انباشتگی

نمودارهای علی و معلولی بطور شگفت‌انگیزی مفید می‌باشند. زیرا آنها ابزار خوبی برای نشان دادن وابستگی بین متغیرها و ترسیم فرایندهای بازخوردی سیستم می‌باشند. در شروع مدلسازی با استفاده از نمودارهای علی و معلولی می‌توان مدل ذهنی خود را ترسیم نمود.

نمودارهای علی و معلولی بدلیل برخی محدودیت‌ها ممکن است به راحتی نادرست مورد استفاده قرار گیرند. یکی از محدودیت‌های اصلی نمودارهای علی عدم توانایی در نمایش ساختار جریان و حالت سیستم‌ها است. بازخورد و جریان و حالت دو مفهوم کلیدی در تئوری سیستم داینامیک می‌باشند.

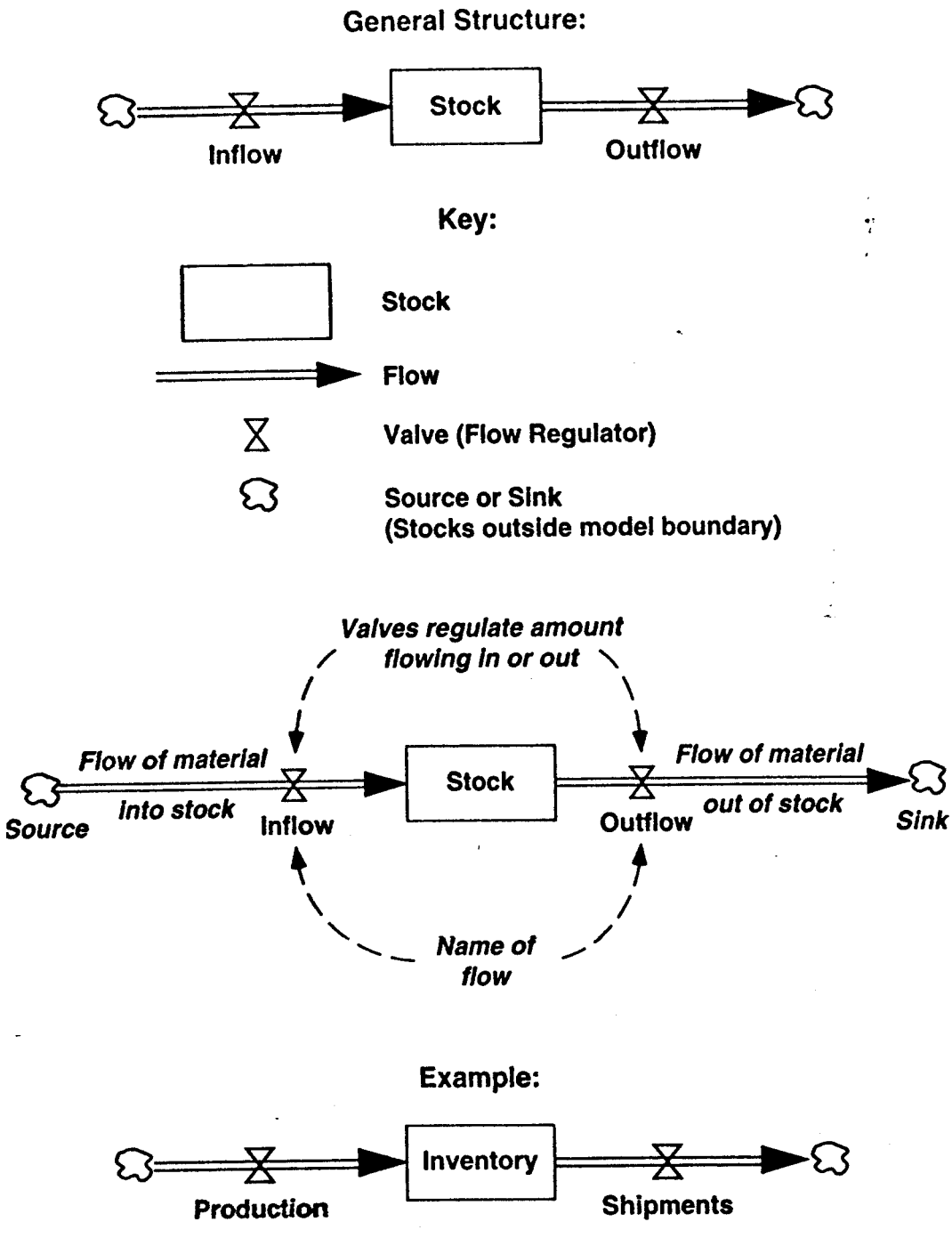
حالت‌ها، انباشتگی‌های سیستم می‌باشند. آنها نشان دهنده وضعیت سیستم بوده و اطلاعات حاصل از آنها مبنای تصمیم‌گیری‌ها است. حالت‌ها منجر به ایجاد سکون در سیستم می‌شوند. همچنین حالت‌ها با تجمع و انباشتن مابه-التفاوت خروجی‌ها و ورودی‌ها منجر به ایجاد تأخیر در سیستم می‌شوند. حالت‌ها برای همه ما آشنا می‌باشند. به عنوان مثال موجودی محصول یک شرکت تولیدی و یا تعداد پرسنل یک اداره همگی حالت‌های یک سیستم می‌باشند. حالت‌ها

توسط جریان‌ها تغییر می‌کنند. به عنوان مثال موجودی محصول توسط جریان تولید افـزایش و بـا ارسـال محصـول بـه مشتری کاهش می‌یابد.

۶-۱-۱- سمبل‌های مورد استفاده در ترسیم حالت‌ها و جریان‌ها

سیستم داینامیک برای ترسیم نمودار حالت–جریان از مجموعه‌ای از سمبل‌های خاص استفاده می‌کند:

- حالت‌ها با استفاده از یک مستطیل نمایش داده می‌شوند(مانند یک کانتینر که شامل موجودی از کالا است).
- جریان ورودی بصورت فلش با جهتی به سمت حالت ترسیم می‌شود که نشان دهنده افزایش حالت می‌باشد.
- جریان خروجی بصورت فلش با جهتی به سمت خارج حالت ترسیم می‌شود که نشان دهنده کاهش حالت می‌باشد.
- شیرهایی روی جریان‌های ورودی و خروجی که نشان دهنده کنترل بر جریان می‌باشند.



شکل ۶-۱: سمبل‌های نمودار حالت-جریان

۶-۱-۲- نمایش ریاضی حالت‌ها و جریان‌ها

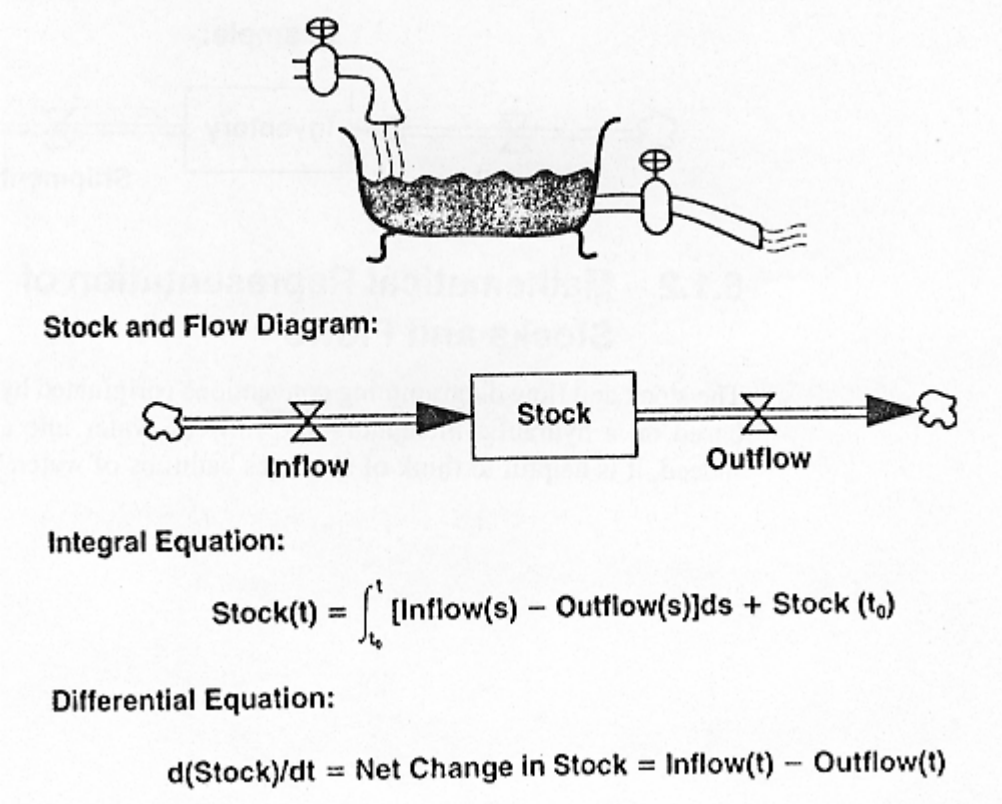
سمبل‌های بکار رفته برای ترسیم نمودارهای حالت–جریان اولین بار توسط فارستر ابداع شد و برگرفته از مباحث هیدرولیک است. به عبارت دیگر حالت استعاره‌ای از منبع آب و جریان نیز نشان دهنده جریان آب ورودی یا خروجی است.

$$Stock(t) = \int_{t_0}^{t} [Inflow(s) - Outflow(s)]ds + Stock(t_0)$$

میزان تغییرات حالت در واحد زمان برابر است با نرخ خالص افزایش حالت و یا اختلاف نرخ ورودی و خروجی:

$$d(Stock)/dt = Inflow(t) - Outflow(t)$$

جریان ورودی نیز تابعی از حالت، سایر متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم می‌باشد.



شکل ۶-۲: روش‌های مختلف نمایش حالت–جریان که همه دارای یک مفهوم می‌باشند.

۶-۱-۳- نقش حالت‌ها در ایجاد دینامیک سیستم

حالت‌ها در ایجاد دینامیک سیستم‌ها نقش اصلی ایفا می‌کنند که در ادامه به دلایل آن پرداخته می‌شود:

۱. متغیرهای حالت نشان دهنده وضعیت سیستم بوده و تصمیمات و فعالیت‌های سیستم نیزبر پایه آنها صورت می‌گیرد: متغیرهای حالت با تهیه اطلاعات مورد نیاز، موقعیت فعلی سیستم را به تصمیم‌گیرنده نشان می‌دهند. به عنوان مثال یک خلبان آموزشی باید نسبت به موقعیت ارتفاع، سطح سوخت و ... آگاه باشد تا بتواند تصمیم مناسب را اتخاذ کند. در صورت عدم آگاهی نسبت به مسائل فوق نمی‌توان امیدوار بود که به مدت طولانی پرواز نماید.

۲. مغیرهای حالت، سیستم‌هایی با سکون و پایداری بیشتر و دارای حافظه تاریخی ایجاد می‌کنند: مقدار متغیر حالت تجمع رویدادهای گذشته است. به عبارت دیگر با تغییر متغیر نرخ ورودی و یا خروجی است که مقدار متغیر حالت تغییر می‌کند در غیر اینصورت مقدار متغیر حالت تغییر نخواهد کرد. به عنوان مثال موجودی گازهای مخرب لایه ازن را درنظر بگیرید. حتی با کاهش نرخ افزایش گازهای فوق باز هم تا مدت طولانی مشکل گازهای فوق وجود خواهد داشت چراکه نرخ کاهش آنها به کندی صورت گرفته و مقدار متغیر حالت به کندی تغییر خواهد نمود. حافظه و اعتقادات شما یک متغیر حالت می‌باشد که ذهنیت شما را نسبت به پدیده-های مختلف می‌سازد. ممکن است شما یک سفر هوایی سالها قبل داشته باشید و از سرویس ارائه شده ناراضی باشید بدین ترتیب درصورتی که مدت‌ها سفر هوایی نداشته باشید حتی با بهبود وضعیت سرویس خطوط هوایی کماکان شما ذهنیت خوبی در رابطه با این مسئله ندارید.

۳. متغیرهای حالت منبع تأخیرها می‌باشند: تمام تأخیرها شامل متغیرهای حالت هستند. تأخیر فرایندی است که در آن خروجی نسبت به ورودی دیرتر رخ می‌دهد. اختلاف بین متغیر ورودی و خروجی در یک متغیر حالت قرار می‌گیرد. بین نامه‌ای که شما می‌فرستید و زمان دریافت نامه شما یک فاصله زمانی وجود دارد. در این فاصله زمانی نامه شما در یک متغیر حالت بنام " موجودی نامه‌های در حال گذر" قرار خواهد گرفت. به عنوان مثال بین تصمیم برای ساختن ساختمان‌های اداری و ساختمان‌های اداری آماده استفاده چندین سال تأخیر وجود دارد. بدین ترتیب بین این دو وضعیت: دو متغیر حالت وجود دارد: پروژه‌های تصویب شده و ساختمان-های در دست ساخت.

۶-۲- مشخص نمودن متغیرهای حالت و جریان

تشخیص متغیر حالت و جریان به روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. جدول ۶-۱ چند مورد از روش‌های مورد استفاده در شرایط مختلف را بیان می‌کند. در ریاضیات، سیستم داینامیک، تئوری کنترل و سایر شاخه‌های مهندسی وابسته. از حالت به عنوان‌های "انتگرال" و "متغیر حالت یا وضعیت" نام می‌برند. از متغیر جریان نیز با عنوان‌های "نرخ" و " مشتق" یاد می‌شود. در علم شیمی به متغیر حالت " محصولات واکنش " و به متغیر جریان نیز " نرخ واکنش" گفته می‌شود. در بخش تولید به متغیر حالت "بافر" و به متغیر نرخ " توان عملیاتی " گفته می‌شود. در اقتصاد به متغیر حالت "سطح" و به متغیر جریان " نرخ" گفته می‌شود.

چگونه می‌توان گفت که متغیری حالت و متغیر دیگر جریان است؟ متغیرهای حالت مقدار مواد یا سایر انباشته‌ها می‌باشند که حالت و وضعیت سیستم را نشان می‌دهند. متغیرهای جریان نرخی می‌باشند که حالت و وضعیت سیستم را تغییر می‌دهند.

Field	Stocks	Flows
Mathematics, physics and engineering	Integrals, states, state variables, stocks	Derivatives, rates of change, flows
Chemistry	Reactants and reaction products	Reaction rates
Manufacturing	Buffers, inventories	Throughput
Economics	Levels	Rates
Accounting	Stocks, balance sheet items	Flows, cash flow or income statement items
Biology, physiology	Compartments	Diffusion rates, flows
Medicine, epidemiology	Prevalence, reservoirs	Incidence, infection, morbidity and mortality rates

جدول۶-۱: روش تمایز بین متغیر حالت و جریان در بخش‌های مختلف

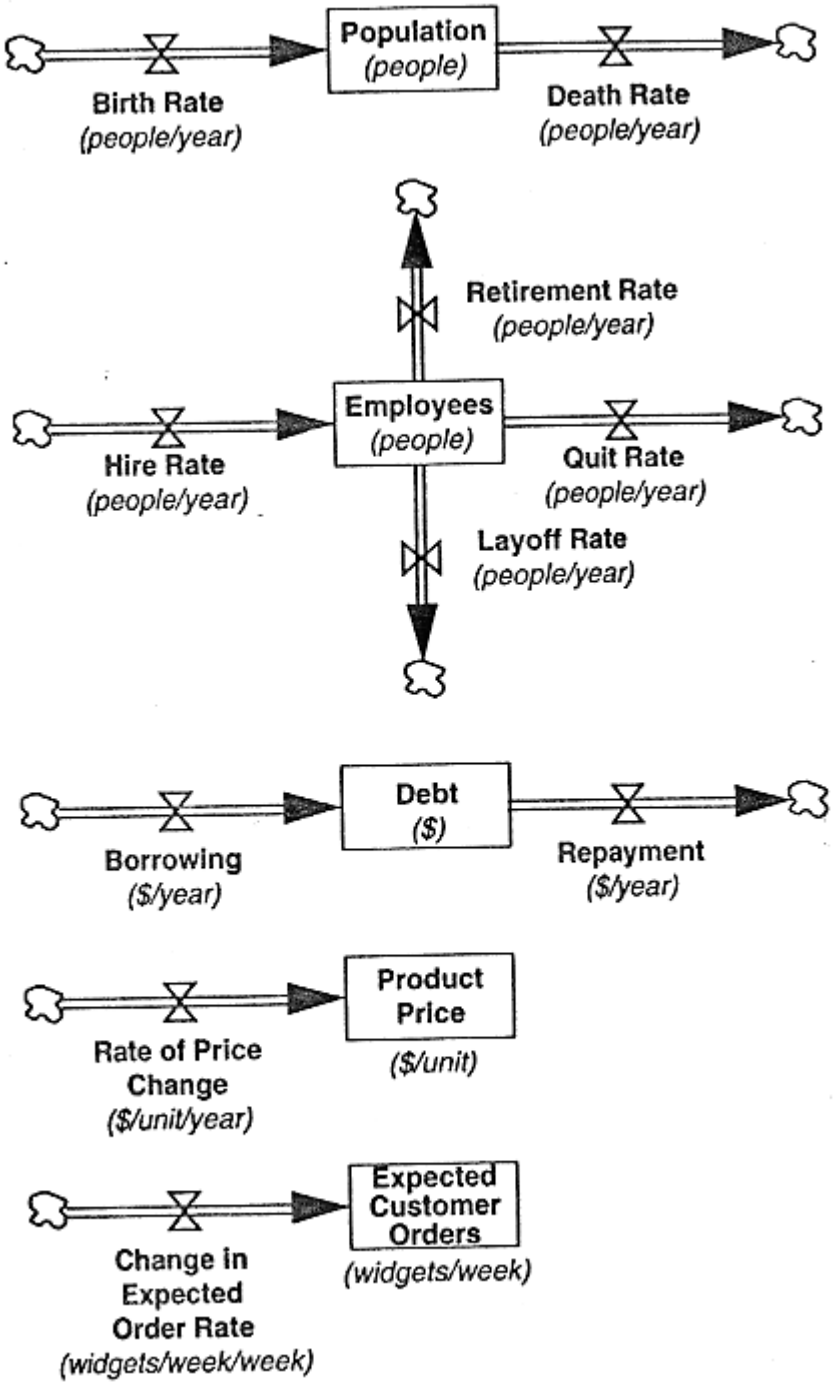
۶-۲-۱- واحدهای اندازه‌گیری برای متغیرهای حالت و جریان

واحدهای اندازه‌گیری برای تشخیص بین متغیرهای حالت و جریان به شما کمک می‌کنند. متغیرهای حالت معمولاً بصورت مقدار می‌باشند به عنوان مثال تعداد کالاهای داخل انبار و یا تعداد شاغلین. متغیرهای جریان نیز دارای همان واحد می‌باشند با این اختلاف که در یک بازه زمانی تعریف می‌شوند. به عنوان مثال نرخ اضافه شدن و یا کم شدن از انبار دارای واحد تعداد در روز و یا تعداد در یک بازه زمانی می‌باشد.

۶-۲-۲- تست تصویر لحظه‌ای

متغیرهای حالت وضعیت سیستم را نشان می‌دهند. برای تفکیک متغیرهای حالت از جریان، تجسم کنید که یک تصویر از سیستم بگیرید به عبارت دیگر فرض کنید سیستم از حرکت بایستد در اینصورت متغیرهایی که قابل اندازه-گیری و یا شمارش می‌باشند متغیر حالت هستند. به عنوان مثال فرض کنید یک تصویر از مخزن آب و یا یک دریاچه گرفته شود با استفاده از تصویر فوق می‌توان در رابطه با سطح آب و یا حجم آب اظهار نظر نمود ولی نمی‌توان نرخ بالا آمدن یا پایین رفتن آب را تعیین نمود. بنابراین سطح و یا حجم آب متغیر حالت بوده و نرخ تغییر سطح آب متغیر جریان می‌باشد.

شکل ۶-۳ تعدادی از متغیرهای حالت را نشان می‌دهد که توسط متغیرهای جریان تعیین شده تغییر می‌کنند. نرخ سفارش مورد انتظار یک متغیر حالت است در صورتی که نرخ سفارش خود متغیر جریان می‌باشد. نرخ سفارش مورد انتظار یک برداشت ذهنی از روند گذشته نرخ سفارش است. بنابراین تا هنگامی که تغییری در وضعیت سیستم رخ ندهد در رابطه با نرخ سفارش ذهنیت سابق وجود دارد. در صورتی که واحد نرخ سفارش تعداد در هفته باشد واحد نرخ سفارش مورد انتظار نیز تعداد در هفته خواهد بود و نرخ تغییر در ذهنیت ما نسبت به نرخ سفارش نیز دارای واحد تعداد بر هفته بر هفته خواهد بود.



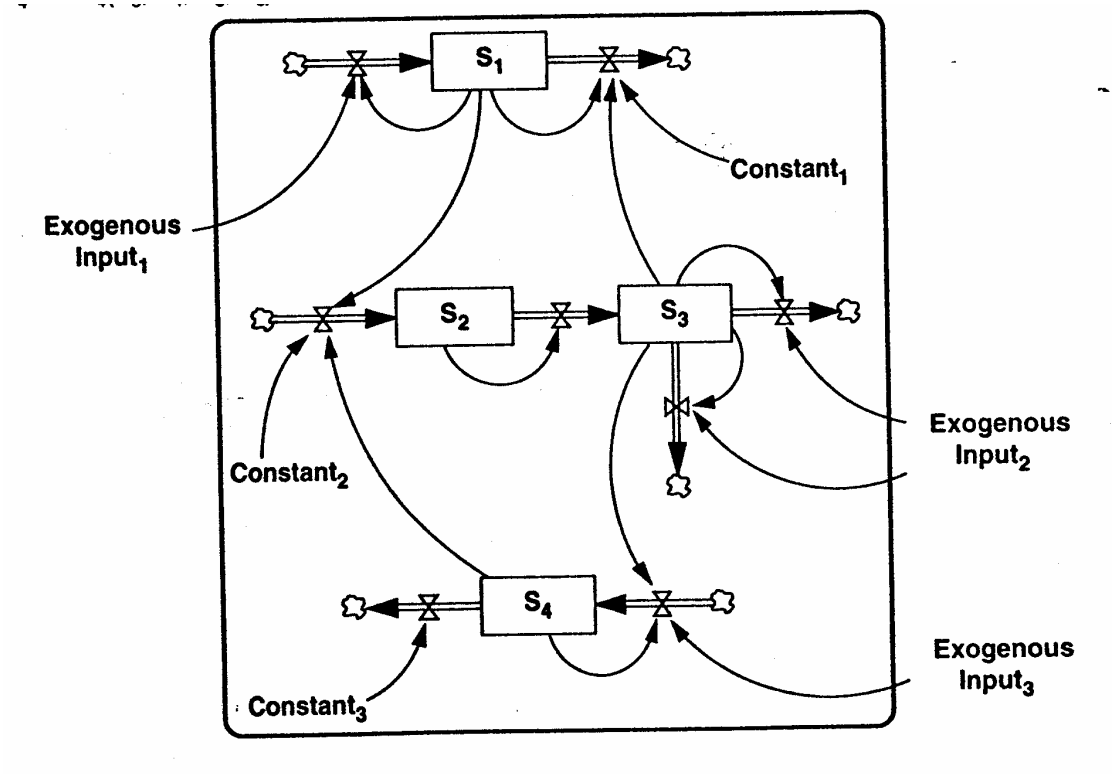
شکل ۶-۳: مثال‌هایی از متغیرهای حالت و جریان به همراه واحدهای آنها

۶-۲-۳- حفظ مواد در شبکه‌های متغیر حالت و جریان

یکی از قابلیت‌های مهم نمایش متغیرهای حالت و جریان تفکیک شفاف بین متغیرهای جریان فیزیکی است زیرا توسط شبکه متغیرهای حالت و جریان و بازخوردهای اطلاعاتی که متغیرهای حالت و جریان را به یکدیگر ارتباط می‌دهد می‌توان بازخوردهای سیستم را ترسیم نمود.

۶-۲-۴- سیستم‌های بر پایه متغیر حالت

تئوری سیستم داینامیک بر پایه تعیین متغیرهای حالت بنا شده است. متغیر حالت تنها از طریق متغیرهای نرخ ورودی و خروجی تغییر می‌کند. بنابراین متغیرهای حالت تعیین کننده متغیرهای جریان مورد نیاز می‌باشند. بدین ترتیب سیستم‌ها متشکل از شبکه‌ای از متغیرهای حالت و جریان می‌باشند که بوسیله بازخوردهای اطلاعاتی که از سمت متغیرهای حالت به متغیرهای جریان صورت می‌گیرد به یکدیگر متصل می‌باشند.



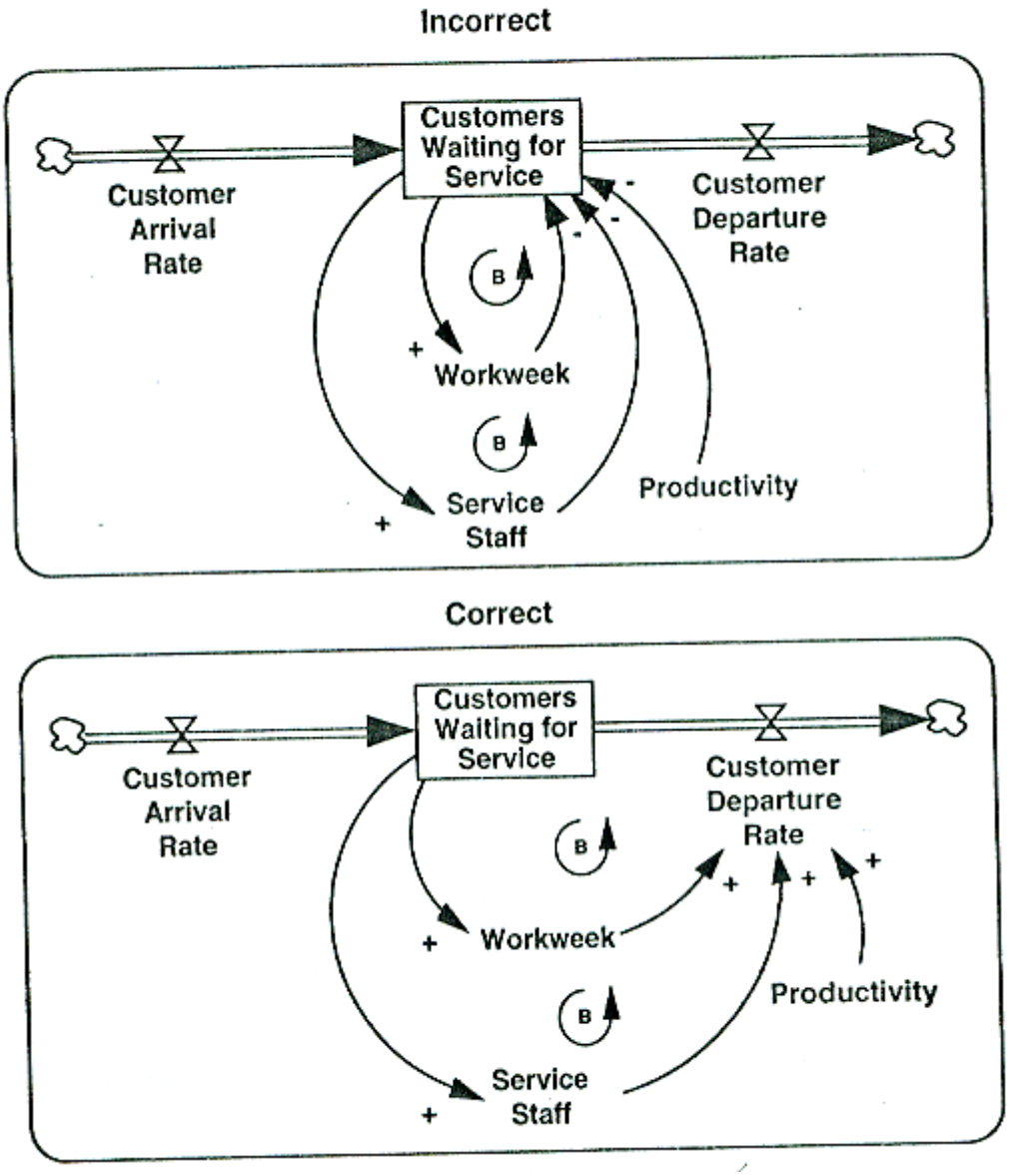
شکل ۶-۴: شبکه‌ای از متغیرهای حالت و جریان که بوسیله بازخوردهای اطلاعاتی به یکدیگر مرتبط شده‌اند

۶-۲-۵- متغیرهای کمکی

با توجه به شکل ۶-۶ شما می‌توانید فقط با استفاده از متغیرهای حالت و جریان مدل خود را بسازید ولی در اینصورت ممکن است روابط ریاضی بین متغیرهای شما بسیار پیچیده باشد بدین ترتیب توصیه می‌شود برای درک بهتر مدل از برخی متغیرهای کمکی برای مدلسازی استفاده نمائید.

۶-۲-۶- متغیرهای حالت تنها از طریق متغیرهای جریان تغییر می‌کنند

روند تغییرات در شبکه متغیرهای حالت و جریان بدین ترتیب است که با توجه به سطح متغیرهای حالت و از طریق بازخوردهای اطلاعاتی مقدار متغیرهای جریان تغییر نموده و با تغییر متغیرهای جریان مقدار متغیر حالت تغیر خواهد نمود. بنابراین تغییر متغیر حالت فقط از طریق متغیرهای جریان صورت خواهد گرفت.



شکل۶-۵: متغیرهای حالت تنها از طریق متغیرهای جریان تغییر می‌کنند

۶-۲-۷- زمان پیوسته و متغیرهای جریان آنی

در سیستم داینامیک زمان بصورت پیوسته بوده و وقایع و رویدادها می‌توانند در هر لحظه از زمان روی دهند. یک مدل سیستم داینامیک با توجه به درجات بالای معادلات دیفرانسیل آن بصورت ریاضی قابل حل نبوده و بصورت محاسبات عددی حل می‌شود. در محاسبات عددی، زمان به بازه‌های کوچک شکسته شده در بازه‌های زمانی فوق محاسبات انجام می‌شود. در تعیین بازه‌های زمانی فوق باید دقت نمود که از کوچکترین زمان تأخیر موجود در مدل کوچکتر باشد.

۶-۲-۸- متغیرهای جریان پیوسته در مقابل گسسته

متغیرهای جریان در نهایت بصورت گسسته می‌باشند. به عنوان مثال متغیر جریان استخدام متشکل از نشان دهنده تعداد افراد بکار گرفته شده است و این در حالی است که کمترین مقدار آن یک نفر کامل می‌باشد. در رابطه با نرخ وارد نمودن نفت با استفاده از تانکر نیز کمترین مقدار برابر یک تانکر است. در مثال مخزن آب و نرخ ورود و خروج آب نیز لوله آب از تعدادی ملکول آب تشکیل شده است. پس در نهایت تمام متغیرهای جریان گسسته می‌باشند. برای مدلسازی متغیرهای فوق در سیستم داینامیک فرض بر پیوسته بودن متغیرها است. البته گسسته یا پیوسته فرض کردن متغیر جریان بسته به هدف از مطالعه فوق متفاوت است. به عنوان مثال در صورتی که هدف بررسی رفتار ورود و خروج نفت به یک پالایشگاه باشد می‌توان فرض پیوسته بودن متغیر جریان را درنظر گرفت ولی درصورتی که هدف محاسبه تعداد ایستگاه‌های خدمات‌دهی به تانکرها باشد باید متغیر جریان را گسسته فرض نموده و از روش‌های مدلسازی گسسته مانند تئوری صف استفاده کرد.

۶-۲-۹ نکته عملی: ترسیم متغیرهای حالت و جریان بصورت عملی

روش‌های مختلف نمایش مدل که در شکل ۶-۲ اشاره شد همگی دارای یک مفهوم می‌باشند ولی در شکل‌های مختلف. بنابراین هنگامی که می‌خواهید یکی از روش‌های فوق را برای نمایش مدل خود انتخاب کنید به دو نکته توجه کنید:

- مفاهیم مدل مورد نظر شما با کدام روش سازگارتر است
- دیگاه مشتری مدل شما چگونه است

۶-۳- ترسیم متغیرهای حالت و جریان

۶-۳-۱- میزان کلیات و جزئیات در ترسیم نمودارهای حالت-جریان

توانایی ترسیم نمودارهای حالت-جریان برای یک مدلسازی مناسب بسیار مهم است. معمولاً بدین صورت است که ابتدا متغیرهای حالت اصلی سیستم مشخص شده سپس متغیرهای جریانی که متغیرهای حالت فوق را تغییر می‌دهند تعیین می‌شوند. شما باید سطح مناسبی برای میزان کلیات و جزئیات متغیرهای حالت و جریان در نظر بگیرید. سطح یکپارچگی مدل معرف تعداد دسته‌بندی‌های داخلی و یا تعداد متغیرهای حالت می‌باشد.

۶-۳-۲- راهنمای تعیین سطح کلیات یا جزئیات مدل

سطح بهینه ریز شدن در مدل چقدر است؟ مهمترین عامل در تعیین تعداد اجزاء سریی از متغیرهای حالت، میانگین مدت زمان ماندن هر یک از آیتم‌ها در داخل متغیر حالت (مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک آیتم وارد متغیر حالت شده و از آن خارج شود) می‌باشد. کوتاه بودن یا طولانی بودن مدت زمان متغیر حالت بستگی به افق زمانی مدل و تأثیر متغیر حالت فوق در افق زمانی بر رفتار مدل دارد. به عنوان مثال در مدل آقای نایل که به بررسی اثرات بلندمدت ذخایر نفتی می‌پردازد متغیرهای حالت نشان دهنده سطح موجودی ذخایر کشف نشده و کشف شده می‌باشند. در این مدل نیازی به ترسیم متغیرهای حالت موجودی نفت در جریان تولید پالایشگاه‌ها نمی‌باشد. در صورتی که در مدل بررسی نوسانات کوتاه مدت قیمت برق نقش موجودی نفت در جریان تولید و یا موجودی نفت در تانکرهای بین راه بسیار مهم است ولی موجودی ذخایر کشف شده و نشده هیچ تأثیری بر مدل فوق ندارد چراکه تغییرات متغیرهای حالت فوق در مدل نوسانات کوتاه مدت قیمت نفت بسیار کند و آهسته است.

در فعالیت‌های موازی درصورتی که ساختار و قواعد تصمیم گیری و مدت زمان متغیرهای حالت یکسان و مشابه باشد می‌توان آنها را یکپارچه نموده و با یک متغیر حالت نمایش داد. به عنوان مثال می‌توان به ساختار تصمیم گیری و زمان متغیرهای حالت قطعات مورد نیاز برای ساخت یک محصول اشاره کرد که اغلب مشابه می‌باشند.

بصورت کلی سطح ریز شدن در مدل به دو عامل بستگی دارد: میزان جزئیات نیازمندی‌های مشتری مدل و اینکه مدل تا اندازه‌ای ریز شود که بتوان اطمینان مشتری مدل را نسبت به صحت عملکرد مدل جلب نمود.

در مثال فرایند تولید، جریان مواد از تولید شروع شده و از موجودی قطعات در حال ساخت به موجودی محصول نهایی منتقل و درنهایت به مشتری ارسال می‌شود. در مثال فوق تمام مراحل ساخت از قبیل تولید، مونتاژ و سایر مراحل بصورت یکپارچه با عنوان موجودی قطعات در حال ساخت بیان شده‌اند. در رابطه با موجودی محصول نهایی نیز ممکن است شرکت دارای محصولات متنوعی باشد که بصورت یکپارچه و با عنوان موجودی محصول نهایی اشاره شده است. میزان جزئیات مدل بستگی به هدف از ساخت مدل دارد. در صورتی که هدف مطالعه دقیق فرایند تولید باشد باید متغیر حالت موجودی قطعات در حال ساخت شکسته شده و شامل قطعات در حال تولید، مونتاژ و تست باشد.

بدین ترتیب درصورتی که نیاز باشد می‌توان موجودی قطعات را با دقت بیشتری بررسی نموده و به سه متغیر حالت: موجودی قطعات سالم، موجودی قطعات قابل دوباره کاری و موجودی قطعات معیوب تقسیم نمود.

در مثال فوق به تفکیک متغیرهای یکپارچه بصورت سری اشاره شد. در صورتی که لزوماً تفکیک متغیرهای یکپارچه بصورت سری نبوده و امکان دارد بصورت موازی صورت گیرد. به عنوان مثال می‌توان به فرایند تولید خودرو اشاره کرد.

بدین ترتیب هنگامی که با یک فرایند پیچیده روبرو می‌شویم باید چه کرد؟ آیا باید متوقف شد؟ یا اینکه مدل را به جزئیات بیشتری شکست؟ تا چه حد باید ریز شد؟ تمام موارد فوق به هدف شما از مدلسازی و نیاز مشتری مدل بستگی دارد.

به عنوان مثال اگر هدف بررسی میزان تأخیر در عکس‌العمل شرکت در قبال تغییر تقاضا به عنوان جزئی از یک مدل بزرگتر برنامه ریزی استراتژیک می‌باشد، ساده‌سازی مدل مناسب‌تر خواهد بود ولی اگر هدف طراحی مجدد خط تولید و مطالعه گلوگاه‌های تولید می‌باشد، باید جزئیات بیشتری را در نظر گرفت.

توصیه می‌شود برای ترسیم مدل از بالاترین سطح یکپارچگی شروع نموده و برحسب نیاز برای رسیدن به هدف اقدام به تفکیک متغیرهای مورد نظر نمود. درصورتی که اگر ساخت مدل با جزئیات زیاد شروع شود ممکن است ادامه مدلسازی با مشکل مواجه شده و نتوان داده‌های مورد نیاز را تهیه نمود.

۷- فصل هفتم: دینامیک حالت‌ها و جریان‌ها

در فصل ششم این کتاب مفهوم متغیرهای حالت و جریان و تکنیک‌های ترسیم شبکه حالت و جریان معرفی شد؛ این بخش به بررسی رفتار متغیرهای حالت و جریان می‌پردازد. با فرض پویایی (Dynamic) متغیرهای جریان رفتار متغیرهای حالت چگونه خواهد بود؟ رفتار متغیرهای جریان از طریق پویایی متغیرهای حالت قابل استنباط است؟ این کارها معادل انتگرال گرفتن از متغیرهای جریان برای بدست آوردن متغیر حالت و مشتق گرفتن از متغیر حالت برای محاسبه نرخ خالص تغییر آن است. برای افرادی که آشنایی چندانی با حساب دیفرانسیل و انتگرال ندشته باشند این مفاهیم قدری ترسناک است. در واقع درک ارتباط بین متغیر حالت و متغیر جریان کاملا شهودی است.

در صورتیکه شما پشتوانه قوی از انتگرال و معادلات دیفرانسیل داشته باشید چگونه خواهد بود؟ بطور کلی حل برخی از مدل‌های بسیار کوچک بصورت جبری به دلیل غیر خطی بودن آنها غیر ممکن است. بنابراین ابزارهای ریاضی که بسیاری از افراد فرا گرفته اند کارایی کمی در حل چنین مسائلی دارد. در صورتی که شما پشتوانه قوی از حساب دیفرانسیل و انتگرال داشت باشید این فصل برایتان بسیار آسان و قابل فهم خواهد بود ولی هنوز باید از روشهای گرافیکی استفاده کنید تا مطمئن شوید که درک شهودی شما به اندازه دانش فنی تان قابل اطمینان است. مدل‌سازها فارغ از توان ریاضی آنها باید قادر باشند تا ارتباط بین رفتار متغیرهای حالت و جریان را بصورت شهودی و با استفاده از ابزارهای گرافیکی و غیر ریاضی درک و ایجاد نمایند.

این بخش همچنین نشان خواهد داد که چگونه پویایی متغیرهای حالت و جریان بینش و بصیرت لازم را برای سیاست‌گذاری دو مسئله مهم: "افزایش دمای زمین" و " کشمکش و نزاع به دلیل مواد مخدر" ایجاد می‌نماید.

۷-۱- ارتباط بین متغیرهای جریان و حالت

تعاریف پایه مربوط به متغیرهای حالت و جریان را به یاد آورید: نرخ خالص تغییر متغیر حالت عبارت است از مجموع ورودی‌ها منهای مجموع خروجی‌های آن متغیر. متغیرهای حالت مجموع نرخ خالص تغییر می‌باشند. تعریف ریاضی بدین صورت خواهد بود که: متغیرهای حالت انتگرال خالص نرخ جریان بوده و خالص جریان مشتق متغیر حالت است.

۷-۱-۱- تعادل استاتیک و دینامیک (ایستا و پویا)

یک متغیر حالت در تعادل است هرگاه تغییری در آن صورت نگیرد (یک سیستم در حالت تعادل است هرگاه تمامی متغیرهای حالت آن در حال تعادل باشند) برای متغیر حالتی که به تعادل رسیده خالص نرخ تغییر باید صفر باشد به عبارتی کل جریان ورودی مساوی کل جریان خروجی مربوط به متغیر حالت باشد. بعنوان مثال در صورتی که نرخ آب خروجی از یک وان حمام برابر نرخ آب ورودی به آن باشد می‌توان نتیجه گرفت که اندازه و مقدار آب در درون وان ثابت مانده و وان به تعادل خواهد رسید. این حالت، تعادل پویا نام دارد زیرا که آب درون وان همواره در حال تغییر است.

تعادل ایستا زمانی است که تمامی جریان‌های ورودی و خروجی به متغیر حالت برابر صفر باشند. در این صورت نه تنها مقدار آب موجود در وان ثابت است بلکه آبی که در وان قرار دارد در طی زمان بدون تغییر باقی می‌ماند. تعداد اعضای مجلس سنای امریکا از تاریخ ۱۹۵۵ در تعادل استاتیک قراردارد.

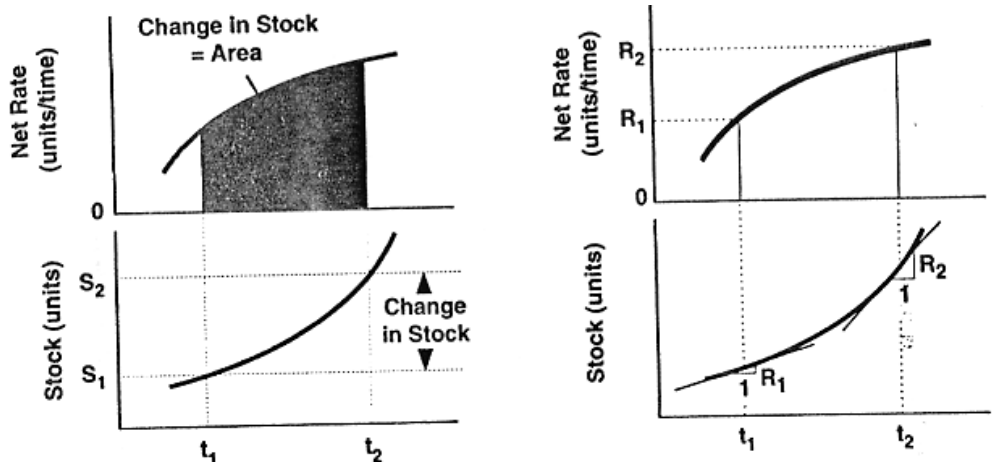
۷-۱-۲- حساب دیفرانسیل و انتگرال بدون ریاضیات

برای درک پویایی شما باید قادر به برقراری ارتباط بین رفتار متغیرهای حالت و جریان در یک سیستم باشید. با فرض وجود جریانات ورودی به یک متغیر حالت رفتار آن چگونه خواهد بود؟ با فرض وجود رفتار یک متغیر حالت، خالص نرخ ورود آن چگونه خواهد بود؟ این سؤالات محدوده و دامنه حساب دیفرانسیل و انتگرال است. حساب دیفرانسیل و انتگرال قواعدی را فراهم می‌نماید که بتوان به این پرسش‌ها بصورت ریاضی پاسخ گفت؛ حساب دیفرانسیل و انتگرال یکی از کاربردی ترین و مفیدترین شاخه‌های ریاضی است که توجه بسیار کمی نسبت به آن صورت می‌گیرد. ولی خوشبختانه امکان شهودی که در زمینه ارتباط بین رفتار متغیرهای حالت و جریان وجود دارد موجب شده که برای درک رفتار بین این دو نوع متغیر نیاز به دانش بالای ریاضی وجود نداشته باشد. در صورتی که

نموداری از رفتار متغیر جریان در گذر زمان به شما داده شود همواره قادر خواهید بود تـا رفتـار متغیـر حالـت را اسـتنباط کنید؛ این فرایند تحت عنوان "انتگرال گیری ترسیمی" شناخته شده است.

همچنین از روند رفتار متغیر حالت شما می‌توانید خالص تغییرات آن را تخمین بزنید فراینـدی کـه تحـت عنـوان "مشتق گیری ترسیمی" از آن یاد می‌شود.

مقداری که در هر بازه زمانی به مقدار متغیر حالت اضافه می‌شود برابر مساحت زیر منحنی توسط نمـودار خـالص جریان در بازه زمانی مربوطه است. چرا؟

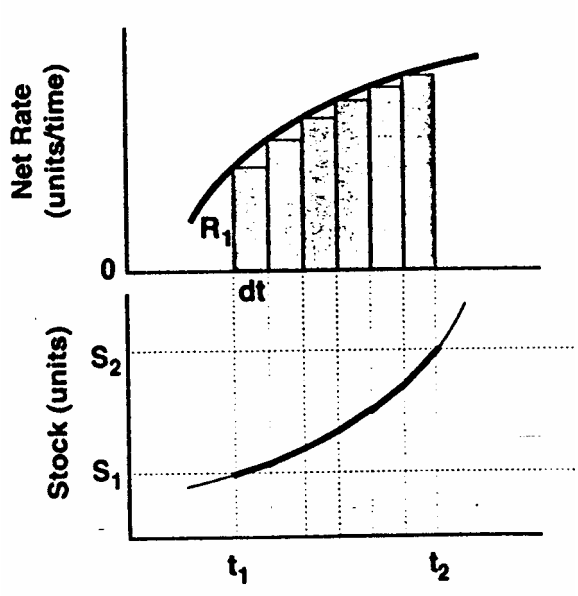


شکل ۷-۱- انتگرال گیری و مشتق‌گیری: تعاریف و مثال‌ها

مثال مربوط به وان حمام را دوباره در نظر بگیرید. در یک بازه زمانی (مثل زمان t_1 تا زمان t_2)چه مقدار آب آن اضافه می‌شود؟ کل بازه را به بخش‌های کوچکتر بگونه‌ای تقسیم کنید که نـرخ جریـان خـالص در آن بـه میـزان قابـل توجهی تغییر نکند. اندازه هریک از این قسمت‌ها dt (delta time) نامیده می‌شود. در هر بازه زمانی dt چه مقدار آب جریان می‌یابد؟ خالص مقدار آب جریان یافته در واحد زمان با متغیر R نشان داده می‌شود که با مقدار dt ضرب شـده و مقدار آب افزوده شده به متغیر حالت در بازه زمانی dt را نشان می‌دهد:

مقدار آب افزوده شده در بازه زمانی dt = R * dt

(Units) = (Units/time) * (time)



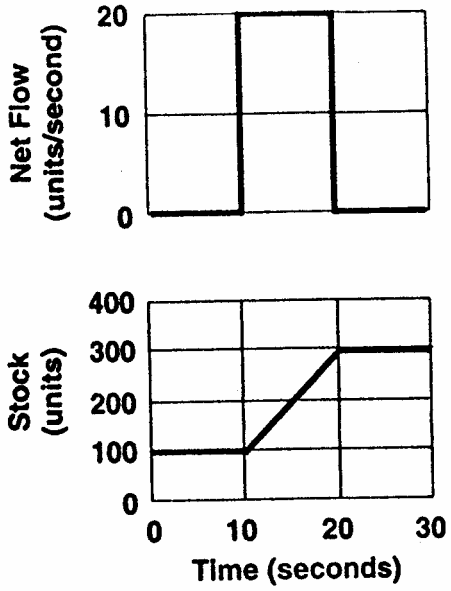
شکل ۷-۲- انتگرال گیری گرافیکی

بعنوان یک مثال عینی تصور کنید $t_1 = 1$ و $t_2 = 2$ باشد پرسش این است که چه مقدار آب بـه داخـل وان در مدت زمان یاد شده جریان خواهد یافت؟ یک دقیقه را به ۶ بازه ۱۰ ثانیه‌ای تقسیم بندی کرده و همچنـین فـرض کنیـد که نرخ جریان در هر یک از ۱۰ ثانیه ها ثابت باشد. در صورتیکه در ابتدای بازه اول جریان ۶ لیتر در دقیقه (۰,۱ لیتر در ثانیه) باشد، بنابراین مقدار افـزوده شـده در بـازه زمـانی ۱۰ ثانیـه برابـر(۱۰ Second) × (۰,۱ Liter/second) و مساوی یک لیتر خواهد بود و اگر در شروع بازه بعد (۱۰ ثانیه بعد) جریان به مقدار ۷ لیتر بر دقیقـه افـزایش یافتـه باشـد یعنی ۰,۱۱۷ لیتر بر ثانیه، مساحت مستطیل دوم مطابق شکل (۱-۷) برابر با ۱,۷۷ لیتر خواهد بود بدین ترتیب می‌تـوان مساحت هر ۶ مستطیل را بگونه‌ای که بیان شد محاسبه کرد و آنها را با هم جمع کـرد. در ایـن صـورت جمـع کـل آب جریان یافته در مدت زمان ۱ دقیقه بصورت تقریبی قابل محاسبه خواهد بود. تقریب اعمال شده خیلی مناسب نمی‌باشـد زیرا که مقدار جریان در مدت زمان ۱۰ ثانیه تغییر می‌کند لذا برای اعمال یک تقریب مناسب لازم است تـا مـدت زمـان یک دقیقه به تعداد مناسبی از بازه‌های زمانی تقسیم‌بندی می‌شد تا تعداد مستطیل‌ها در مدت زمان یک دقیقـه افـزایش یابد.

۷-۱-۳- انتگرال‌گیری گرافیکی

برای تشریح و توضیح بیشتر انتگرال گیری، یک سیستم با یـک متغیـر حالـت و متغیـر جریـان ورودی و متغیـر جریان خروجی را در نظر بگیرید. فرض کنید متغیرهای جریان برون زا باشند یعنی بازخوردی از متغیـر حالـت و جریـان

وجود نداشته باشد. جریان ورودی به متغیر حالت را مطابق شکل ۷-۳ در نظر بگیرید یعنی فرض کنید جریان خروجی از متغیر حالت صفربوده و نیز جریان ورودی از صفر شروع شود و در زمان ۱۰ بصورت ناگهانی به ۲۰ واحد بر ثانیه افزایش یافته و در آن سطح بمدت ۱۰ ثانیه ثابت مانده و در زمان ۲۰ به حالت قبلی خود (صفر) باز می‌گردد. در صورتیکه مقدار اولیه متغیر حالت ۱۰۰ واحد باشد، مقدار متغیر حالت در زمان ۳۰ چند واحد بوده و رفتار آن در طی زمان چگونه خواهد بود؟

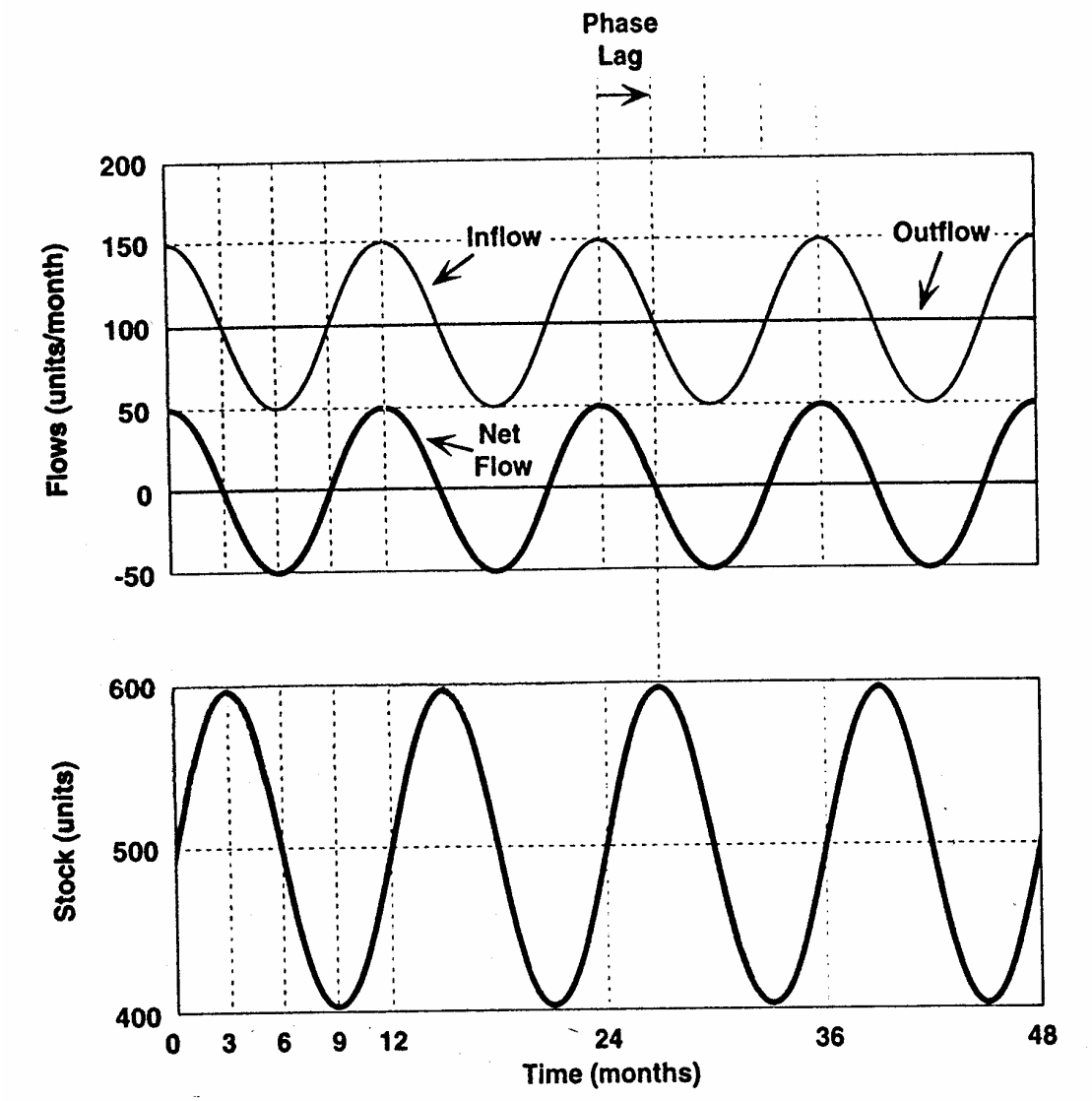


شکل(۷-۳): انتگرال گیری گرافیکی

نمودار ۷-۳ مراحل موجود در انتگرال گیری گرافیکی را نشان می‌دهد، ابتدا مجموعه‌ای محورهای مربوط به متغیر جریان و در بالای آن متغیر حالت را در نظر بگیرید سپس نرخ خالص را محاسبه کنید. از آنجایی که یک متغیرجریان ورودی و یک متغیر جریان خروجی وجود داشته و متغیر جریان خروجی صفر است، بنابراین خالص تغییرات متغیر حالت (کل جریان ورودی منهای کل جریان خروجی) برابر متغیر جریان ورودی است. مقدار اولیه متغیر حالت ۱۰۰ واحد بوده و در زمان ۰ تا ۱۰ خالص جریان صفر واحد بر ثانیه است، بنابراین متغیر حالت در این مدت زمان بدون تغییر مانده و مقدارش برابر مقدار اولیه خواهد بود، در زمان ۱۰ نرخ خالص بصورت ناگهانی به ۲۰ واحد بر ثانیه افزایش یافته و در این سطح به مدت ۱۰ ثانیه ثابت می‌ماند، مقدار افزوده شده در این مدت برابر مساحت زیر منحنی خالص جریان می‌باشد، چون نرخ خالص ثابت می‌باشد سطح زیر منحنی یک مستطیلی است با طول ۱۰ ثانیه و عرض ۲۰ واحد

بر ثانیه بنابراین مساحت مستطیل ۲۰۰ واحد بوده و مقدار متغیر حالت به این اندازه افزایش یافته و به ۳۰۰ واحد می‌رسد.

در زمان ۲۰ نرخ خالص ناگهان متوقف شده و به صفر رسیده و در این سطح ثابت باقی می‌ماند در نتیجه از این زمان به بعد نیز سطح متغیر حالت بدون تغییر و در سطح ۳۰۰ واحد باقی می‌ماند. بدین ترتیب مشاهده می‌شود که وقتی ورودی، یک پالس با دو تغییر بسیار سریع است خروجی یک نمودار نرم و پیوسته است.



شکل(۷-۴): فرآیند تجمیع تاخیر ساز است

متغیر جریان و حالت با رفتار نشان داده شده در شکل ۷-۴ را مشاهده نمایید. متغیر جریان خروجی ثابت و برابر ۱۰۰ واحد در ماه و متغیر جریان ورودی در اطراف نقطه میانگین ۱۰۰ با پریود ۱۲ ماه و دامنه ± 50 واحد در ماه در

نوسان است. در ابتدای زمان، متغیر جریان ورودی در بیشترین مقدار خود قرار داشته و مقدار متغیر حالت برابر ۵۰۰ واحد است. چون متغیر جریان خروجی ثابت است نرخ خالص جریان با دامنه ± 50 در اطراف میانگین صفر در نوسان خواهد بود. مقدار متغیر حالت از مقدار اولیه ۵۰۰ واحد شروع و به دلیل اینکه متغیر خالص نرخ در بیشترین مقدار خود قرار دارد متغیر حالت با نرخ ۵۰ واحد در ماه شروع به افزایش می‌نماید، ولی چون نرخ خالص جریان در طی سه ماه رو به کاهش است بنابراین متغیر حالت با نرخ کاهشی افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود می‌رسد در سه ماه بعدی نرخ خالص جریان منفی شده و و تا -50 ادامه می‌یابد این امر موجب کاهش مقدار متغیر حالت تا مقدار صفر می‌گردد مقدار واحد افزوده شده به متغیر حالت در در سه ماه اول برابر مساحت زیر منحنی نمودار خالص جریان در طی سه ماه است. محاسبه مساحت به دلیل تغییر مداوم نرخ افزایش و یا کاهش کار سختی می‌باشد به همین دلیل برای محاسبه مساحت زیر منحنی می‌توان از طریق مجموعه مستطیل‌های تشکیل دهنده سطح استفاده کرد و با استفاده از این روش تقریبی از مساحت زیر منحنی ایجاد کرد. شکل ۷-۴همچنین وقفه مابین متغیر جریان و حالت را نیز بخوبی نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که حداکثر متغیر حالت در زمان‌های ۳، ۱۵، ۲۷ و.. اتفاق افتاده و حداکثر مقدار مربوط به متغیر خالص جریان در زمان‌های ۰، ۱۲، ۲۴ و ... اتفاق می‌افتد این تأخیر و وقفه زمانی دقیقاً سه ماه بوده و به این دلیل ایجاد می‌شود که فقط زمانی که خالص نرخ جریان منفی باشد متغیر حالت کاهش می‌یابد.

انتگرال‌گیری ریاضی از نوسانات

نتایج حاصل از مثال ۷-۳ با استفاده مختصر از حساب دیفرانسیل و انتگرال بسیار دقیق‌تر قابل دست یابی است. متغیر حالت S انتگرال نرخ خالص جریان R است. با فرض اینکه خالص نرخ جریان تابع کسینوسی با پریود ۱۲ و دامنه ۵۰ واحد است خواهیم داشت: $R = 50\cos(2\pi t/12)$

بنابراین S برابر خواهد بود با:

$$S = \int R dt = \int 50\cos(2\pi t/12)dt = 50(12/2\pi)\sin(2\pi t/12) + S_{t_0}$$

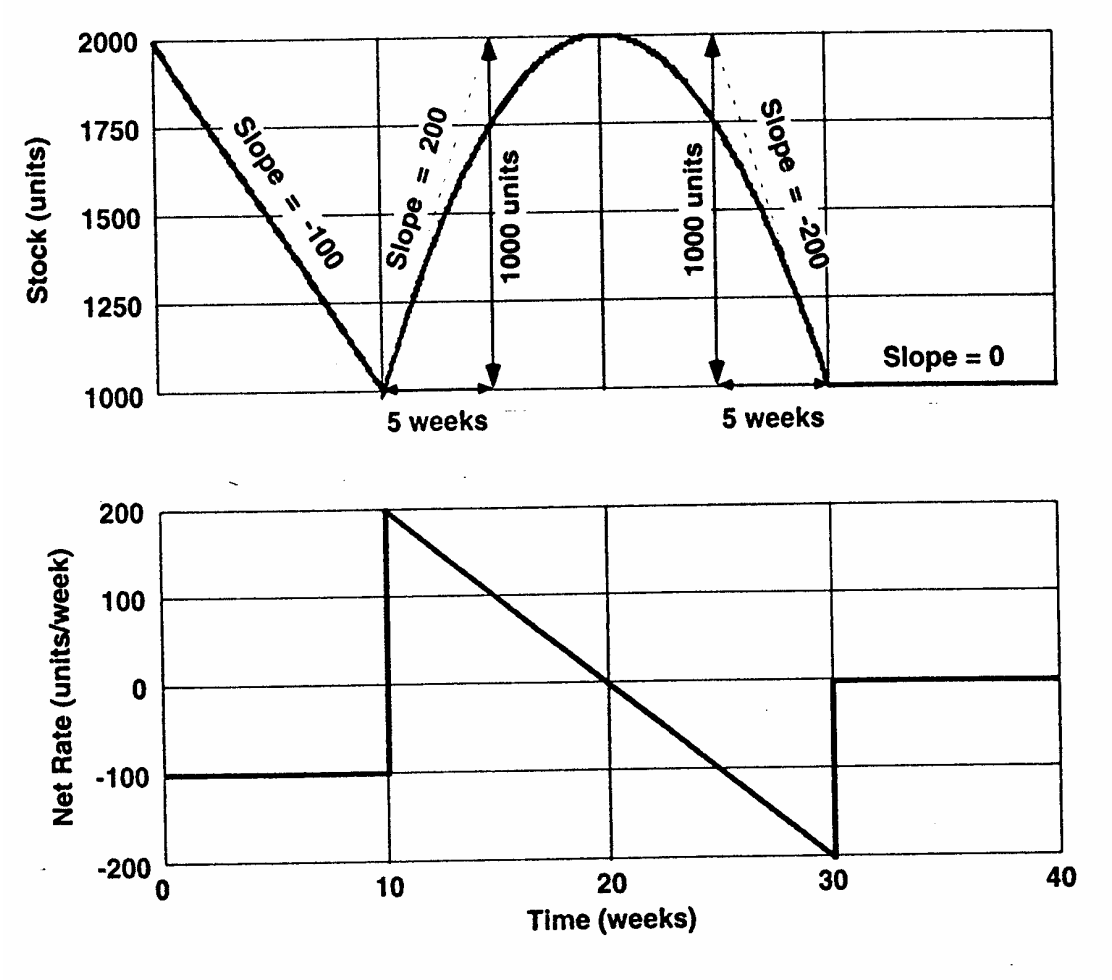
بنابراین متغیر حالت یک موج سینوسی با پریود مشابه و دامنه‌ای $(12/2\pi)$ برابر دامنه متغیر خالص جریان. تأخیر ایجاد شده در متغیر حالت به دلیل اختلاف فاز $\pi/2$ بین تابع سینوس و کسینوس است بطوریکه :

$$\sin(\theta) = \cos(\theta + \pi/2)$$

۷-۱-۴- مشتق‌گیری گرافیکی

عکس انتگرال‌گیری مشتق‌گیری است. با در نظر گرفتن نمودار متغیر حالت همواره نرخ جریان خالص آن قابل استنتاج است. همانند روش انتگرال گیری، در صورت مشخص بودن تابع متغیر حالت، روش‌های جبری (آنالتیک) برای محاسبه نرخ خالص متغیر حالت وجود دارد. ولی معمولاً در مدل‌های دینامیکی تابع آنالتیک برای رفتار متغیر حالت قابل دستیابی نیست، بنابراین ایجاد و گسترش روش گرافیکی ضروری بنظر می‌رسد.

مشتق‌گیری گرافیکی تقریباً روش ساده‌ای است بطوریکه با محاسبه شیب نمودار در هر نقطه و ترسیم آن بر روی نمودار مربوط به ترخ خالص قابل دستیابی است. نمودار شکل ۷-۵ مثالی از مشتق‌گیری گرافیکی را ارائه می‌نماید.



شکل(۷-۵): مشتق‌گیری گرافیکی

مقدار اولیه متغیر حالت در نمودار فوق برابر ۲۰۰۰ واحد است، در ۱۰ هفته اول مقدار متغیر حالت بصورت خطی کاهش می‌یابد بنابراین نرخ خالص در طی این دوره ثابت و منفی است. متغیر حالت در مدت زمان ۱۰ هفته از مقدار

۲۰۰۰ واحد به ۱۰۰۰ واحد کاهش می‌یابد بنابراین خالص نرخ ۱۰۰- واحد در هفته می‌باشد. در هفته دهم موجودی بصورت ناگهانی شروع به افزایش می‌کند مماس بر نمودار متغیر حالت در زمان ۱۰ تقریبا مقداری برابر ۲۰۰ واحد بر هفته را نشان می‌دهد بنابراین نرخ خالص از مقدار ۱۰۰ – واحد در هفته به ۲۰۰ واحد در هفته افزایش می‌یابد از هفته ۱۰ تا ۲۰ مقدار متغیر حالت افزایش می‌یابد این بدان مفهوم است که متغیر نرخ مثبت بوده و چون در زمان ۲۰ به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس روند کاهشی پیدا می‌کند می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کاهشی است تا اینکه در زمان ۲۰ به صفر برسد از زمان ۲۰ به بعد نیز مقدار متغیر حالت رو به کاهش است این بدان معنی است که متغیر نرخ منفی شده است. شیب خط مماس بر منحنی در نقطه ۳۰ برابر ۲۰۰- واحد در هفته است. و از زمان هفته ۳۰ به بعد مقدار متغیر حالت در مقدار ۱۰۰۰ واحد ثابت باقی می‌ماند که دارای مشتق صفر خواهد بود یعنی نرخ خالص از زمان ۳۰ به بعد برابر صفر است.

روش مشتق گیری گرافیکی خالص نرخ جریان را بدست می‌دهد. در صورتیکه یک متغیر حالت دارای چند نرخ ورود و خروج باشد تعیین رفتار هریک از ورودی و خروجی‌ها از این طریق غیر ممکن است.

۸- فصل هشتم: دینامیک ساختارهای ساده

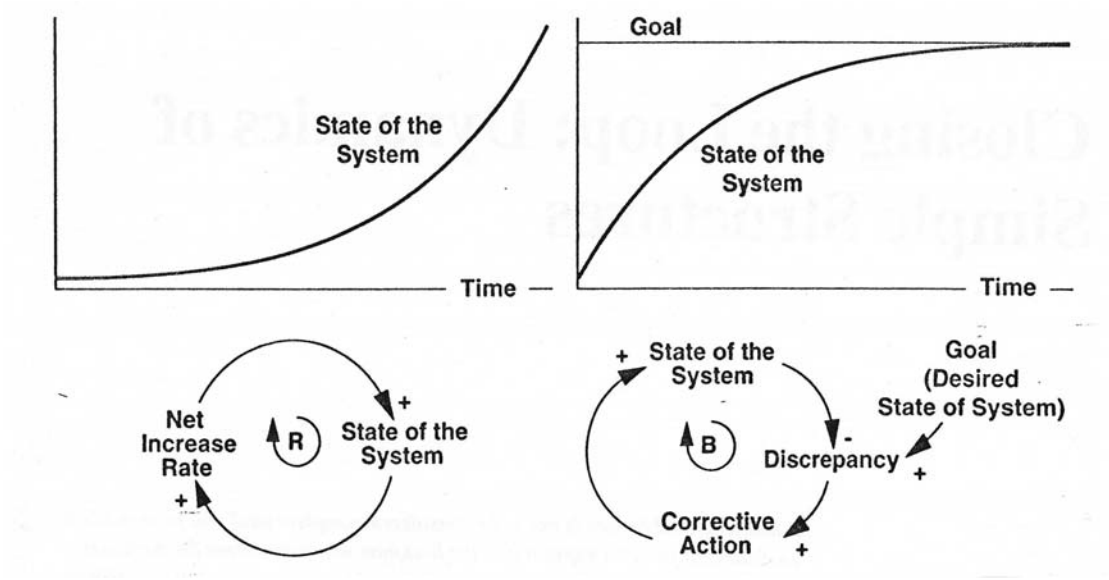
در این فصل ارتباط بین ساختار و رفتار بوسیله ترسیم ساختارهای حالت-جریان از روی روابط علی و معلولی تشریح خواهد شد. تمرکز بر روی بازخوردهای ساده‌ای است که دارای یک متغیر حالت (درجه یک) می‌باشند. سیستم-های درجه یک خطی رفتارهای رشد نمایی و هدفجو تولید می‌کنند. غیرخطی بودن در ساختارهای درجه یک منجر به انتقال بین بازخوردهای غالب شده و رفتارهایی همچون رشد S شکل ایجاد می‌کند. همچنین در این فصل مفاهیم نحوه تأثیرگذاری متغیر نرخ بر حالت و بالعکس بصورت گرافیکی و بدون نیاز به محاسبات و یا معادلات دیفرانسیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۸-۱- سیستم‌های درجه یک

در فصل چهارم به رفتارهای پایه و ساختارهای بوجود آورنده آنها اشاره شد. از رفتارهای پایه می‌توان به رفتار رشد نمایی و رشد هدفجو اشاره کرده که به ترتیب توسط بازخوردهای منفی و مثبت ایجاد می‌شوند (شکل ۸-۱).

درجه سیستم یا حلقه بازخوردی نشان دهنده تعداد متغیرهای حالت می‌باشد. بنابراین سیستم‌های درجه یک دارای یک متغیر حالت می‌باشند. سیستم‌های خطی نیز سیستم‌هایی هستند که متغیر نرخ آنها ترکیب خطی از متغیرهای حالت و مقادیر برونزا مدل می‌باشند.

$$ds/dt = NetInflow = a_1S_1 + a_2S_2 + ... + a_nS_n + b_1U_1 + b_2U_2 + ... + b_mU_m$$



شکل(۸-۱): ساختار و رفتار رشد نمایی و هدفجو

۸-۲- بازخورد مثبت و رشد نمایی

ساده‌ترین سیستم بازخوردی یک حلقه مثبت درجه یک است. در این حلقه بازخوردی فقط یک متغیر حالت وجود دارد که از تجمع متغیر جریان خالص ایجاد می‌شود. نرخ خالص افزایش وابسته به متغیر حالت است. در حالت کلی نرخ خالص افزایش تابعی از متغیر حالت است.

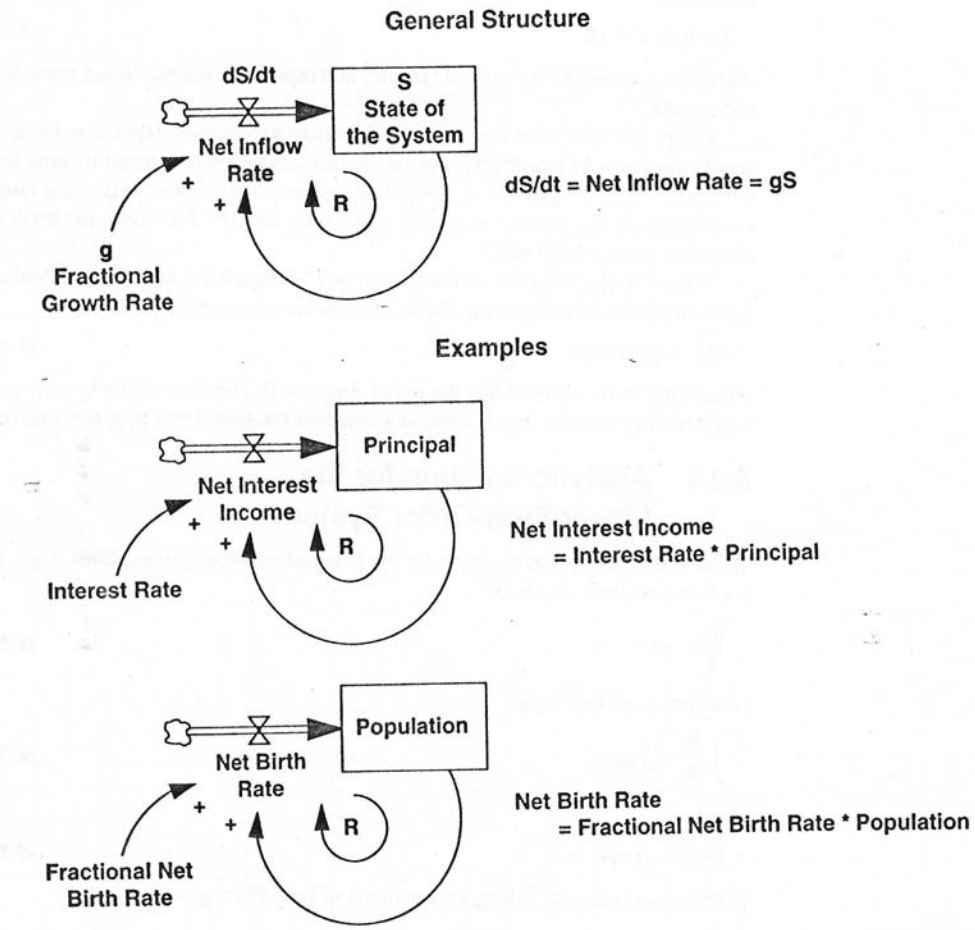
$$S = Integral\ (Net\ \ Inflow, S(0))$$

$$Net\ \ Inflow = F(s)$$

درصورتی که متغیر نرخ خالص افزایش خطی باشد ضریب ثابتی از متغیر حالت خواهد بود. g دارای واحد (۱/Time) بوده و نشان دهنده درصد نرخ رشد متغیر حالت می‌باشد.شکل (۸-۲) نشان دهنده روابط علی و معلولی و مجموعه معادلات چند مثال با رفتار رشد نمایی است. در هر یک از مثال‌های فوق متغیر حالت با یک تابع نمایی رشد می‌کند که S(۰) مقدار متغیر حالت در نقطه شروع می‌باشد.

$$Net\ \ Inflow = g * S$$

$$S(t) = S(0)\exp(gt)$$



شکل (۸-۲): مثالهایی از ساختار سیستم‌های بازخوردی مثبت خطی درجه اول

۸-۲-۱- تحلیل سیستم درجه یک خطی بصورت ریاضی

با توجه به اینکه یک سیستم درجه یک خطی با استفاده از معادلات دیفرانسیل و بصورت ریاضی قابل حل است لذا در ادامه به محاسبه ریاضی تابع متغیر حالت پرداخته می‌شود:

$$ds / dt = gt$$

$$ds / S = gdt$$

$$\int dS / S = \int gdt$$

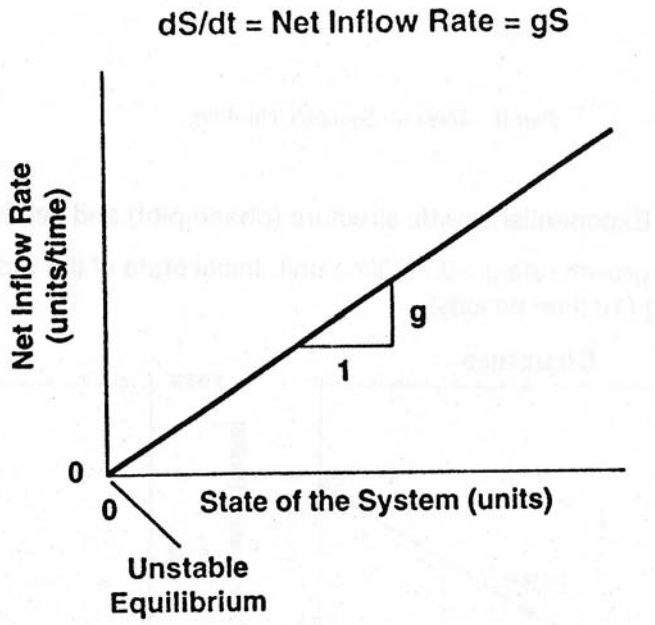
$$Ln(S) = gt + c$$

$$S = c^* \exp(gt)$$

$c^* = S(0)$

۸-۲-۲- تحلیل سیستم درجه یک خطی یک بازخورد مثبت بصورت گرافیکی

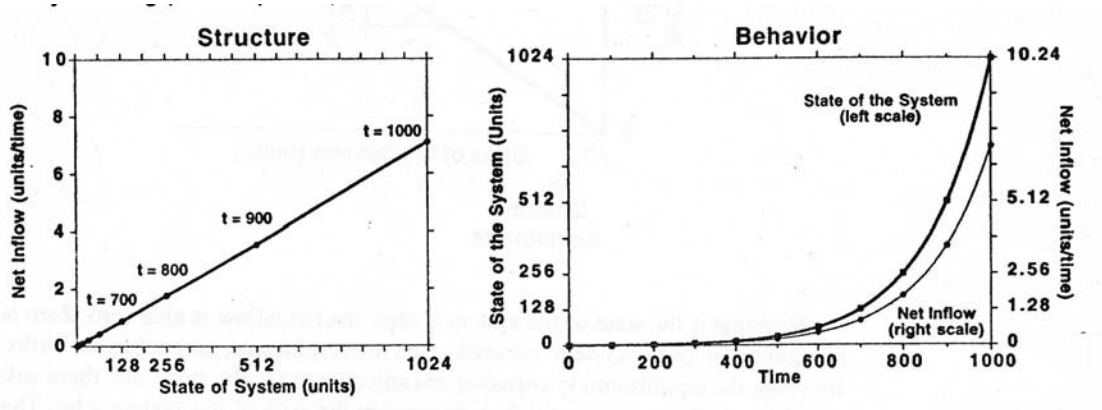
همیشه نیازی نیست که بوسیله روش‌های ریاضی مانند حساب دیفرانسیل به حل و تحلیل مسائل پرداخت بلکه با استفاده از ابزارهای گرافیکی ساده نیز می‌توان رابطه بین متغیر حالت و جریان را تشریح نمود. طبق شکل (۸-۳) نرخ خالص افزایش دارای یک رابطه خطی با متغیر حالت می‌باشد که شیب این خط مقدار ثابت g است.



شکل(۸-۳): نمودار درجه یک – سیستم بازخوردی مثبت خطی

بدین ترتیب درصورتی که مقدار متغیر حالت صفر باشد، متغیر جریان صفر بوده و با افزایش متغیر حالت، متغیر جریان به تناسب رشد می‌کند. بدین ترتیب در هر نقطه از نمودار به ازای یک واحد افزایش در متغیر حالت، متغیر جریان g واحد رشد خواهد نمود.

بنابراین با توجه به شکل (۸-۴) نرخ خالص افزایش نسبت به متغیر حالت دارای یک رابطه خطی است که نشان دهنده ساختار سیستم بوده ولی نرخ خالص افزایش و مقدار متغیر حالت نسبت به گذشت زمان دارای رشد نمایی می-باشند که نشان از نوع رفتار سیستم در گذر زمان است.



شکل (۸-۴): رفتار و ساختار رشد نمایی

۸-۲-۳- قدرت بازخورد مثبت: زمان‌های دوبرابر شدن متغیر حالت(قانون ۷۰)

حلقه بازخوردی مثبت یک فرایند بسیار قوی است. زیرا در این سیستم نرخ خالص افزایش متناسب با متغیر حالت می‌باشد. بنابراین با افزایش هر یک دیگری به همان تناسب افزایش می‌یابد.هنگامی که درصد نرخ خالص افزایش ثابت باشد، رشد متغیر حالت بصورت نمایی بوده و درنتیجه مدت زمان دو برابر شدن سیستم همواره در طول زمان ثابت است.

بدین ترتیب با استفاده از یک محاسبه ساده می‌توان زمان دو برابر شدن متغیر حالت را محاسبه نمود.

$$S = S(0)\exp(gt_1)$$

$$2S = S(0)\exp(gt_2)$$

$$t_d = \ln(2)/g$$

$$\ln(2) \cong 0.7$$

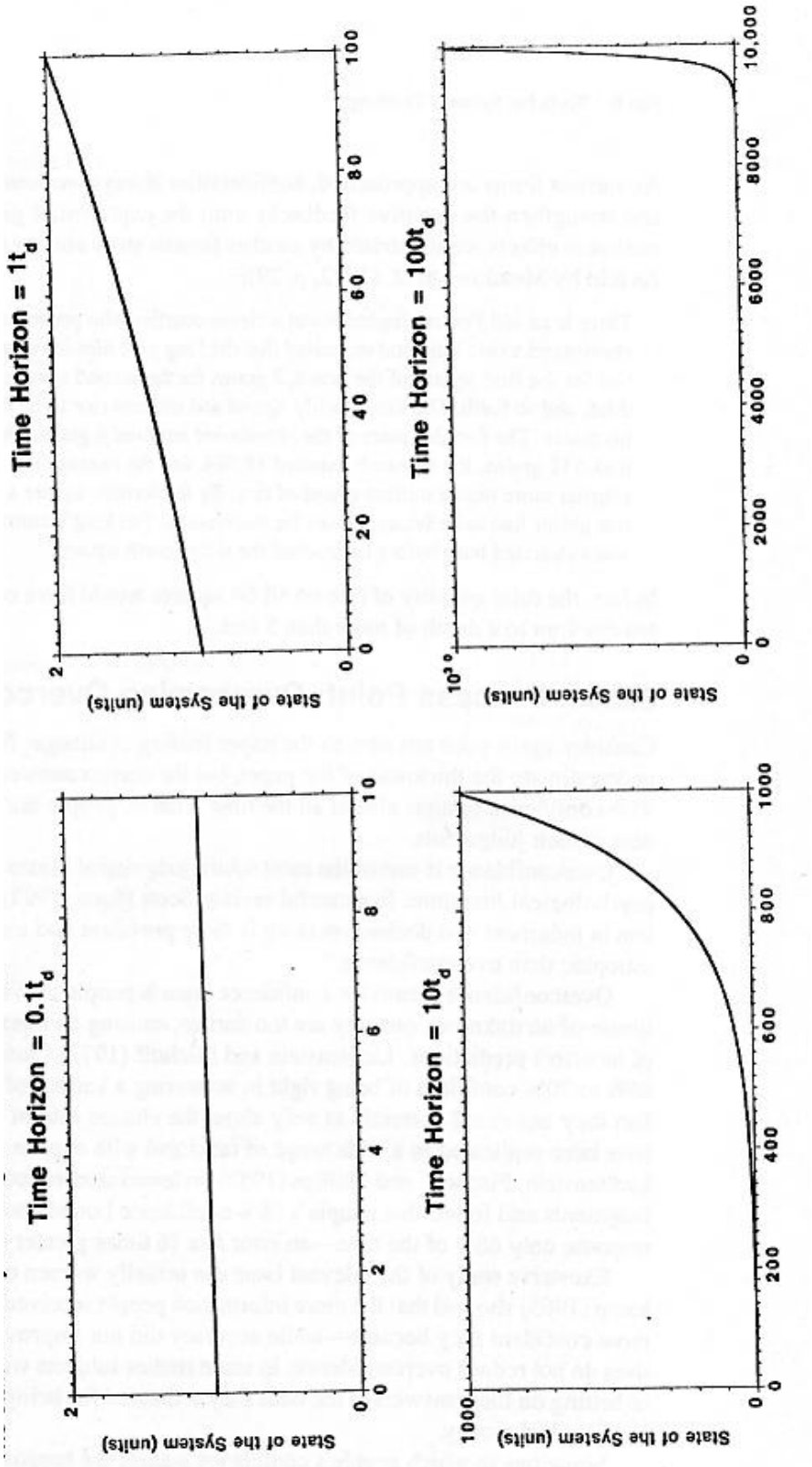
$$t = 70/(100g)$$

۸-۲-۴- عدم درک صحیح از رشد نمایی

با اینکه قانون ۷۰ بسیار ساده است ولی درک رشد نمایی برای افراد معمولاً مشکل است. مطالعات انجام شده برای بررسی توانایی افراد در زمینه پیش‌بینی رشد متغیرهای نمایی نشان می‌دهد که اغلب پیش‌بینی‌ها کمتر از مقدار واقعی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه اغلب افراد پدیده‌ها را بصورت خطی تصور می‌کنند لذا درصورتی که درصد نرخ رشد یک تابع نمایی کم باشد و یا اینکه افق زمان پیش‌بینی کوتاه باشد رابطه خطی تقریب خوبی برای توزیع نمایی

است ولی درصورتی که درصد نرخ رشد و یا افق زمانی افزایش می‌یابد رابطه خطی خیلی کمتر از رابطه نمایی تقریب می‌زند. به عنوان مثال به نظر شما درصورتی که یک برگه کاغذ ۴۲ بار تا زده شود ضخامت چقدر خواهد بود؟ اغلب در جواب این سئوال حداکثر چند متر را تخمین می‌زنند. درصورتی که ضخامت آن بیش از فاصله زمین از ماه خواهد بود.

برای درک بهتر رفتار رشد نمایی و بررسی میزان خطای پیش‌بینی افراد در افق‌های زمانی مختلف به شکل (۸-۵) توجه کنید. نمودارهای این شکل نشان دهنده رفتار یک متغیر با تابع نمایی و درصد نرخ رشد ۷ می‌باشند که مدت زمان دوبرابر شدن آن ۱۰۰ سال است. در شکل افق زمانی ۱۰ سال درنظر گرفته شده است. با توجه به شکل فوق به نظر می‌رسد رفتار متغیر بصورت خطی با شیب بسیار کم باشد. در شکل دو افق زمانی برابر مدت زمان دوبرابر شدن متغیر حالت می‌باشد. در این شکل نیز خیلی نمی‌توان نمایی بودن رفتار را احساس نمود. در شکل سوم افق زمانی ۱۰ برابر مدت زمان دوبرابر شدن متغیر حالت می‌باشد. در این شکل به خوبی می‌توان نمایی بودن رفتار را مشاهده نمود. در شکل چهارم افق زمانی ۱۰۰ برابر مدت زمان دوبرابر شدن متغیر حالت می‌باشد. در این شکل نیز بدلیل بسیار طولانی بودن افق زمانی رفتار نمایی ملموس نیست. بنابراین برای درک رفتار مناسب باید افق زمانی صحیحی انتخاب کرد.



شکل(۸–۵): رشد نمایی در افق‌های زمانی متفاوت

۸-۲-۵- نقطه نظر: غلبه اطمینان بیش از حد

با ملاحظه دوباره جواب‌های داده شده به میزان ضخامت کاغذ تا شده نشان می‌دهد که جواب افراد معمولاً در ۹۵ درصد اوقات خارج از بازه اطمینان می‌باشد. بنابراین افراد بطور قابل ملاحظه‌ای در داوری‌های خود بیش از حد مطمئن هستند.

در مستندات علوم روان‌شناسی نیز به اطمینان بیش از حد به عنوان یکی از خطاهای جدی در داوری‌ها اشاره شده است. بطوری که اسکات پلوس[۱] می‌نویسد: هیچ مشکلی در تصمیم گیری و قضاوت به اندازه اطمینان بیش از حد شایع نیست.

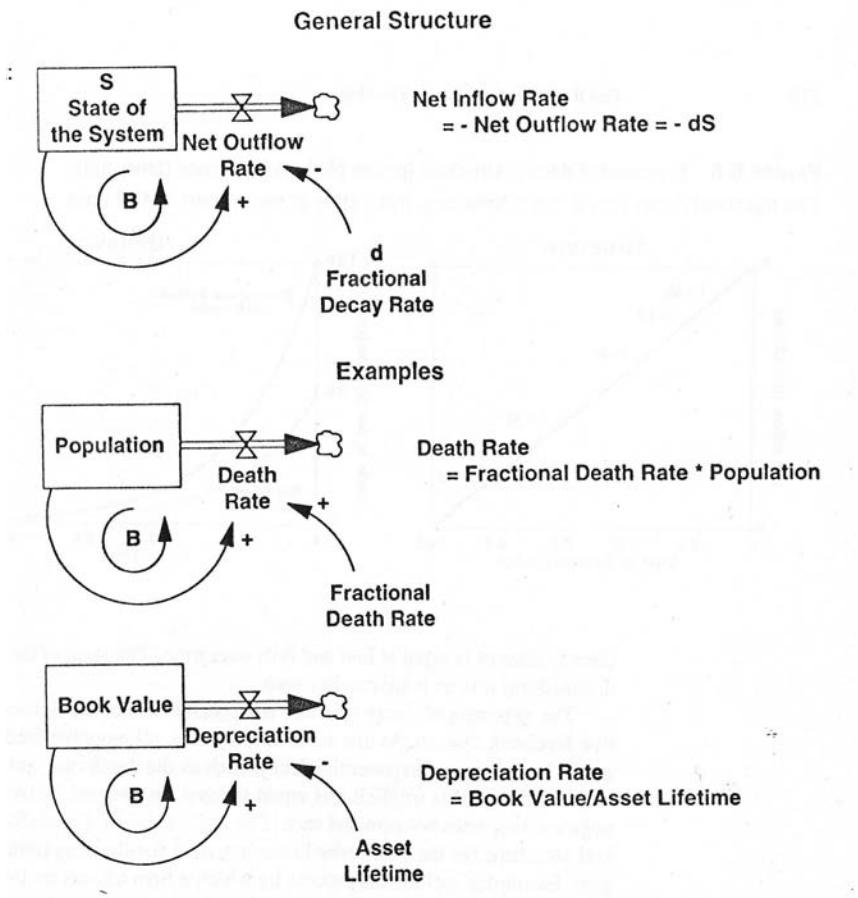
۸-۳- بازخورد منفی و رفتار تنزل نمایی

بازخورد مثبت خطی درجه یک رفتار نمایی ایجاد می‌کند، درصورتی که سیستم‌های بازخورد منفی خطی درجه یک رفتار هدفجو ایجاد می‌کنند. زمانی که سیستم خطی است رفتار تنزل نمایی خالص است.

در شکل (۸-۶) ساختار بازخوردی تنزل نمائی نشان داده شده است. به عنوان مثال به جمعیت و دارائی می‌توان اشاره کرد که تحت تأثیر مرگ و میر و استهلاک دارائی می‌باشند. در هر یک از مثال‌های فوق میزان مرگ و میر و استهلاک دارائی متناسب با جمعیت و دارائی بوده ولی مقدار خالص آن منفی است.

$$Net\ \ Inflow = -Net\ \ Outflow = -ds$$

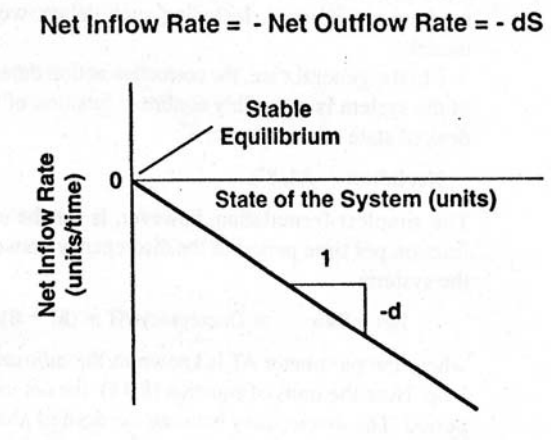
[۱] -Scott Plous



شکل(۸-۶): بازخورد منفی خطی درجه یک: ساختار و مثال‌ها

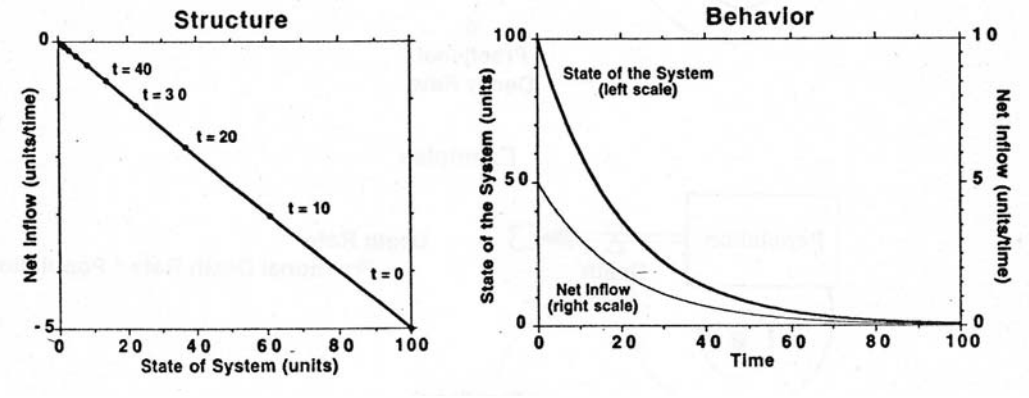
در معادله فوق d درصد نرخ مرگ و میر یا استهلاک دارائی است که دارای واحد ۱/Time می‌باشد. که بیان کننده مدت عمر افراد و یا دارائی می‌باشد. معادله بالا دقیقاً مثل معادله رشد نمایی است با این تفاوت که در معادله رشد نمایی باید بجای d از d– استفاده کرد. بنابراین رفتار نرخ خالص افزایش بصورت شکل (۸-۷) و تابع متغیر حالت بصورت ذیل خواهد بود.

$$S(t) = S(0)\exp(-d)$$



شکل(۸–۷): نمودار تغییرات نرخ افزایشی خالص در مدل تنزل نمائی

طبق شکل (۸–۷) نرخ خالص افزایش، منفی می‌باشد. در نقطه شروع که نرخ خالص افزایش صفر است، سیستم در تعادل کامل قرار دارد. برخلاف رفتار رشد نمائی تعادل فوق پایدار است. تعادل فوق همانند گویی است که در کف یک نیم‌کره قرار دارد. با تغییر موقعیت گوی مجدداً به تعادل اولیه باز خواهد گشت. درصورتی که در رفتار رشد نمائی تعادل ناپایدار است و تعادل فوق همانند گویی است که در بالای یک کره قرار گرفته است که با کمترین جابه‌جایی به سمت پایین حرکت خواهد نمود. شکل (۸–۸) دینامیک سیستم را در گذر زمان و همچنین رابطه بین نرخ خالص افزایش و متغیر حالت بیان می‌کند.



شکل(۸–۸): تنزل نمائی: ساختار و رفتار

تنزل نمائی حالت خاصی از سیستم بازخورد منفی خطی درجه یک است. در این سیستم هدف بصورت ضمنی مشخص است و سیستم به سمت صفر شدن پیش می‌رود. به عنوان مثال جمعیت به قدری کاهش می‌یابد که به صفر برسد ولی در حالت کلی سیستم می‌تواند دارای هدفی باشد که در گذر زمان به سمت آن در حرکت می‌باشد و با رسید

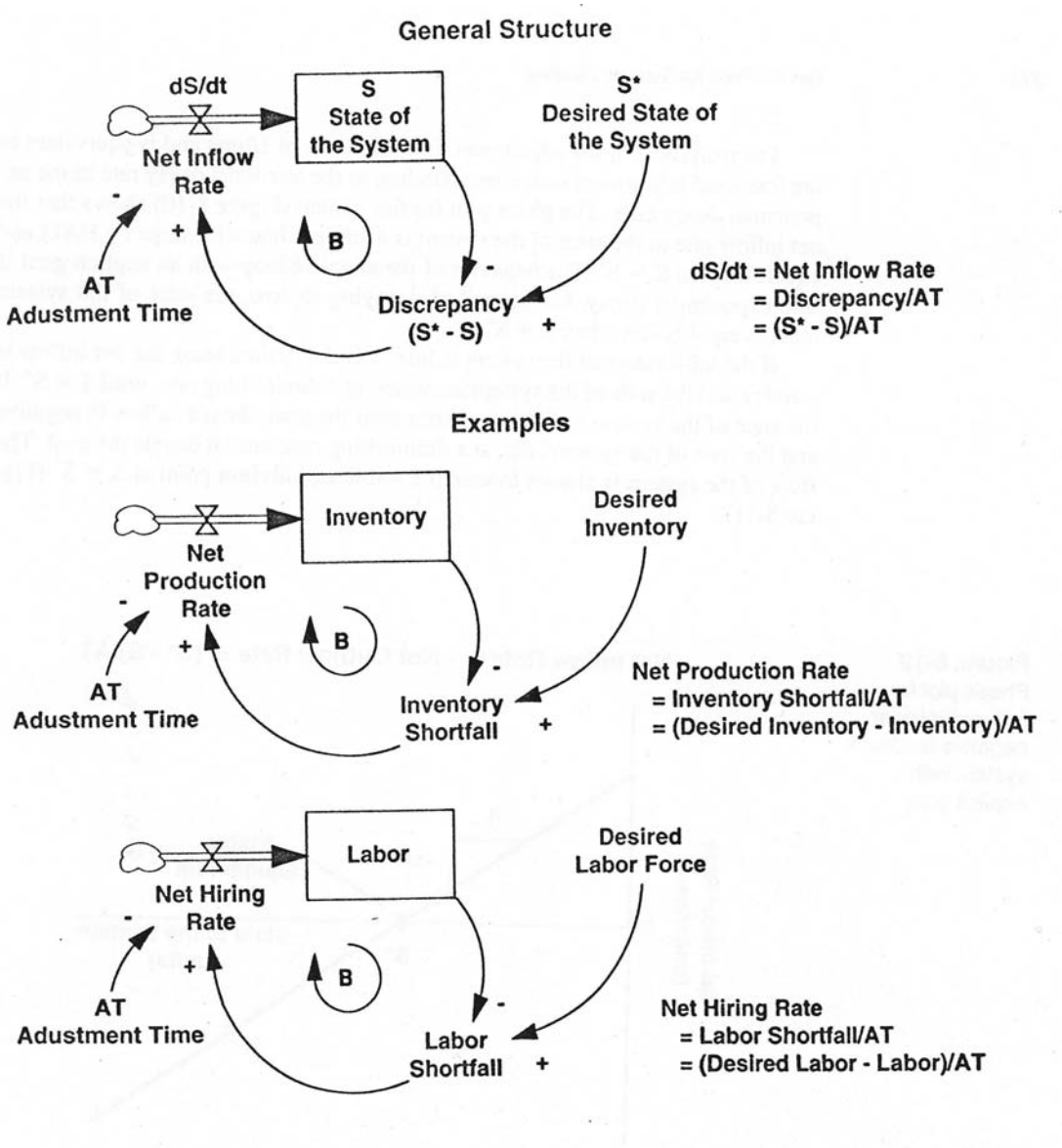
سیستم به هدف است که به تعادل خواهد رسید. به عنوان مثال یک شرکت می‌خواهد به سطح مطلوب موجودی و نیروی کار برسد. بنابراین در حالت کلی نرخ خالص افزایش که عمل تصحیح وضعیت سیستم را برای رساندن به وضعیت مطلوب انجام می‌دهد تابعی است از مقدار مطلوب (هدف) و وضعیت فعلی سیستم (مقدار متغیر حالت):

$$Net\ \ Inflow = f(s, s^*)$$

ساده‌ترین حالت ممکن این است که نرخ خالص افزایش ضریبی ثابت از اختلاف بین مقدار مطلوب و مقدار واقعی باشد. ضریب فوق نیز متناسب با مدت زمان لازم برای رسیدن به وضعیت مطلوب است. بنابراین با افزایش زمان، با نرخ کمتری تغییرات صورت گرفته و با کاهش زمان نرخ تغییرات بیشتر خواهد بود.

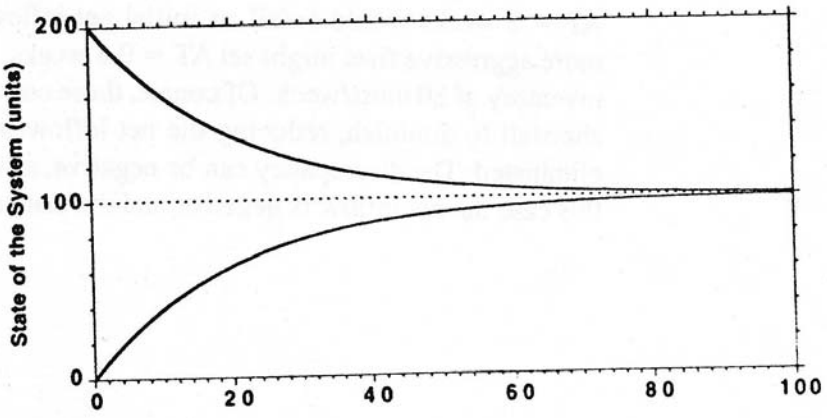
$$Net\ \ Inflow = (s^* - s) / AT$$

در معادله فوق AT زمان تعدیل (Adjustment Time) می‌باشد. بنابراین درصورتی که واحد متغیر حالت Unit باشد واحد متغیر جریان Unit/Time خواهد بود.



شکل(۸-۹): سیستم بازخورد منفی خطی درجه یک با اهداف مشخص

اگر مقدار اولیه متغیر حالت کمتر از مقدار مطلوب باشد نرخ افزایش خالص مثبت بوده بدین ترتیب مقدار متغیر حالت افزایش یافته و به مقدار مطلوب خواهد رسید. درصورتی که مقدار اولیه متغیر حالت بیشتر از مقدار مطلوب باشد نرخ افزایش خالص منفی بوده بدین ترتیب مقدار متغیر حالت کاهش یافته و به مقدار مطلوب خواهد رسید.



شکل(۸-۱۰): رفتار رشد هدفجو

۸-۳-۱- زمان تعدیل و مدت زمان نصف شدن مقدار سیستم

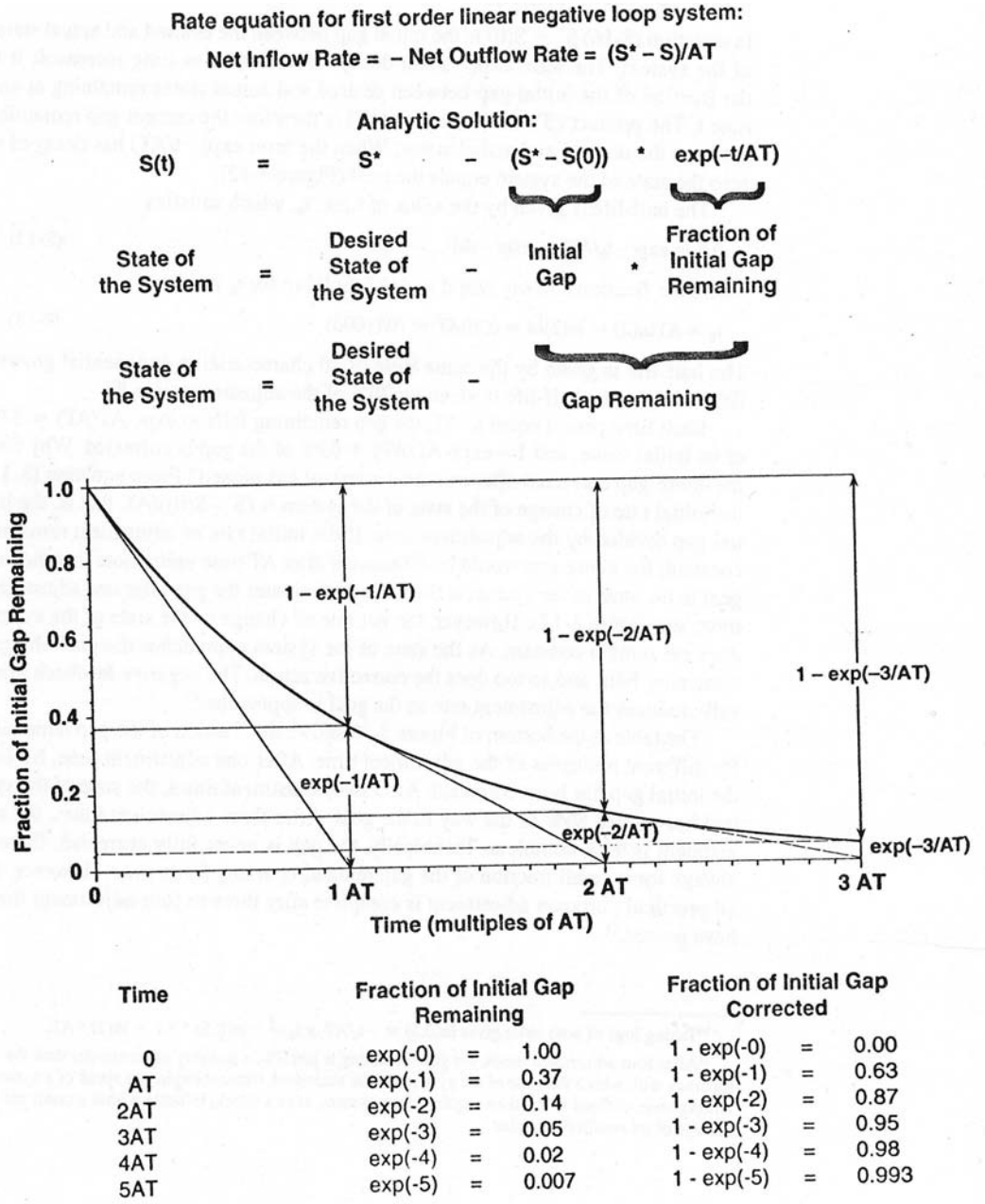
همان‌طور که رفتار رشد نمایی مدت زمان دو برابر شدن مقدار سیستم همواره ثابت بود در رفتار تنزل نمایی نیز مدت زمان نصف شدن متغیر حالت هماره ثابت است. روش محاسبه مدت زمان نصف شدن متغیر حالت مثل محاسبه مدت زمان دو برابر شدن متغیر حالت در رشد نمایی است:

$$S(t) = S^* - (S^* - S(0))\exp(-t / AT)$$

$$0.5 = \exp(_\, t_h / AT) = \exp(-dt)$$

$$t_h = AT\ln(2) = 0.7AT$$

بنابراین مدت زمان نصف شدن متغیر حالت ۷۰ درصد مدت زمان تعدیل سیستم می‌باشد که از همان قانون ۷۰ درصد تبعیت می‌کند. بنابراین با گذشت فاصله زمانی به اندازه AT ۶۳ درصد از فاصله بین مقدار فعلی و مطلوب پیموده خواهد شد. چراکه $\exp(-AT / AT) = 37\%$ است. بنابراین $1 - \exp(-AT / AT) = 63\%$ جدول موجود در انتهای شکل (۸-۱۱) نشان دهنده درصد فاصله بین مقدار مطلوب و مقدار فعلی متغیر حالت را به ازای درصدهای مختلفی از زمان تعدیل نشان می‌دهد. بدین ترتیب بعد از یک دوره از زمان تعدیل ۶۳ درصد از فاصله اولیه بین متغیر حالت و مقدار مطلوب کاسته خواهد شد. بعد از دو دوره از زمان تعدیل این درصد به ۸۶ خواهد رسید. همچنین بعد از سه دوره ۹۵ درصد از فاصله فوق طی خواهد شد.



Time	Fraction of Initial Gap Remaining			Fraction of Initial Gap Corrected		
0	exp(-0)	=	1.00	1 - exp(-0)	=	0.00
AT	exp(-1)	=	0.37	1 - exp(-1)	=	0.63
2AT	exp(-2)	=	0.14	1 - exp(-2)	=	0.87
3AT	exp(-3)	=	0.05	1 - exp(-3)	=	0.95
4AT	exp(-4)	=	0.02	1 - exp(-4)	=	0.98
5AT	exp(-5)	=	0.007	1 - exp(-5)	=	0.993

شکل(۸–۱۱): رابطه بین زمان تعدیل و فاصله طی شده در جهت رسیدن به هدف

۸–۴– سیستم‌های چند حلقه‌ای

در مباحث قبل در رابطه با یک حلقه مثبت یا منفی به تنهایی بحث شد. در صورتی که یک سیستم درجه یک تحت تأثیر دو حلقه قرار گیرد، چه رفتاری خواهد داشت؟ به عنوان مثال در مسئله جمعیت با شکستن نرخ خالص رشد به نرخ زاد و ولد و نرخ مرگ و میر یک سیستم درجه یک با دو حلقه مثبت و منفی خواهیم داشت:

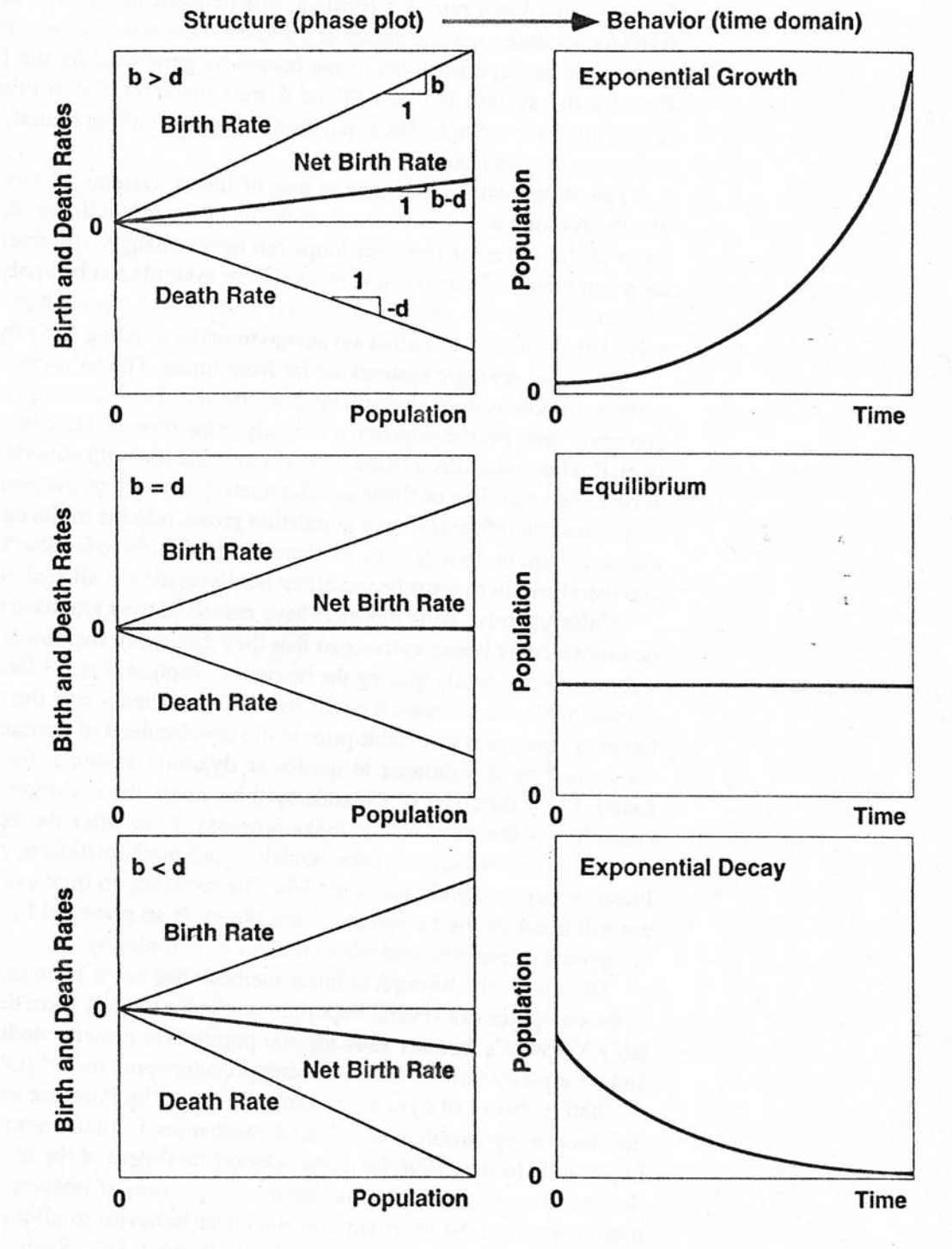
Population= Integral(Net Birth Rate, Population(۰))

Net Birth Rate=BR-DR

درصورتی که درصد نرخ زاد و ولد و مرگ و میر ثابت و برابر b و d باشند :

Net Birth Rate=bP-dP=(b-d)P

در اینصورت سه حالت ممکن است رخ دهد: اگر b بزرگتر از d باشد رفتار متغیر رشد نمایی ، درصورتی که b کوچکتر از d باشد رفتار متغیر تنزلی نمایی و اگر b=d باشد نرخ خالص رشد صفر بوده و سیستم در حال تعادل خواهد بود.



شکل(۸-۱۲): یک سیستم درجه یک خطی یکی از سه حالت نمایی، تنزل نمایی یا تعادل را خواهد داشت

با توجه به اینکه سیستم بصورت خطی است لذا همواره حلقه غالب در ساختار فوق ثابت خواهد بود و یکی از سه حالت تعریف شده رخ می‌دهد. سیستم‌های خطی دارای خاصیت ترکیب هستند بدین معنا که درصورتی که اجزای

سیستم جدا شده و بصورت مجزا اجرا شده سپس با یکدیگر جمع جبری شوند نتیجه با اجرای همزمان حلقه‌ها یکسان است. ویژگی فوق در تحلیل و درک ساده سیستم‌های خطی بسیار راهگشا و مؤثر است.

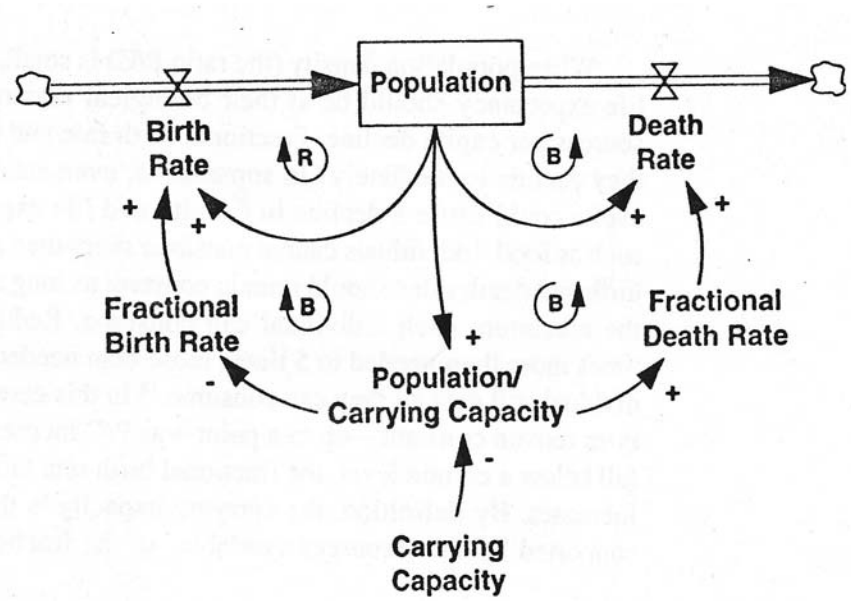
سیستم‌های واقعی بسیار متفاوت از سیستم‌های خطی می‌باشند. مثال جمعیت خود گواه این ادعا است. زیرا در عالم واقعیت جمعیت یک ناحیه در ابتدا رشد نموده ولی پس از مدتی یا به تعادل می‌رسد و یا اینکه بصورت نوسانی رفتار می‌کند. بنابراین میزان تأثیر حلقه‌های مثبت و منفی در طول زمان متفاوت خواهد بود به عنوان مثال در ابتدا حلقه مثبت حلقه غالب خواهد بود ولی با رشد جمعیت و کمبود منابع حلقه منفی بصورت غالب عمل خواهد نمود. بنابراین در سیستم‌های واقعی اغلب روابط بصورت غیرخطی هستند.

۸-۵- سیستم‌های درجه یک غیرخطی: رشد S شکل

اغلب سیستم‌های واقعی در ابتدا دارای رشد نمایی می‌باشند ولی پس از مدتی با محدودیت منابع روبرو می‌شوند. به عنوان مثال در رابطه با جمعیت آهوها محدودیت غذا و یا در رابطه با یک محصول جدید محدودیت بازار بالقوه منجر به تغییر روند رشد نمایی می‌شود. بنابراین در اینگونه سیستم‌ها ابتدا حلقه مثبت حلقه غالب است ولی به مرور زمان حلقه منفی بصورت حلقه غالب عمل خواهد کرد. بدین ترتیب در این سیستم یک گذار نرم از رشد نمایی به حالت تعادل ایجاد می‌شود که اینگونه رشد را رشد S شکل می‌نامیم.

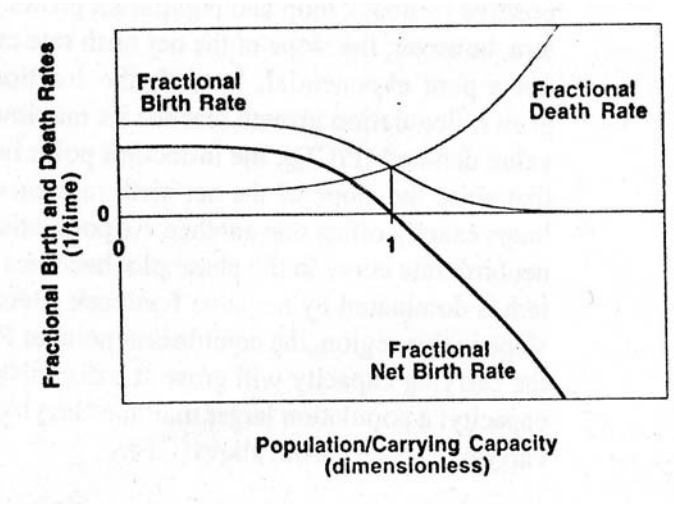
در سیستم واقعی درصد نرخ زاد و ولد و مرگ و میر ثابت نبوده و تابعی از محدودیت سیستم می‌باشد. در مدل جمعیت، درصد نرخ زاد و ولد و مرگ و میر تابعی از چگالی یا تراکم جمعیت می‌باشد. بدین ترتیب در ابتدا فرض کنید که جمعیت نرمال برای امکانات موجود(C) ثابت است.

$$\text{Net Birth Rate}=BR-DR=b(P/C)P-d(P/C)P$$



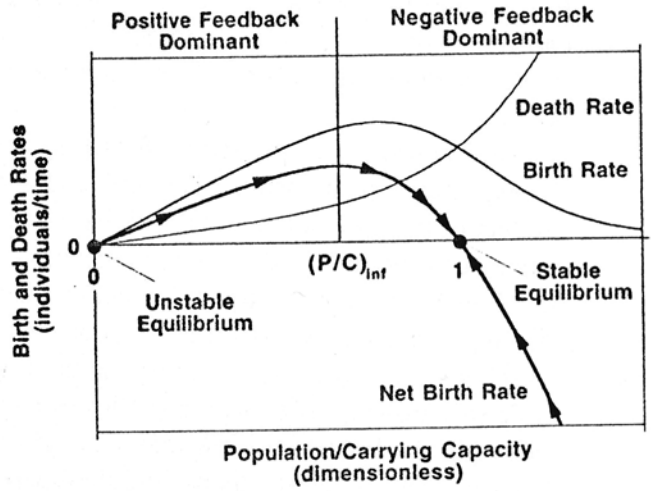
شکل(۸-۱۳): مدل رشد جمعیت با فرض ثابت بودن ظرفیت

هنگامی که تراکم جمعیت بسیار کوچک باشد درصد نرخ زاد و ولد و امید به زندگی در بیشترین مقدار خود از نظر بیولوژیکی قرار خواهد داشت. با افزایش جمعیت سرانه غذا کاهش یافته بدین ترتیب درصد نرخ زاد و ولد و امید به زندگی نیز کاهش خواهد یافت. البته قابل توجه است که درصورتی که غذای موجود از ده برابر مقدار مورد نیاز به پنج برابر مورد نیاز کاهش یابد تغییری در درصد نرخ خالص زاد و ولد و یا امید به زندگی نخواهد داشت ولی اگر مقدار فوق به یک نزدیک شود اثرات آن ملموس‌تر خواهد بود. بدین ترتیب هنگامی که $P=C$ باشد به عبارت دیگر جمعیت مساوی با جمعیت نرمال برای منابع موجود باشد نرخ زاد و ولد و مرگ و میر با یکدیگر برابر بوده و کل مدل نیز در تعادل خواهد بود. اگر P بسیار کمتر از C باشد درصد نرخ زاد و ولد و امید به زندگی در بهترین حالت خود خواهد بود و به عبارت دیگر حلقه مثبت حلقه غالب مدل می‌باشد. در حالتی که P بسیار بیشتر از C باشد محدودیت منابع بر سیستم اعمال خواهد شد لذا درصد نرخ زاد و ولد و امید به زندگی کاهش یافته و حلقه منفی حلقه غالب در مدل خواهد بود.



شکل(۸-۱۴): رابطه غیرخطی بین تراکم جمعیت و درصد نرخ رشد

بنابراین طبق شکل (۸-۱۴) با افزایش تراکم جمعیت نرخ زاد و ولد افزایش یافته تا اینکه در یک نقطه نرخ زاد و ولد به حداکثر رسیده و سپس کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود ولی نرخ مرگ و میر با افزایش تراکم جمعیت افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب نرخ خالص زاد و ولد افزایش یافته در یک نقطه به حداکثر خود رسیده سپس کاهش می‌یابد.

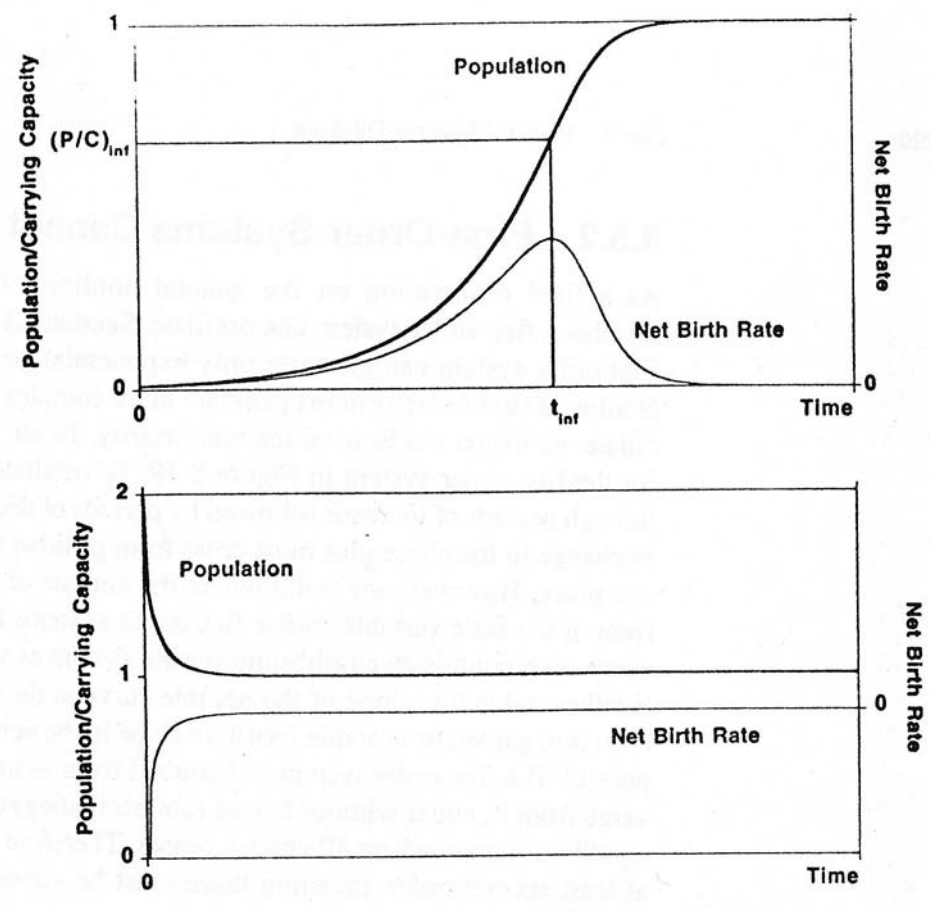


شکل(۸-۱۵): سیستم جمعیت غیرخطی

بدین ترتیب درصورتی که سیستم دارای مقدار اولیه کمتر از جمعیت نرمال باشد به عبارت دیگر در شروع تراکم جمعیت کوچکتر از یک باشد، حلقه مثبت فعال شده و تعداد جمعیت بصورت نمایی افزایش می‌یابد سپس با افزایش

جمعیت تراکم جمعیت افزایش یافته و به تبع آن حلقه منفی فعال می‌شود. لذا در ادامه سیستم بصورت هدفجو عمل نموده و به تعادل خواهد رسید.

درصورتی که در شروع تراکم جمعیت بیش از یک باشد حلقه منفی فعال شده و لذا سیستم بصورت هدفجو عمل نموده و به مقدار هدف نزدیک خواهد شد.



شکل(۸-۱۶): رشد جمعیت در سیستم غیرخطی

۸-۵-۱- تعریف رسمی حلقه غالب

هنگامی که نرخ خالص تغییر در متغیر حالت و متغیر حالت در یک جهت باشند حلقه غالب حلقه مثبت می‌باشد و اگر نرخ خالص تغییر و متغیر حالت در جهت عکس هم عمل کنند(به عبارت دیگر متغیر نرخ خالص کاهش یابد ولی متغیر حالت افزایش یابد) حلقه غالب حلقه منفی خواهد بود. مفهوم فوق بصورت ریاضی عبارت است از:

حلقه غالب بازخورد مثبت $\partial \dot{S} / \partial S > 0$

$\partial \dot{S} / \partial S = 0$ حلقه غالب وجود ندارد و سیستم در تعادل است

$\partial \dot{S} / \partial S < 0$ حلقه غالب بازخورد منفی

$\dot{S} = dS/dt$

تعیین حلقه غالب در سیستم‌های با درجات بالاتر از یک مشکل است زیرا در اینگونه سیستم‌ها بدلیل وجود تأخیر زمانی ممکن است یک حلقه در کوتاه مدت دارای تأثیری ضعیف باشد ولی در بلند مدت دارای تأثیر قوی بر سیستم باشد.

۸-۵-۲- سیستم‌های درجه یک نمی‌توانند رفتار نوسانی داشته باشند

در بخش‌های قبل مشاهده نمودید که سیستم‌های درجه یک خطی فقط دارای رفتارهای نمایی، تنزل نمایی و یا در حال تعادل می‌باشند. اما سیستم‌های غیرخطی درجه یک دارای رفتارهای پیچیده‌تری نسبت به خطی بودند ولی هیچ کدام از سیستم‌های درجه یک فوق نمی‌توانند رفتار نوسانی داشته باشند. با توجه به شکل ۸-۱۵ اگر متغیر حالت بخواهد رفتار نوسانی داشته باشد باید بصورت دوره‌ای کم و زیاد شود. بدین ترتیب متغیر خالص تغییرات باید حداقل یکبار تغییر علامت بدهد. درصورتی که با توجه به شکل فوق اگر متغیر خالص تغییرات مقدار صفر داشته باشد سیستم به تعادل خواهد رسید و اگر مقداری غیر از صفر داشته باشد نیز با حرکت به سمت تعادل به صفر خواهد رسید و دیگر تغییر علامتی نخواهد داشت. بنابراین برای داشتن رفتار نوسانی باید سیستم حداقل درجه دو باشد. بدین ترتیب سیستم باید حداقل دارای دو متغیر حالت باشد.

۹- فصل نهم: رشد S شکل : بیماری‌های همه‌گیر، اشاعه نوآوری و رشد و توسعه محصولات جدید

همانگونه که در فصل هشتم مشاهده گردید بازخورد مثبت رشد نمایی ایجاد می‌نماید. ولی هیچ رشد نمایی در عالم واقعیت نمی‌تواند تا بی‌نهایت ادامه یابد. هر سیستمی که بصورت اولیه با یک بازخورد غالب مثبت آغاز می‌شود در نهایت به دلیل محدودیت ظرفیت محیط متوقف می‌شود. بعنوان محدودیتی برای رشد تغییر حالتی غیر خطی از چیرگی بازخورد مثبت به بازخورد منفی صورت می‌گیرد که تحت شرایط قطعی نتایج حاصل رشد S شکل می‌باشد. در این بخش در مورد نحوه مدل سازی رفتار S شکل بحث می‌شود و به کاربردهایی از اشاعه و گسترش نوآوری، بیماری‌های عفونی و واگیردار، گسترش ویروس‌های کامپیوتری و گسترش و توسعه بازار برای محصولات جدید و غیره اشاره می-شود.

۹-۱- مدل سازی رشد S شکل

مدل غیر خطی جمعیت اشاره شده در فصل هفت این کتاب کاملاً حالت کلی دارد. بر اساس این مدل تعداد جمعیت هر مقداری می‌تواند باشد و تا هر اندازه‌ای قابل افزایش است و همچنین تعداد افرادی که پذیرای نوآوری بوده و یا تعداد افرادی که به بیمارهای عفونی نیز داری شرایط و ویژگی‌های یکسانی هستند. در مدل جمعیت در صورتی که جمعیت به وسیله بازخورد مثبت ایجاد شود و باز خورد منفی از ابتدا فعال باشد و یا از محدودیتی که برای آن در نظر کرفته شده هموار کوچکتر باشد، با در نظر گرفتن اینکه تأخیر زمانی در اعمال محدودیت وجود داشته باشد، رفتار رشد نمایی تبدیل به رفتار رشد S شکل خواهد شد و در صورتی که تأخیر و یا وقفه‌ای در اعمال محدودیت وجود داشته باشد

رفتار تبدیل به رشد بیش از حد (Overshoot) و یا رفتار نوسانی (Ocillation) خواهد بود. بر عکس زمانی که سیستمی با رفتار S شکل مشاهده می‌شود مشخص است که سیستم با یک بازخورد منفی غالب شروع به فعالیت کرده و در گذر زمان تغییر وضعیتی غیر خطی به باز خورد منفی غالب داده است.

۹-۱-۱- رشد منطقی

همانگونه که در مثال مربوط به رشد جمعیت در فصل ۸ بیان گردید زمانی جمعیت P برابر با ظرفیت C محدود کننده آن باشد، نرخ رشد آن باید از مقدار اولیه کاهش یافته و برابر صفر شود و زمانی که P> C باید مقدار نرخ رشد منفی باشد. بنابر این نرخ خالص تولد باید دارای نموداری به شکل یک کاسه بر عکس باشد بدین صورت که وقتی جمعیت صفر باشد نرخ رشد نیز صفر باشد با رشد جمعیت افزایش یافته و تا ظرفیت محدود کننده جمعیت به حد اکثر برسد در ظرفیت سیستم صفر شده و پس از آن منفی شود.

در مدل رشد منطقی فرض بر این است که رشد نرخ خاص جمعیت یک تابع خطی از جمعیت است که بصورت زیر بیان می‌شود:

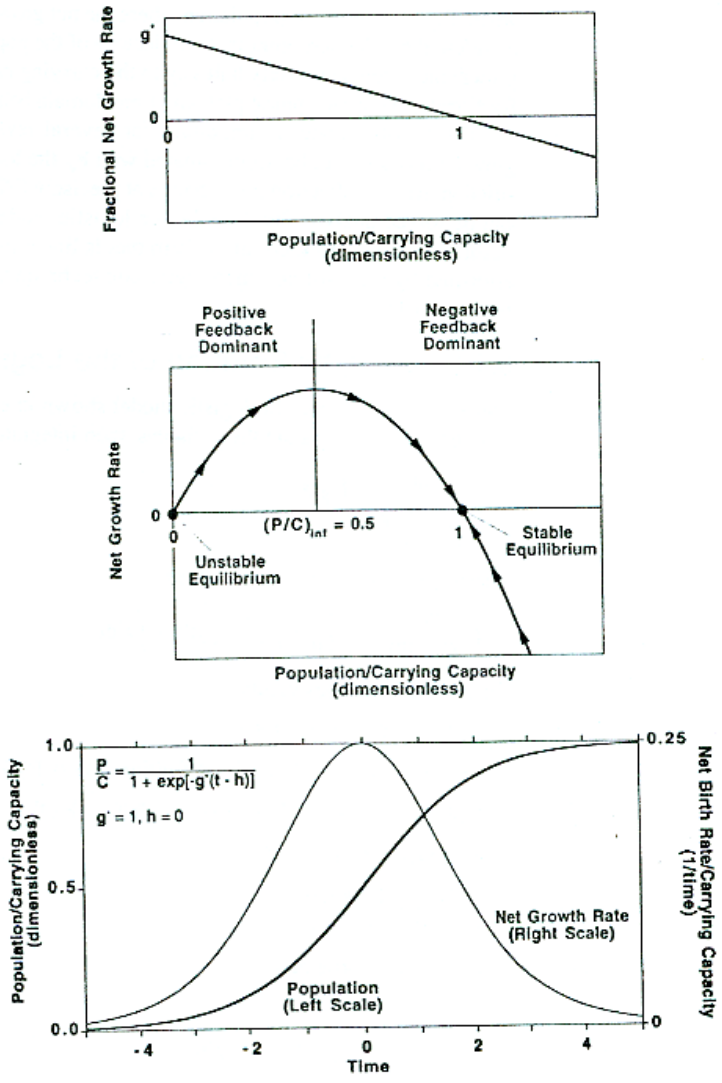
$$\text{Net Birth Rate} = g(P,C)P = g^*(1-P/C)P \qquad (۹-۱)$$

با این فرض که g(P,C) نرخ رشد بوده و تابعی از جمعیت و ظرفیت سیستم است و g^* حداکثر نرخ رشد در زمانی است که جمعیت بسیار کم است. مدل رشد منطقی بر آنچه که قبلا بعنوان الزام رشد S شکل گفته شد منطبق است بدین صورت که اگر $P < C$ باشد نرخ خالص رشد مثبت است، P=C در اینصورت نرخ خالص رشد صفر بوده و اگر $P > C$ در اینصورت نرخ خالص رشد منفی خواهد بود. مدل رشد منطقی علاوه بر آنچه گفته شد دارای ویژگی‌های دیگری نیز می‌باشد. تغییر ترکیب معادله (۹-۱) معادله زیر را می‌دهد:

$$\text{Net Birth Rate} = g^*(1-P/C)P = g^*P - g^*P^2/C$$

عبارت اول یعنی g^*P فرایند بازخورد مثبت که ابتدا فعال می‌شود را نشان می‌دهد و عبارت دوم یعنی $-g^*P^2/C$ غیر خطی بوده و بازخورد منفی قوی‌تر نسبت به بازخورد مثبت را نشان می‌دهد که بر محدودیت ناشی از ظرفیت ایجاد شده است.

سؤال دیگری مطرح می‌شود، کی خالص نرخ رشد به حداکثر خود خواهد رسید؟ در مدل رشد منطقی نرخ خالص زاد ولد که توسط معادله شماره (۲-۹) نشان داده شده است بصورت یک سهمی وارونه است که که در نقطه P=۰ و P=C برابر صفر بوده چون سهمی حالت متقارن دارد لذا ماکزیمم آن زمانی اتفاق خواهد افتاد که $P_{\inf} = C/2$ نمودار ۹-۱ نشان دهنده این واقعیات می‌باشند



شکل(۹-۱): مدل رشد منطقی

۹-۱-۲- راه حل‌های آنالتیک (جبری) برای معادلات رشد منطقی

اگر چه مدل نشان داده شده در معادله ۹-۱ غیر خطی است ولی بصورت آنالتیک قابل حل است.

$$\int \frac{dp}{(1-\frac{P}{C})P} = \int g^* dt \qquad (۹-۴)$$

با تغییر ترکیب سمت چپ مسئله خواهیم داشت:

$$\int \frac{Cdp}{(C-P)P} = \int \left[\frac{1}{P} + \frac{1}{(C-P)}\right] dP = \int g^* dt \qquad (۹-۵)$$

با انتگرال گیری از طرفین خواهیم داشت:

$$\ln(P) - \ln(C-P) = g^* t + c \qquad (۹-۶)$$

وقتی مقدار c ثابت باشد داریم

$$\ln(P) - \ln(C-P) = g^* t + \ln(P(0)) - \ln[C-P(0)] \qquad (۹-۷)$$

در صورتیکه از طرفین لگاریتم نپرین گرفته شود عبارت زیر نتیجه خواهد شد

$$\frac{P}{(C-P)} = \frac{P(0)\exp(g^* t)}{C-P(0)} \qquad (۹-۸)$$

در صورت تغییر ترکیب معادله فوق خواهیم داشت:

$$P(t) = \frac{C}{1-[\frac{C}{P(0)}-1]\exp(-g^* t)} \qquad (۹-۹)$$

ویا به عبارتی خواهیم داشت

$$P(t) = \frac{C}{1-\exp[-g^*(t-h)]}$$

مقدار h زمانی است که در طی آن مقدار جمعیت به نصف ظرفیت خود می‌رسد با فرض اینکه $P(h)=۰,۵C$ در این شرایط اگر مقدار h از معادله ۹-۱۰ محاسبه شودخواهیم داشت:

$$h = \ln[(c/p(0))-1]/g^*$$

معادلات ۹-۹ و ۹-۱۰ دو راه حل‌های آنالتیک برای معادلات رشد منطقی تحت رابطه ۹-۱ است.

فصل ۱۰: تأخیرها

تأخیرها یکی از عوامل اصلی پویایی در سیستم‌ها می‌باشند. برخی از تأخیرها بعلت ایجاد نوسان و بی‌ثباتی نامناسب و خطرناک می‌باشند و برخی از تأخیرها برای مدیران بسیار سودمند و مفید هستند زیرا باعث تشخیص سیگنال واقعی را از نویز می‌شوند. در این بخش به ساختار و رفتار تأخیر اشاره شده و مدل‌های مختلفی از تأخیر ساخته شده سپس عکس‌العمل آنها نسبت به ورودی‌های مختلف بررسی و تحلیل خواهد شد. در انتها برای بیان مفاهیم تأخیر در بخش‌های مختلف به چند مطالعه اشاره خواهد شد.

۱۰-۱- تأخیرها: یک مقدمه

قبل از اینکه به مفاهیم تأخیر بپردازیم به چند مثال از تأخیرها اشاره می‌کنیم. در جواب دادن به سئولات بدون صرف زمان و محاسبات پیچیده جواب دهید. زیرا محاسبات انجام شده تخمین خوبی از تأخیرها ارائه خواهد داد.

۱- یک شرکت براساس میزان تقاضا برای محصولات خود اقدام به ایجاد ظرفیت و تهیه ماشین آلات می‌کند. فرض کنید به صورت تصادفی ده درصد تغییر در تقاضا رخ دهد. دراینصورت بطور متوسط چقدر طول خواهد کشید که ظرفیت فعلی به ظرفیت جدید برسد؟

۲- فرض کنید بصورت تصادفی ده درصد به تقاضای کالاهای تولیدی توسط کارخانجات اضافه شود. بنابراین در سطح اقتصاد کلان چقدر طول خواهد کشید تا ده درصد ظرفیت جدید ایجاد شود.

۳- برای کالاهای کشاورزی نظیر خوک با فرض افزایش در قیمت چقدر طول خواهد کشید که عرضه به تناسب قیمت افزایش یابد.

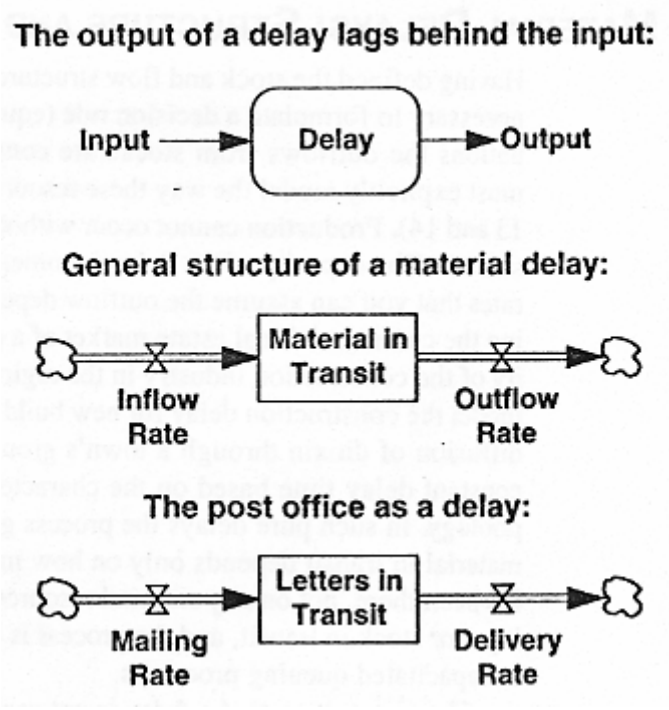
۴- درصورت تغییر در نرخ تورم چقدر طول خواهد کشید تا افزایش فوق توسط اقتصاددانان درک شود؟

۵- درصورت بروز تغییراتی در شرایط زیست محیطی نظیر آلودگی چقدر طول خواهد کشید دولتی نظیر امریکا نسبت به آن عکس‌العمل نشان دهد؟

۱۰-۱-۱- تعریف تأخیرها

تأخیرها بسیار فراگیر هستند. به عنوان مثال اندازه‌گیری و گزارش‌دهی زمان‌بر است. اتخاذ تصمیم براساس گزارشات دریافتی زمان‌بر است. تأثیرگذاری تصمیمات بر وضعیت سیستم زمان‌بر است. بنابراین مدلساز باید بداند که تأخیرها چگونه رفتار می‌کنند، چگونه باید آنها را نمایش داد و در وضعیت‌های مختلف از کدامیک از انواع تأخیرها باید استفاده کرد. همچنین چگونه مدت زمان تأخیرها را می‌توان تخمین زد.

تأخیر فرایندی است که در طی آن خروجی با یک وقفه زمانی نسبت به ورودی در اشکال مختلف بروز می‌کند (شکل ۱۰-۱). با توجه به اینکه همواره بدلیل تأخیر زمانی، اختلافی بین ورودی و خروجی وجود دارد لذا باید حداقل یک متغیر حالت وجود داشته باشد که مابه‌التفاوت بین ورودی و خروجی را در خود نگاه دارد. به عنوان مثال نرخ فرستادن نامه، نرخ ورودی و نرخ دریافت نامه، نرخ خروجی می‌باشد و مابه‌التفاوت آنها یعنی نامه‌های در حال انتقال نیز متغیر حالت می‌باشند. تأخیر فوق از نوع «تأخیر مواد» می‌باشد زیرا جریان فیزیکی مواد که همان نامه می‌باشد صورت گرفته است. در تأخیر نامه‌ها جریان نامه‌ها وارد متغیر حالت شده و پس از طی مدت زمانی از آن خارج می‌شود. تأخیر در مثال-های فوق به نوعی مانند یک محل نگهداری می‌ماند.



شکل(۱۰-۱): تأخیرها معمولاً دارای متغیرهای حالت می‌باشند

برخی از تأخیرها به نوعی تعدیل نرمی از یک برداشت و درک در رابطه با مسئله را ارائه می‌کنند. اینگونه تأخیرها «تأخیرهای اطلاعاتی» می‌باشند. به عنوان مثال تأخیر بین تغییر در نرخ سفارش محصولات کارخانه و دیدگاه ما در

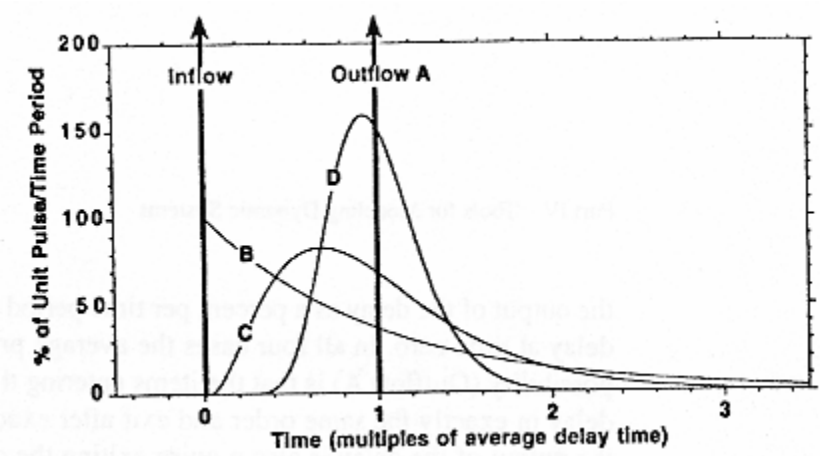
رابطه با میزان نرخ سفارش از این نوع می‌باشد. به عنوان مثال درحال حاضر نرخ سفارش ۱۰۰۰ واحد در روز می‌باشد. بنابراین شما در برنامه‌ریزی‌های خود برای آینده نیز نرخ ۱۰۰۰ واحد در روز را درنظر می‌گیرید. اگر تصادفاً روزی نرخ سفارش ۲۰۰۰ واحد در روز شود شما بلافاصله ذهنیت خود را نسبت به متوسط نرخ سفارش تغییر نمی‌دهید و برنامه-ریزی‌های خود را براساس نرخ جدید تغییر نخواهید داد. اگر نرخ فوق در روزهای بعد نیز تکرار شود شما به مرور زمان ذهنیت خود را در رابطه با نرخ سفارش تغییر خواهید داد. بنابراین تأخیری در تغییر در نرخ سفارش و تغییر ذهنیت شما از نرخ سفارش وجود دارد. در این حالت جریان فیزیکی داده وجود ندارد. در تأخیر اطلاعاتی نیز متغیر حالت وجود دارد که در مثال فوق «ذهنیت شما» نقش متغیر حالت را دارد. بدین ترتیب هرگونه اعتقاد و ذهنیت دارای یک تأخیر اطلاعاتی است زیرا ما با دریافت اطلاعات جدید بلافاصله ذهنیت و اعتقاد خود را تغییر نمی‌دهیم. تأخیرهای اطلاعاتی همانند تأخیرهای مواد نرخ ورودی را در خود حفظ و نگهداری نمی‌کنند بلکه دارای ساختاری متفاوت از تأخیرهای مواد می-باشند.

۱۰-۲- تأخیرهای مواد: ساختار و رفتار

در برخی از حالات خروجی متغیر حالت بوسیله منابع مختلف محدود می‌شود و برای مدل نمودن نوع تأخیر باید نوع تأثیر هر یک از منابع فوق مدل شود. تولید بدون وجود کارگر، مواد اولیه، سرمایه و سایر منابع امکان‌پذیر نیست. در برخی از موارد ظرفیت تأخیر به نرخ ورودی وابسته است بگونه‌ای که شما می‌توانید فرض کنید نرخ خروجی تابعی از نرخ ورودی در گذشته است. در صورتی که زمان تأخیر مستقل از نرخ ورودی و میزان متغیر حالت باشد ما دارای یک تأخیر خالص می‌باشیم که در آن فرایند تأخیر بصورت خطی می‌باشد. تأخیرهای خالص همچون فرایندهای صف با ظرفیت نامحدود می‌باشند. در اینگونه تأخیرها، مدت تأخیر از تابعی از هیچ منبع دیگری نمی‌باشد.

فرض نامحدود بودن ظرفیت همواره فرض خوبی نبوده و بسته به نرخ ورودی و سایر شرایط باید مورد بررسی قرار گیرد. به عنوان مثال در مسئله ساخت و ساز در صورتی که نرخ سفارش ساخت مسکن افزایش یابد ظرفیت ساخت مسکن در وضعیت جدید جوابگوی نرخ فوق نبوده و مدت تأخیر افزایش خواهد یافت. بنابراین در اینگونه موارد باید محدودیت سایر منابع بدقت مدل شود.

در رابطه با هر تأخیر باید به دو سئوال جواب داد. اولاً میانگین طول تأخیر چقدر است؟ در ثانی توزیع خروجی در اطراف میانگین زمان تأخیر چگونه است؟



شکل(۱۰-۲): توزیع‌های مختلف خروجی تأخیر برای یک ورودی بصورت پالس در زمان صفر

۱۰-۲-۱- میانگین مدت زمان تأخیر چقدر است؟

میانگین مدت زمان عبور متغیر نرخ از فرایند تأخیر چقدر است؟ به عبارت دیگر میانگین مدت زمان مانندن هر واحد در متغیر حالت چقدر است؟ به عنوان مثال میانگین مدت زمان لازم برای رسیدن یک نامه در داخل امریکا دو روز است و یا میانگین مدت زمان بین ارسال و دریافت یک میل چند ثانیه است. در اغلب موارد مدت زمان تأخیر بصورت تجربی و با استفاده از داده‌های موجود بدست می‌آید.

۱۰-۲-۲- توزیع خروجی در اطراف میانگین زمان تأخیر چگونه خواهد بود؟

هنگامی که یک آیتم وارد تأخیر می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا آنکه زودتر آمده زودتر نگداری شده و زودتر خارج می‌شود و یا عملیات فوق بصورت تصادفی صورت می‌گیرد؟ آیا همه آیتم‌ها مدت زمان مشابهی را در داخل تأخیر می-مانند؟

طبق شکل ۱۰-۲ حجم انبوهی از مواد بصورت یکجا و بصورت یک پالس وارد متغیر تأخیر شده است. در حالت A خروجی تقریبا بصورت یکجا و بعد از طی مدت زمان تأخیر بصورت یک پالس از متغیر تأخیر خارج می‌شود. خط مونتاژ خودرو دارای چنین وضعیتی است زیرا خط با سرعت ثابت حرکت کرده و تقریباً تمام خودروها در مدت زمان مشابهی از خط خارج می‌شوند. چنین تأخیری به تأخیر لوله‌ای معروف است. در تئوری صف به چنین سیستمی FIFO(First in,First out) گفته می‌شود.

مکانیزم خارج شدن بستگی به قواعد تصمیم‌گیری دارد. در مقابل FIFO می‌توان از LIFO(Last in, First out) و یا مکانیزم تصادفی استفاده کرد.

هنگامی که شما حجم زیادی از آیتم‌ها را با یکدیگر ادغام کرده و می‌فرستید در اینصورت خروجی شما نه FIFO و نه LIFO خواهد بود. به عنوان مثال اگر شما چندین میل را با یکدیگر بفرستید میل‌های دریافتی در اطراف میانگین زمان تأخیر توزیع خواهند شد. برخی زودتر و برخی دیرتر از میانگین زمان تأخیر خواهند رسید. زیر در این حالت برخلاف خط مونتاژ تمام میل‌ها از یک مسیر مشخص عبور نکرده و فرایندهای مختلفی روی آنها اجرا می‌شود.

هر یک از نرخ‌های خروجی A، B، C و D دارای میانگین زمان تأخیر یکسانی می‌باشند همچنین همه آنها ورودی را گرفته و مدتی در داخل متغیر حالت نگه داشته سپس خارج می‌کنند. ولی میزان پراکندگی در مدت زمان تأخیر آنها با یکدیگر متفاوت است.

بنابراین در بیان تأخیر علاوه بر میانگین مدت زمان تأخیر باید نحوه توزیع خروجی نیز مشخص شود. در عمل نحوه توزیع خروجی یا بوسیله داده‌های موجود تخمین زده می‌شود و یا اینکه با تحلیل روابط و قواعد موجود در داخل فرایند تأخیر می‌توان به آن دست یافت.

۱۰-۲-۳- تأخیر لوله‌ای

در تأخیر لوله‌ای همانند خط مونتاژ اتومبیل مدت زمان تأخیر برای تمامی آیتم‌ها ثابت بوده و هر آیتم به همان ترتیب که وارد می‌شود با همان ترتیب نیز خارج خواهد شد. در تأخیر فوق نرخ ورودی را بعنوان یک متغیر برون‌زا درنظر گرفته‌ایم که می‌تواند حالت‌های مختلف پالس، پله‌ای، خط شیب دار و نوسانی باشد. در صورتی که ورودی بصورت پالس باشد خروجی بصورت A خواهد بود. همچنین در تأخیر لوله‌ای روابط ذیل صادق است:

Material in Transit= INTEGRAL(Inflow(t)-Outflow(t), Material in Transit(۰))

Outflow(t)= Inflow(t-D)

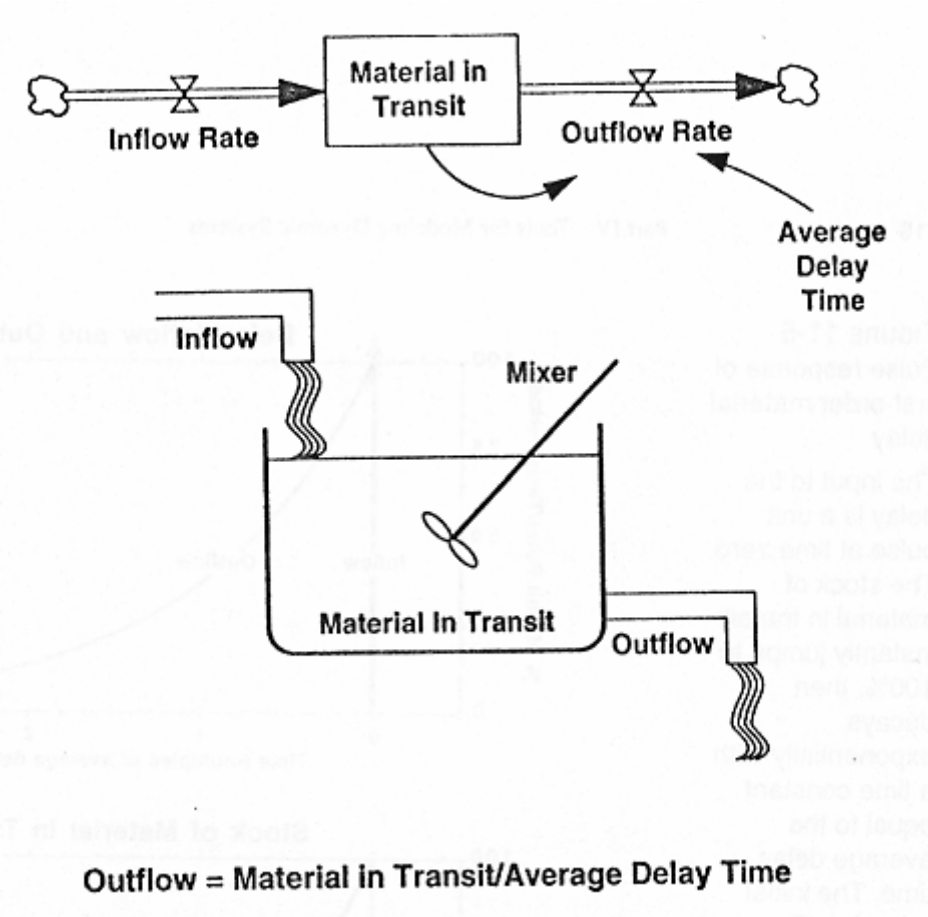
۱۰-۲-۴- تأخیر مواد درجه یک

تأخیر لوله‌ای در خیلی از موارد کاربرد ندارد. زیرا مدت زمان مانندن در فرایند تأخیر برای تمام آیتم‌ها ثابت نیست. فرض کنید آب وارد مخزنی شده سپس از آن خارج می‌شود. در داخل مخزن سیستمی تعبیه شده است که آب را

هم می‌زند لذا تمام ملکول‌های داخل مخزن شانس یکسانی برای خارج شدن دارند. بنابراین با فرض اینکه میانگین مدت تأخیر D باشد لذا در هر لحظه نرخ خروج برابر با رابطه ذیل خواهد بود:

Outflow= Material in Transit/D

رابطه بالا شبیه رفتار هدفجو می‌باشد که در آن رفتار متغیر بصورت نمایی تنزلی است. با توجه به شکل ۱۰-۲ تأخیر درجه یک دارای شکلی مانند B می‌باشد زیرا مقدار آن تابعی از مقدار متغیر حالت می‌باشد و با توجه به اینکه متغیر حالت در لحظه شروع بیشترین مقدار خود را دارد لذا متغیر جریان نیز بیشترین مقدار خود را خواهد داشت سپس به مرور زمان کاهش خواهد یافت. پس از یک D ۶۳ درصد ، پس از دو D ۸۶ درصد و پس از سه D ۹۵ درصد متغیر حالت کاهش خواهد یافت.



شکل(۱۰-۳): تأخیر درجه یک مواد

۱۰-۲-۵- تأخیرهای مواد درجه بالاتر

تأخیر لوله‌ای در برخی از موارد مانند خط مونتاژ اتومبیل بسیار مناسب است. همچنین مدل تأخیر درجه یک نیز برای برخی از سیستم‌ها نظیر سیستم‌های شیمیایی، انتقال حرارت فیزیکی و غیره بسیار مفید می‌باشند. ولی دو سیستم فوق دو حالت حدی در میزان یکنواختی فرایند تأخیر می‌باشند. در تأخیر لوله‌ای فرایند تأخیر دارای یکنواخت‌ترین حالت و در تأخیر درجه یک فرایند تأخیر دارای غیر یکنواخت‌ترین حالت در انتخاب آیتم‌های مورد نظر برای خارج شدن از متغیر تأخیر می‌باشند. در صورتی که برخی از سیستم‌ها ممکن است مابین این دو حالت باشند. به عنوان مثال در سیستم ارسال و دریافت نامه، نامه ابتدا در صندوق پست قرار گرفته سپس به توسط خودروهای پست به اداره محلی منتقل شده در آنجا نامه‌ها از یکدیگر تفکیک شده سپس به اداره مرکزی ارسال شده و از آنجا نیز توسط قطار یا هواپیما به مقصد فرستاده شده و در نهایت به دست شخص مورد نظر خواهد رسید. بدین ترتیب در مرحله‌ای که نامه‌ها در صندوق پست هستند مانند سیستم تأخیر درجه عمل می‌کنند ولی وقتی از یکدیگر جدا شدند بحث توالی دارای اهمیت خواهد بود. در عمل درنظر گرفتن چندین متغیر حالت برای هرکدام از مراحل مدل را پیچیده می‌کند. بنابراین فرض می‌کنیم در دو مرحله عمل فوق صورت می‌گیرد لذا از دو متغیر حالت سری استفاده خواهیم کرد.

بنابراین در سیستم‌های درجه چند میانگین کل تأخیر برابر مجموع میانگین تأخیر هر یک از متغیرها بوده و مجموع آیتم‌های درحال انتقال برابر مجموع آیتم‌های درحال انتقال در هر یک از متغیرها خواهد بود. در صورتی که میانگین مدت تأخیرها برای همه بخش‌ها برابر باشد ما یک تأخیر درجه n خواهیم داشت.

۱۰-۳- تاخیرهای اطلاعاتی: ساختار و رفتار

در تاخیرهای مورد بررسی ورودی به تاخیر و آیتم‌های در جریان تاخیر و خروجی تاخیر همه از نوع فیزیکی بودند. ولی همواره با اینگونه تاخیرها مواجه نیستیم. در برخی از مواقع تاخیرها مربوط به بازخوردهای اطلاعاتی می‌باشند به عنوان مثال اندازه‌گیری و درک مقادیر یک متغیر از این نوع می‌باشد. در یک شرکت مدیر تصوری از نرخ سفارش دارد که به مرور زمان در ذهن وی نقش بسته است. با تغییر نرخ واقعی سفارش ذهنیت مدیر نسبت به نرخ سفارش به مرور زمان تغییر خواهد کرد.

بنابراین همواره اعتقادات، پیش‌بینی‌ها و تخمین متغیرها با تاخیر همراه است زیرا در همه موارد فوق نیاز به بازخورد اطلاعاتی است.

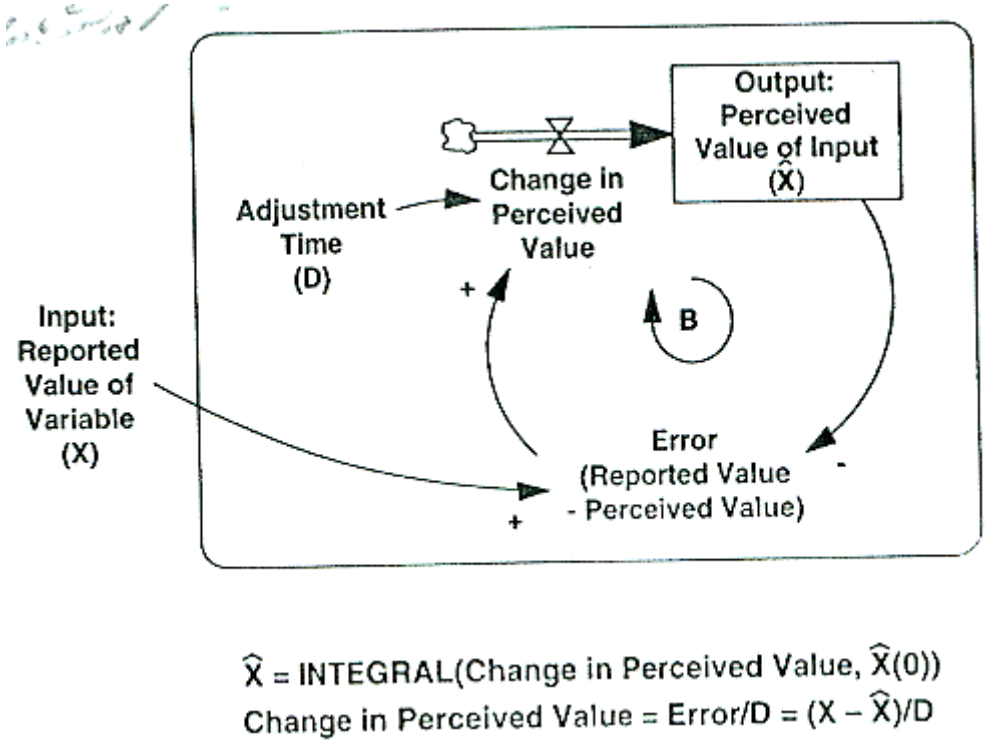
تاخیرهای اطلاعاتی نمی‌توانند همانند تاخیرهای مواد مدل شوند. زیرا در تاخیرهای مواد نرخ ورود و نرخ خروج بصورت جریان مواد بودند که مابه‌التفاوت آنها همواره در متغیری بنام موارد در حال انتقال یا همان تاخیر نگهداری می-شد. برای مدلسازی تاخیرهای اطلاعاتی نیاز به ساختار دیگری است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

۱۰-۳-۱- مدلسازی ذهنیت و دریافت: دریافت تطبیقی و هموارسازی نمایی

یکی از ساده‌ترین تاخیرهای اطلاعاتی مورد استفاده برای پیش‌بینی ها هموارسازی نمایی یا دریافت تطبیقی است. در ساختار دریافت تطبیقی ذهنیت در یک فرایند تدریجی به سمت واقعیت نزدیک می‌شود. بطوری که سرعت نزدیک شدن در ابتدا که فاصله ذهنیت از واقعیت زیاد است زیاد بوده و با کاهش این فاصله از سرعت تعدیل ذهنیت نیز کاسته می‌شود. شکل ۱۰-۴ ساختار تاخیر فوق را نشان می‌دهد.

در دریافت تطبیقی، ذهنیت مربوط به واقعیت e بصورت برآورد یا تقریبی از آن و با نماد $\hat{e}$ نشان داده می‌شود:

$$\hat{e} = \text{INTEGRAL}(\text{Change in Perceived Value}, \hat{e}(\cdot))$$

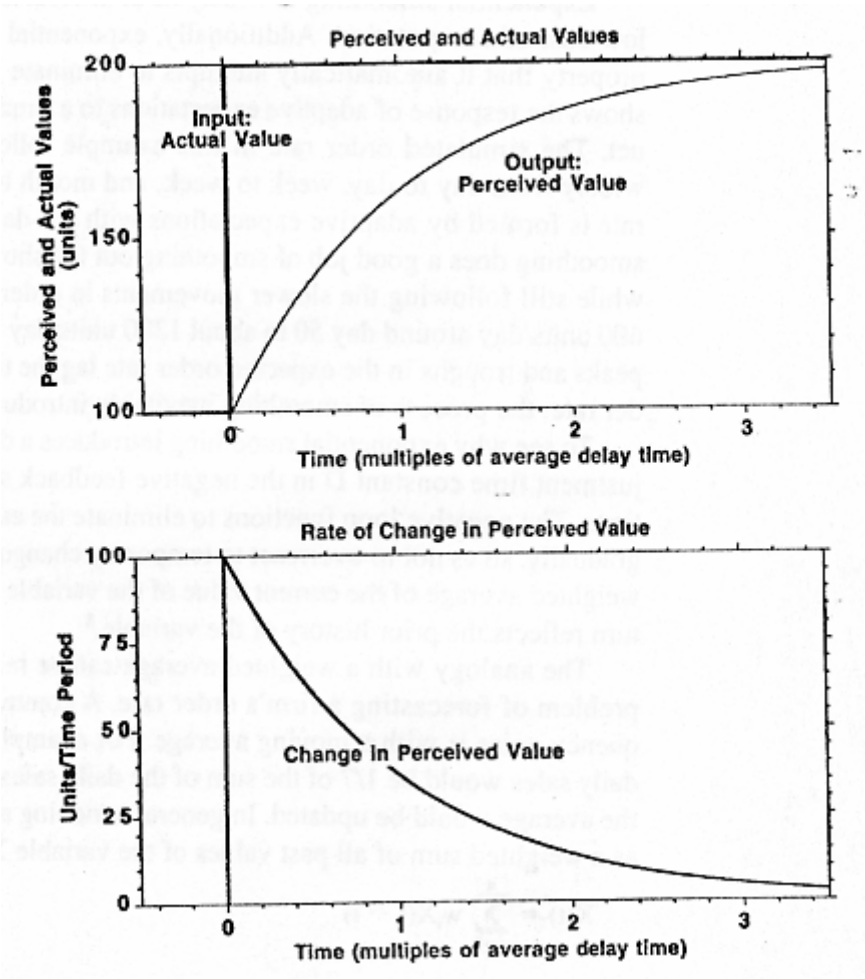


شکل(۱۰-۴): ساختار تاخیر هموارسازی نمایی یا دریافت تطبیقی

نرخ تغییر در ذهنیت متناسب است با اختلاف بین مقدار واقعی و ذهنیت فعلی.

Change in perceived value= (e-ê)

در تاخیر مواد، تاخیر جریان ورودی مواد جریان خروجی مواد می‌باشد درصورتی که در تاخیر اطلاعاتی متغیر حالت نشان دهنده تاخیر در درک واقعیت است. زیرا ذهنیت ما یک متغیر حالت است که تا وقتی تغییری در در سیستم رخ نداده باشد ثابت خواهد بود. ساختار فوق به ساختار تاخیر اطلاعاتی درجه یک معروف است. شکل ۱۰-۵ عکس العمل یک هموارساز درجه یک را نسبت به یک تغییر تصادفی در سیستم نشان می‌دهد. طبق شکل فوق با تغییر ناگهانی متغیر مورد نظر فاصله بین واقعیت و ذهنیت به حداکثر خود رسیده بدین ترتیب نرخ تغییر در ذهنیت در نقطه شروع حداکثر مقدار خود را دارد. با گذشت زمان و کاهش فاصله بین ذهنیت و واقعیت نرخ تغییر نیز کاهش می‌یابد. تا اینکه ذهنیت به واقیت رسیده و نرخ تغییر نیز برابر صفر خواهد شد.

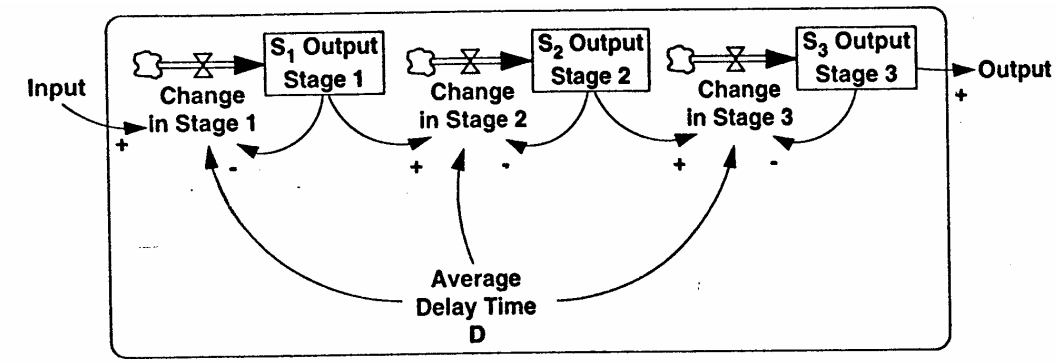


شکل(۱۰-۵): عکس العمل یک هموارساز نمایی به تغییر پله‌ای در متغیر حالت

۱۰-۳-۲- تاخیرهای اطلاعاتی درجه بالاتر

در تاخیرهای اطلاعاتی نیز همانند تاخیرهای مواد، تاخیرهای دارای حالت‌های مختلف می‌باشند. در برخی از موارد ما بدلیل تاخیر در جمع آوری، محاسبه و انتقال اطلاعات معمولاً به اطلاعات هر لحظه پس از D مدت دسترسی خواهیم داشت و تصمیم خود را براساس اطلاعات فوق اتخاذ خواهیم کرد. در تاخیر فوق همانند تاخیر لوله‌ای مواد ورودی با فاصله زمانی ثابت D به خروجی تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر درک و ذهنیت ما از پدید بر اساس واقعیت موجود با وقفه D خواهد بود.

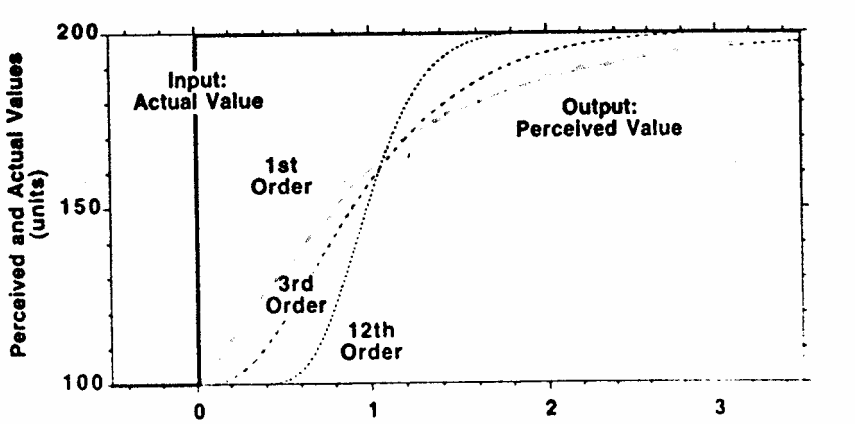
در تاخیر اطلاعاتی مانند تاخیر در مواد حالت بینابینی نیز وجود دارد که تاخیر نه مثل لوله‌ای بوده و نه مثل تاخیر درجه یک است. به عنوان مثال با توجه به فراوانی داده‌های فروش در یک شرکت معمولاً داده‌های فروش هر هفته جمع شده و میانگین آن بصورت هفتگی به مدیران اعلام می‌شود مدیران میانگین داده‌های هفتگی را با یکدیگر مقایسه کرده و از روند تغییرات آن(هموار شده داده‌ها) برای تصمیم گیری استفاده می‌نمایند. بنابراین مانند تاخیرهای درجه n مواد برای تاخیرهای اطلاعاتی نیز از چند مرحله و درنتیجه چند متغیر حالت استفاده خواهد شد.



Output = SMOOTH3(Input, D)
Output = S_3
S_3 = INTEGRAL(Change in Stage 3, $S_3(0)$)
Change in Stage 3 = $(S_2 - S_3)/(D/3)$
S_2 = INTEGRAL(Change in Stage 2, $S_2(0)$)
Change in Stage 2 = $(S_1 - S_2)/(D/3)$
S_1 = INTEGRAL(Change in Stage 1, $S_1(0)$)
Change in Stage 1 = $(Input - S_1)/(D/3)$

شکل (۱۰-۶): ساختار تاخیر اطلاعاتی درجه سه

در شکل ۱۰-۷ تاخیرهای اطلاعاتی درجه یک، سه و دوازده نسبت به یک تاخیر پله‌ای در ورودی نشان داده شده است. طبق شکل فوق هرچه درجه تاخیر افزایش می‌یابد مقدار خروجی در زمان اولیه کمتر و در انتهای زمان تاخیر بیشتر است. بطوری که در تاخیر درجه بی‌نهایت پله ایجاد شده در ورودی دقیقاً پس از زمان تاخیر D همانند تاخیر لوله-ای مواد منتقل خواهد شد.



شکل(۱۰-۷): تاخیرهای درجه چند در تغییر پله‌ای ورودی

۱۰-۴- عکس‌العمل نسبت به زمان‌های تاخیر متغیر

یکی از موارد مهم دیگر در زمینه تاخیرها ثابت یا متغیر بودن زمان تاخیر می‌باشد. با توجه به میزان دقت و نوع مسئله می‌توان زمان را ثابت یا متغیر درنظر گرفت. درصورت متغیر بودن زمان تاخیر باید مشخص نمود که زمان فوق بصورت برونزا وارد مدل شده و یا اینکه بصورت درونزا در مدل تولید خواهد شد. بدین ترتیب سئوال دیگر این است که درصورت متغیر بودن زمان رفتار تاخیر چگونه خواهد بود؟

متغیر بودن زمان تاخیر در هر دو نوع تاخیر مواد و اطلاعات می‌توان صادق باشد. در امریکا با افزایش محدودیت سرعت در داخل بزرگراه‌ها از ۵۵ به ۶۵ کیلومتر در ساعت میزان تاخیر در انتقال مواد از تامین‌کننده به مصرف‌کننده کاهش یافت. با تغییر سیستم‌های جمع‌آوری داده از حالت کامپیوترهای مرکزی به شبکه‌های Client-Server جمع-آوری داده در هر نقطه از فروش صورت می‌گرفت بنابراین مدت زمان جمع‌آوری و پردازش داده‌ها کاهش یافت لذا زمان تاخیر در درک نرخ سفارش کم شد.

زمان تاخیر می‌توان بصورت برون‌زا به مدل داده شود و یا اینکه بصورت درون‌زا در مدل تولید شود. درون‌زا و برون‌زا بودن به نوع سیستم مورد مطالعه مربوط می‌شود. به عنوان مثال در مدل‌سازی زنجیره عرضه مدت زمان بین درخواست و دریافت قطعات و مواد اولیه یکی از فاکتورهای مهمی است که به ساختار زنجیره عرضه وابسته است و به صورت درون‌زا تعیین می‌شود. درصورتی که برخی تاخیرها را می‌توان با تقریب خوبی برون‌زا درنظر گرفت. به عنوان مثال زمان تاخیر در رسیدن به خانه در فصول مختلف بدلیل ساعت تاریکی هوا متفاوت است لذا می‌توان برای فصول مختلف آن را برون‌زا درنظر گرفت.

مدت زمان تاخیر معمولاً تابعی از حالت و وضعیت سیستم می‌باشد. به عنوان مثال مدت زمان لازم برای گرفتن پول از عابربانک وابسته به طول صف و مدت زمان ارائه سرویس توسط عابربانک دارد. با طولانی‌تر شدن صف مدت زمان بیشتری صرف گرفتن پول می‌شود. همچنین نرخ اضافه شدن به صف نیز بستگی به طول صف دارد. درصورتی که صف طولانی باشد افراد تمایل کمتری به ایستادن در صف دارند. بنابراین مدت تاخیر و یا انتظار در صف تابعی از تعداد افراد داخل صف می‌باشد.

۱۰-۴-۱- زمان‌های تعدیل غیرخطی:

زمان‌های تعدیل غیرخطی اغلب در تاخیرهای اطلاعاتی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ما برخی از موارد را سریعتر یاد می‌گیریم و دیرتر فراموش می‌کنیم. درصورتی که ساختار هموارساز نمایی بگونه‌ای است که افزایش و کاهش ذهنیت نسبت به واقعیت با سرعت مشابه روی می‌دهد.

هزینه‌های مصرف اشخاص تابعی از درآمد آنها است. ولی عکس العمل اشخاص نسبت به افزایش و کاهش درآمد یکسان نیست. هنگام افزایش درآمد، هزینه‌ها به سرعت افزایش می‌یابد درصورتی که با کاهش درآمد اشخاص تمایل کمتری برای کاهش سطح رفاه خود دارند. برای مدلسازی تاخیرهای غیرخطی با ساختار فوق بصورت ذیل عمل می‌شود. معمولاً $D_2>D_1$ است.

$D= D_1 \quad if \quad e>\hat{e}$

$D=D_2 \quad if \quad e<\hat{e}$

۱۰-۵- تخمین مدت زمان و توزیع تاخیر

میانگین مدت زمان تاخیر و نحوه توزیع آن را با استفاده از دو تکنیک؛ روش‌های آماری و تحلیل مستقیم فرایند مورد مطالعه می‌توان مشخص نمود.

۱۰-۵-۱- تخمین تاخیرها هنگامی که داده‌های عددی در دسترس می‌باشند

ابزارهای آماری و اقتصادی زیادی برای تخمین مدت و نحوه توزیع تاخیر وجود دارد که از داده‌های سری زمانی استفاده می‌کنند. تکنیک‌های اقتصادی چندی نظیر Koyck، تاخیر هندسی، تاخیرهای توزیع شده منطقی و ATIMA وجود دارند که از طریق داده‌های سری‌های زمان تاخیر را محاسبه می‌نمایند.

در انتخاب روش دو عامل اصلی وجود دارد که با افزایش هر یک دیگری کاهش خواهد یافت. بدین ترتیب انتخاب روش از تعامل میزان انعطاف‌پذیری فرمولاسیون و تعداد پارامترهای تخمین زده بدست می‌آید. بدین ترتیب برخی از روش‌ها با فرض شکل تاخیر میانگین مدت زمان تاخیر را محاسبه می‌کنند. به عنوان مثال روش‌های Koyck و تاخیر هندسی فرض می‌کنند تاخیر درجه یک می‌باشد. در روش‌های دیگر نظیر Polynominal lag شکل‌های مختلفی برای تاخیر درنظر گرفته می‌شود ولی به تبع داده‌های بیشتری نیز مورد نیاز است. شما نباید شکل تاخیر را محدود نمایید مگر اینکه منطق قوی برای انتخاب نوع شکل تاخیر داشته باشید و یا اینکه آنالیزهای تحلیل حساسیت میزان حساسیت خروجی‌ها به شکل تاخیر را رد کنند.

مسئله قابل توجه این است که پس از یافتن نوع تاخیر با استفاده از روش‌های اقتصادی و آماری لزوماً از آن استفاده نکنید و سعی کنید از تاخیری در مدل خود استفاده کنید که رفتار را بهتر مدل می‌کند و به واقعیت نزدیک‌تر است. زیرا دو دلیل عمده وجود دارد: اولاً اینکه مدل‌سازی در روش‌های اقتصادی بیشتر حالت گسسته داشته و از داده-های سری زمانی گسسته نظیر داده‌های هفتگی، ماهانه، فصلی، سالانه و غیره استفاده می‌شود درصورتی که در سیستم داینامیک مدلسازی پیوسته بوده و فاصله‌های زمانی مدلسازی بسیار کوچک است. همچنین در روش‌های اقتصادی زمان تاخیر ثابت درنظر گرفته می‌شود درصورتی که در واقعیت لزوماً زمان تاخیر ثابت نبوده و ممکن است بصورت درون‌زا تغییر نماید.

۱۰-۵-۲- تخمین تاخیرها هنگامی که داده‌های عددی در دسترس نیستند

در برخی از موارد که دسترسی به داده‌های عددی وجود ندارد از طریق تجربه، بررسی فرایند تاخیر و مقایسه آن با سیستم‌های مشابه می‌توان مدت و نوع تاخیر را مشخص نمود. متاسفانه تخمین‌های حدسی اغلب مدت تاخیر را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند.

ریز شدن و تفکیک متغیر به اجزای کوچکتر روشی است که مقدار خطای تقریب تاخیر را کاهش می‌دهد. بنابراین بجای اینکه تاخیر کل را تخمین بزنید فرایند مورد نظر را به مراحل آن شکسته و تاخیر هر مرحله را تخمین بزنید. برای اینکه صحت تخمین افزایش یابد نمودار حالت-جریان فرایند تاخیر را متناسب با مراحل عملیاتی ان ترسیم کنید. به عنوان مثال در شکل ۱۰-۸ مراحل تولید خوک نشان داده شده است. در مثال فوق پس از افزایش قابل ملاحظه قیمت پرورش دهنده خوک تصمیم می‌گیرد که عرضه خوک را افزایش دهد. بنابراین اقدام به نگهداری خوک-

های ماده و عدم ارسال آنها به بازار می‌کند. خوک‌های ماده پس از آبستن شدن شروع به زاد و ولد نموده سپس در طی زمان رشد کرده و بالغ می‌شوند. بنابراین در فرایند فوق برخی از تاخیرها بیولوژیک هستند که تخمین انها به راحتی امکان پذیر است. در مثال فوق مراحل آبستنی، بلوغ و پروارسازی هر یک مدت ۴، ۵ و ۲ ماه طول می‌کشند. بنابراین تاخیر مواد در مثال فوق ۱۱ ماه خواهد بود. در مثال فوق پس از افزایش قیمت خوک بایست ذهنیت پرورش دهنده نسبت به افزایش قیمت تغییر نماید تا تصمیم به افزایش عرضه بگیرد. تاخیر فوق که از نوع اطلاعاتی است در این مثال ۱۱ ماه می‌باشد. بنابراین کل تاخیر بین افزایش قیمت و افزایش عرضه ۲۲ ماه خواهد بود.

با استفاده از روش تفکیک تاخیر به مراحل ایجاد کننده آن علاوه بر امکان تخمین صحیح مدت تاخیر می‌توان شکل تاخیر را نیز بدست اورد. به عنوان مثال در مسئله فوق تاخیر در آبستن شدن خوک‌ها دارای درجه بسیار بالایی است زیرا واریانس مدت زمان آبستنی بسیار کم است. در رابطه با دوره بلوغ تاخیر نسبت به ابستنی از درجه کمتری برخوردار است. بدین ترتیب با تحلیل‌های منطقی برای هر مرحله می‌توان شکل تاخیر کل را بدست آورد.

۱۰-۶- ریاضیات تاخیرها: تاخیرهای کویک و توزیع‌های ارلانگ

در این بخش ریاضیات تاخیرها برای انواع تاخیرهای اصلی در حالت زمان پیوسته و گسسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سیستم داینامیک زمان بصورت پیوسته است درصورتی که معمولاً داده‌ها بصورت گسسته جمع‌آوری می‌شوند. بنابراین استفاده از زمان گسسته می‌توان مفید باشد. همچنین در تمام محاسبه انجام شده برای ساده سازی و خطی شدن روابط فرض ثابت بودن مدت زمان تاخیر درنظر گرفته شده است.

۱۰-۶-۱- فرمولاسیون کلی تاخیرها

شکل عکس العمل تاخیر برای یک ورودی پالس بیانگر توزیع احتمال خروجی می‌باشد. در حالت گسسته خروجی تاخیر در زمان t ترکیب وزنی ورودی‌های زمان‌های قبل از t می‌باشد:

$$Output(t)= w_0 I_t+w_1 I_{t-1}+w_2 I_{t-2}+\cdots$$

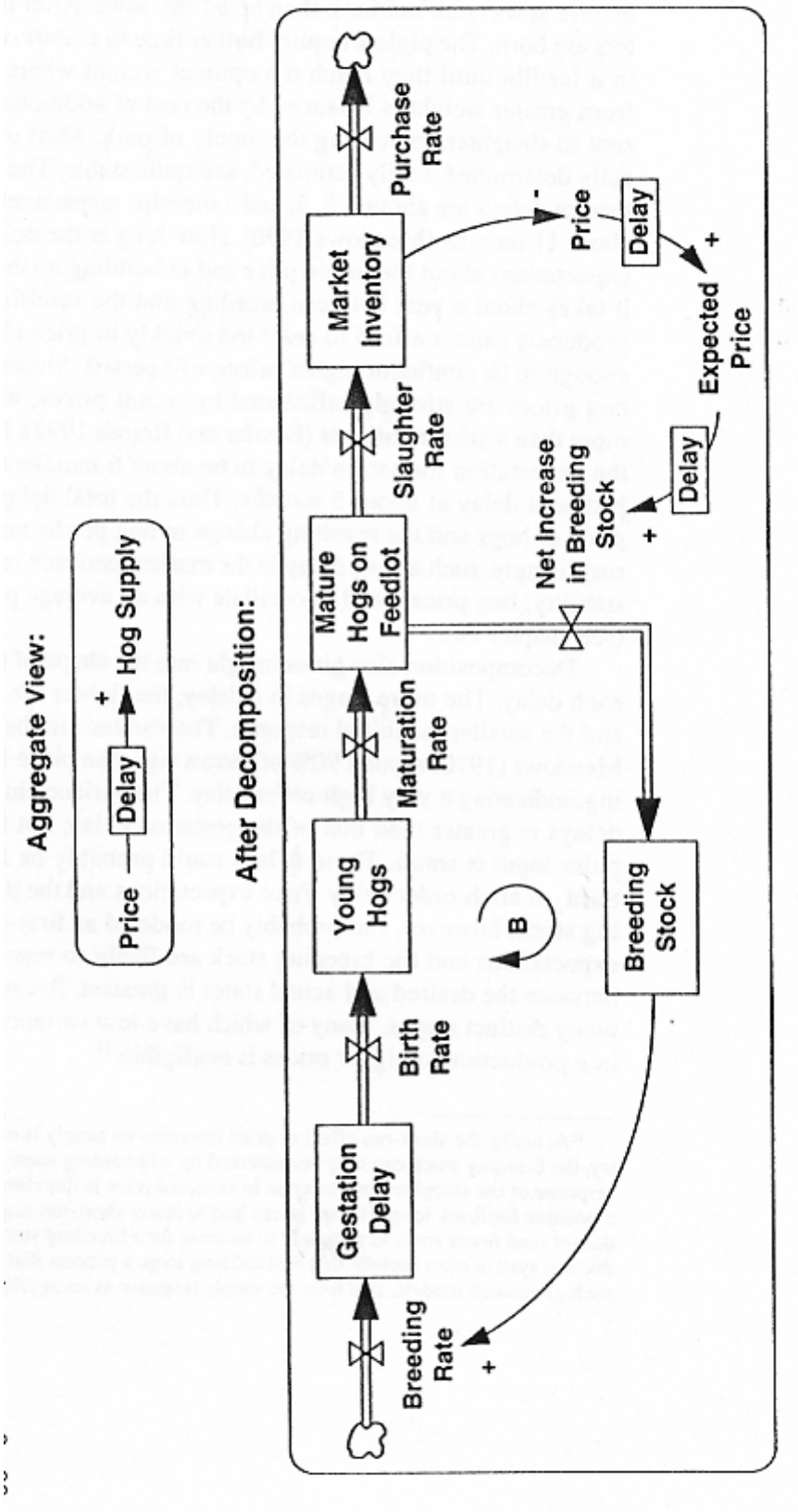
W_i وزن‌های تاخیر می‌باشد که بیانگر احتمال اینکه تاخیر برابر پریودi باشد را نشان می‌دهد. بنابراین مجموع w_i برابر یک است.

$$W_0+w_1+w_2+\cdots=1$$

درصورتی که زمان پیوسته درنظر گرفته شود روابطه بالا بصورت ذیل خواهند بود:

Output(t)=

وزن‌ها نشان دهنده میزان تاثیر هر یک از ورودی‌ها بر تاخیر نهایی است. ورودی‌های دوره‌های بسیار قبل دارای تاثیر بسیار کمی می‌باشند لذا وزن آنها به سمت صفر میل خواهد کرد. همچنین و



شکل(۱۰-۸): تخمین تاخیر با استفاده از شکست فرایند تاخیر

[۱] Y. Saboohi, Energy Science: Planning methodologies and Models, Dept. of Mechanical Engineering University of Sharif,فق 1999.

[۲] James K. Doyle, Daid N. Ford, Mental Models Concepts for Sytem Dynamics Research, Report No. 6, January 7, 1998.

[۳] صدیقی ، عسگر- طراحی سیستم هدفمند یارانهٔ انرژی با استفاده از سیستم داینامیک، پایان نامهٔ کارشناسی ارشـد ، گروه مهندسی صنایع دانشکدهٔ فنی ، دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.

[۴] Lennart Ljung, System Identification Theory for the user, University of linkoping, Sweden, ۱۹۸۷.

[۵] Arthur J. Lembo, Creating Models, CSS ۶۲۰ Spatial Analysis and Modeling, Cornell University, (ppt).