نگاهی بر پویایی سیستم‌ها

حمیدرضا فرتوک‌زاده

مقدمه

اگر چه زمینه‌های تفکر و نگرش سیستمی را می‌توان در آثار دانشمندان قدیم یافت، اما ورود جدی آن به عرصهٔ عملی و کاربردی عمدتاً به دوران معاصر باز می‌گردد. یکی از جالبترین موارد کاربرد نگرش سیستمی، ایجاد رشتهٔ جدیدی به نام پویایی سیستم (System Dynamics) است. پس از انتشار کتاب پویایی صنعتی (Industrial Dynamics) در سال ۱۹۶۱، توسط جی. دبلیو فارستر (Jay. W. Forrester) مطالعات پویایی سیستم در زمینه‌های نظری و کاربردی در بیش از ۳۰ کشور جهان گسترش یافت. این روند با یاری کامپیوتر و شبیه‌سازی کامپیوتری سرعت و عمق بیشتری پیدا کرد و امکان کاربرد روشهای ارائه شده را در حل مسائل و معضلات گوناگون جوامع بشری فراهم ساخت. مطالعات پویایی سیستم (System Dynamics Study) اینک در سطح جهانی اعتبار علمی و کاربردی برجسته‌ای یافته و مورد اقبال محافل آکادمیک و حرفه‌ای قرار گرفته است. علاوه بر تدریس آن در دانشگاه‌های معتبر، گروه‌های حرفه‌ای در کشورهای مختلف صنعتی اروپایی، ژاپن و آمریکا به انجام مطالعات کاربردی در زمینه‌های مختلف این رشته پرداخته‌اند. در این گفتار ابتدا مبانی نظری مطالعات پویایی سیستم مطرح شده، سپس روشهای کاربرد آن مورد بحث قرار خواهند گرفت.

شالوده فکری مطالعات پویایی سیستم (Paradigm)

بروز تحولات در جامعه بشری قولی است که جملگی برآنند. اما دانشمندان رشته پویایی سیستم معتقدند که این تحولات دارای قانونمندیهایی هستند که می‌توان آنها را شناخت و بر اساس آن مسیر تحولات را به جهت مطلوب سوق داد. در غیر این صورت بدون شناخت قانونمندیهای حاکم بر یک پدیده، ورود در عرصه کار و مدیریت و سیاستگذاری و بطور کلی اتخاذ هر نوع تصمیم در مورد آینده تیری است که در تاریکی انداخته شود. رویکرد پویایی سیستم (System Dynamics Approach) بر آن است که ابزارهای لازم برای کشف این قانونمندیها را در اختیار تحلیلگر قرار دهد. متدلوژی پویایی سیستم نه تنها داعیه شناخت قانونمندیهای حاکم بر تحولات عالم را دارد، بلکه با استفاده از ابزار شبیه‌سازی، امکان ساختن مدلی از پدیده‌های واقعی را فراهم می‌آورد که تا حدود زیادی دارای ویژگیهای پدیده در عالم واقع است.

جی دبلیو فارستر از بنیانگذاران این رشته علمی معتقد است که هر سیستم پویا که در طول زمان دگرگون می‌شود، دارای یک ساختار سلسله مراتبی چهارگانه است، بطوری که می‌توان برای هر نوع تحول و پویایی در پدیده‌های گوناگون چنین ساختاری را ارائه کرد. اعم از اینکه سیستم پویا در زمینه مهندسی، اقتصاد، مدیریت، طبیعت یا روانشناسی باشد. با استفاده از الگوی ارائه شده توسط این نظریه می‌توان علت پویایی و دینامیک سیستم را تبیین کرد، مثلاً رشد یک شایعه در اجتماع، رشد جمعیت، رشد یک گلوله برفی که از کوهستانی پر برف سرازیر شده باشد، رشد نارضایتی در یک جامعه در حال انقلاب، همگی از یک الگوی

واحد پیروی می‌کنند و می‌توان با استفاده از ساختار سلسله مراتبی مزبور، فرمول رفتار آنها را تعیین نمود.

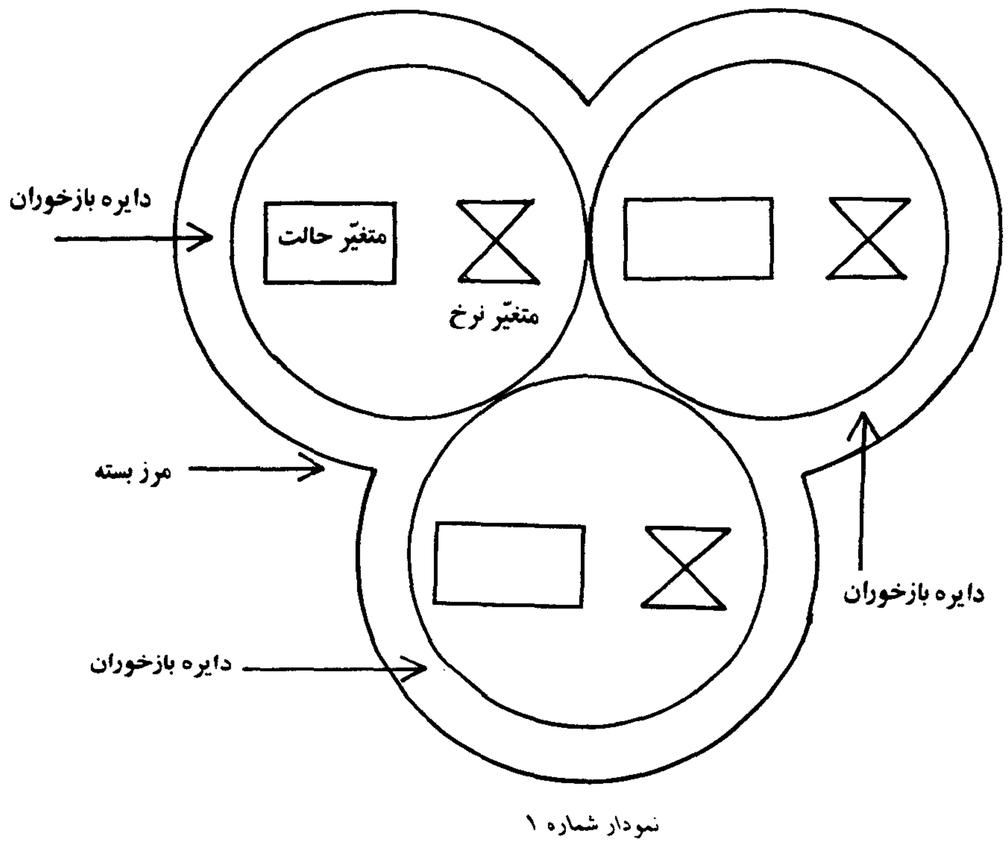
این ساختار سلسله مراتبی دارای چهار مرتبه است:

۱ - مرز بسته Closed Boundary

۲ - حلقه‌های بازخوران Feed back Loops

۳ - متغیّرهای سطح یا حالت State or Level Variables

۴ - متغیّرهای نرخ Rate Variables



نمودار شماره ۱

قبل از توضیح این مفاهیم، لازم است که به ویژگی کاربردی و مقداری مطالعات پویایی سیستم توجه شود، اگر چه رشته پویایی سیستم در مجموعه رشته‌های ناشی از نگرش سیستمی محسوب شده و با آنچه که مکتب مدیریت سیستمی نامیده می‌شود، نقاط اشتراک فراوانی دارد، اما در بسیاری از زمینه‌ها از ادبیات و مفاهیم خاص خود بهره می‌برد. چون این مطالعات به ارائه یک مدل کمی و مقداری منجر می‌شود، بنابراین مفاهیم و تعبیرهای بکار رفته در نظریهٔ ساختار سیستمها پیشاپیش در پی هدف معینی هستند. تعبیرهای کمی و چارچوبهای تحلیلی که در نگرش سیستمی کاربرد فراوان دارند، در اینجا ناچار از اتخاذ یک «مقدار» هستند و دشواری این امر، پوشیده نیست. اهمیت این نکته تا آنجاست که دانشمندان این رشته، تفکر بر حسب نمودار در طول زمان (Thinking in terms of Graphs over Time) را جزء جداناشدنی رویکرد پویایی-سیستم دانسته‌اند. آنها معتقدند که برای حل هر مسأله‌ای ناچاریم که آن را به صورت متغیّرهایی که مقادیر مشخصی دارند و در طول زمان به شکل مشخصی تغییر می‌کنند تعریف کنیم. بنابراین در برخورد با تعبیرها و واژه‌های این رشته علی‌رغم همانندی ظاهری باید به تفاوت اساسی آن با روشهای غیر مقداری توجه داشت.

۱ - مرز بسته (Closed Boundary)

ممکن است برای دانشجویان مدیریت سیستمی که با مباحث عمومی مربوط به نگرش سیستمی آشنا هستند، این سؤال مطرح شود که چرا قبل از تعریف محیط به تعریف مرز سیستم با محیط پرداخته می‌شود؟ این سؤال کاملاً منطقی و بجاست. معمولاً در نوشته‌های مربوط به سیستم، تعریف کامل و دقیقی از مرز ارائه نمی‌شود بلکه پس از تبیین محیط و سیستم با یک حکم کلی، یک خط فرضی به دور سیستم کشیده می‌شود، به عنوان مثال چرچمن با ارائه ماتریس ذیل، یک حکم کلی در مورد سیستم و محیط و مرز بین آن دو ارائه می‌کند.

	آیا به سیستم مربوط است؟		
	نه	آری	
نه سیستمی است	درون‌سیستم‌است	آری	آیا تحت‌کنترل
نه محیطی است	محیطی است	نـــه	سیستم است؟

نمودار شماره ۲

ملاحظه می‌شود که این دانشمند بدون دغدغه خاطر در مورد «مقداری بودن» و صرفاً بر اساس قدرت تفکر و تجسم کلیت سیستم یک قاعده کلی را ارائه می‌کند که البته بجای خود بسیار ارزشمند است. از این مدل می‌توان به عنوان یک چارچوب تحلیلی برای تبیین متغیّرهای مرتبط با یک سیستم استفاده کرد اما چگونگی استنتاج، نشان می‌دهد که ابتدا مفهوم مستقلی تحت عنوان سیستم فرض شده و سپس بر اساس آن، در مورد اینکه یک شی بخصوص درون سیستم است یا محیط سیستم، تصمیم گرفته می‌شود. طبیعی است که در این حالت مرز سیستم بخودی خود فاقد موضوعیت بوده پس از تعریف محیط، تا حدودی روشن می‌گردد.

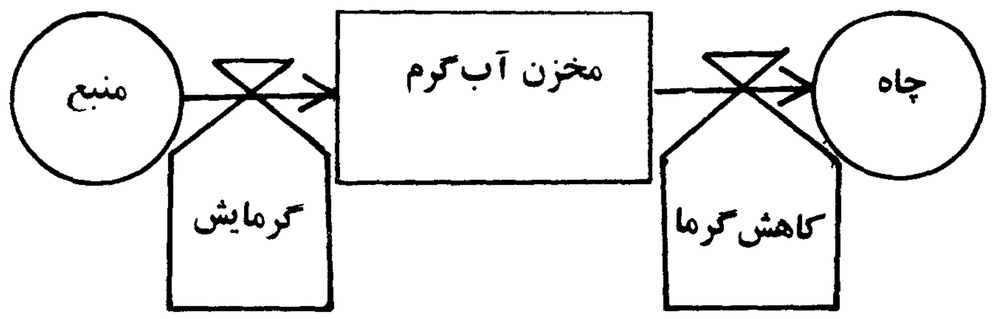
اما در پویایی سیستم، قبل از اینکه سیستم و محیط تعریف شوند، مرز بسته تعریف می‌شود که این از ماهیت و مقصود خاص مطالعات پویایی سیستم ناشی می‌شود. در بخشهای بعدی توضیح داده خواهد شد که اساساً مطالعات پویایی سیستم «مسأله‌گرا» هستند و نه «سیستم‌گرا». این ویژگی بقدری مهم است که در بسیاری از زمینه‌ها مسیر مطالعات پویایی سیستم را از مباحث عمومی تجزیه و تحلیل سیستمها جدا می‌کنند. اجمالاً در اینجا اشاره می‌شود که یک مطالعه پویایی سیستم، بر یک «سیستم» متمرکز نیست بلکه بر یک «مسأله پویا» و به منظور تبیین رفتار آن پدیده در طول زمان تمرکز دارد، مثلاً رشد جمعیت یا کاهش تقاضا برای یک کالا در طول زمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در اینجا پدیدهٔ مورد مطالعه «رشد» یا «نزول» یک متغیّر است ولی در مباحث عمومی تجزیه و تحلیل سیستمها معمولاً مجموعه‌ای مانند یک سازمان را به عنوان یک سیستم تلقی کرده و تحقیق را بر آن متمرکز می‌کنند. پس مرز بسته با یک هدف کمی و مقداری تعیین می‌شود. چه پارامترها و متغیّرهایی در چه روابطی با هم قرار بگیرند تا متغیّر مورد نظر رفتار مورد بررسی را از خود نشان دهد؟ همه آنچه که برای تبیین چگونگی رفتار پویای مورد مطالعه، لازم باشد در درون مرز بسته جا می‌گیرد. در اینجا توجه خواننده را به جمله عجیبی از فارستر جلب می‌کند. او در سال ۱۹۶۷ در یک مجمع دانشگاهی مقاله‌ای را دربارهٔ یک مطالعه پویایی سیستم ارائه داده، در آنجا می‌گوید: «هیچ اثرگذاری از خارج از مرز برای تبیین رفتار مورد بررسی ضرورت ندارد».

شاید در نگاه اول اینطور به نظر برسد که این دانشمند، اثرات محیطی در رفتار یک پدیده را نفی کرده است. اما با قدری دقت معلوم می‌شود که نه تنها چنین نیست، بلکه بخش عمده‌ای از متغیّرهای محیطی را به درون مرز بسته آورده است. یعنی تمام متغیّرهایی که برای ایجاد رفتار مورد نظر، بر یکدیگر تأثیر متقابل داشته باشند درون مرز بسته قرار می‌گیرند. بنابراین مرز بسته را نمی‌توان در عالم واقع مشاهده کرد، بلکه برداشتی است که مدلساز از پدیده در ذهن خود استنباط می‌کند. مدلساز با ساختن یک مفهوم انتزاعی به نام مرز بسته، بررسی خود را آغاز کرده، در طول این مطالعه و بررسی مفهوم ذهنی انتزاع شده را به سوی رفتار واقعی پدیده سوق می‌دهد. این تلاش تأکید دیگری است بر اینکه مطالعات پویایی سیستم «مسأله‌گرا» هستند و نه «سیستم‌گرا». و بنابراین مرز بسته، مرز یک «سیستم» به معنای متداول آن نیست. بلکه مرز یک «مسأله» است. پس تعیین مرز بسته، مستلزم داشتن یک مسأله دینامیک و یک رفتار مورد نظر است. مجموعه متغیّرهایی که برایند تأثیرات متقابل آنها، موجب رفتار معینی می‌شود، مرز بسته مربوط به آن رفتار را تشکیل می‌دهند. از اینجا اهمیت هدف و مقصود در مدلسازی روشن می‌شود. تنها داشتن یک هدف مشخص است که می‌تواند میزان اهمیت متغیّرهای مختلف و کوچکترین مرز بسته ممکن را تعیین کند. همه تلاش مدلساز در این است که تا آنجا که می‌تواند، متغیّرهایی را که بر «هدف» تأثیر ندارند از محدودهٔ مرز بسته خارج نماید. البته در یک تعبیر فلسفی شاید بتوان گفت همه چیز بر همه چیز تأثیر می‌گذارد و هستی یک پیکره واحد بیش نیست، اما این عبارت در مقولات فلسفی قابل بحث است. مدلسازی که یک فعالیت «مقداری» و کمی و مشخص است، نیازمند زبان ساده‌تری است. ادبیات رشته پویایی سیستم متأثر از محدودیتهای یک روش مقداری بوده و همچون سایر روشهای مقداری، برخی از عوامل را ثابت فرض کرده و برخی دیگر را مورد مطالعه قرار می‌دهد. این محدودیت را نمی‌توان نقطه ضعفی برای این رشته دانست بلکه، ناشی از محدودیت ابعاد وجود انسانی است. در واقع باید گفت: اگر مدلی با تمام خصوصیات یک پدیدهٔ پیچیدهٔ واقعی ساخته شود و از هر نظر مطابق با عین واقعیت باشد، مشکلی را حل نخواهد کرد، بلکه خود نیز مانند همان پدیدهٔ واقعی پیچیده بوده و به همان اندازه نیازمند یک مدل جدید برای ساده سازی خواهد بود.

خوانندهٔ اندیشمند، تاکنون دریافته است که منظور از مرز بسته هرگز سیستم بسته نیست. این دو مفهوم، علی‌رغم همانندی ظاهری، کاملاً با یکدیگر متفاوتند. بسته بودن سیستم به معنی عدم تبادل بین یک سیستم با محیط است، در حالی که مرز بسته را می‌توان میدان کنش متقابل و تعامل متغیّرهای مختلف برای ادامهٔ حیات یک پدیده دانست. البته همانطور که گفته شد، تداوم حیات یک پدیده از طریق نمایش تحول یک متغیّر در طول زمان مشخص می‌شود. کنش متقابل بین متغیّرهای مزبور منجر به جریان مواد حیاتی از منابع (Sources) به مخازن و از مخازن به چاه‌ها

(Sinks) می‌گردد، که تنها مخازن در درون مرز بسته قرار می‌گیرند و منابع و چاه‌ها خارج از مرز بسته واقع می‌شوند.

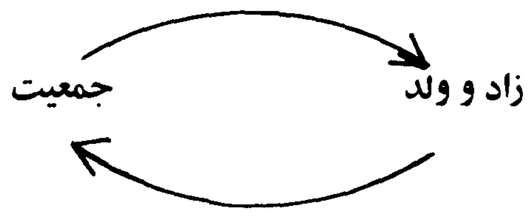
بطور خلاصه می‌توان گفت که مرز بسته حاکی از بسته بودن مدار حلقه‌های بازخوران است نه مسدود بودن پیرامون یک سیستم. مثلاً گرمایش یک دستگاه حرارتی با هدف تعیین شده توسط ترموستات یک مرز بسته باز خوران تشکیل می‌دهند، یعنی گرمایش موتور به تحریک ترموستات منجر می‌شود و تحریک ترموستات به کاهش گرمایش منجر می‌گردد و این مدار بسته بازخوران یک رفتار هدف جو برای موتور دستگاه حرارتی ایجاد می‌کند. واضح است که این دستگاه حرارتی کاملاً با محیط خود تبادل دارد و به هیچ عنوان سیستم بسته محسوب نمی‌شود. سوخت و هوای مورد نیاز دستگاه از محیط تأمین می‌شود (منبع) و حرارت حاصل از آن به محیط ارائه می‌گردد (چاه).



نمودار شماره ۳

۲ـ حلقه‌های بازخوران Feed Back Loops

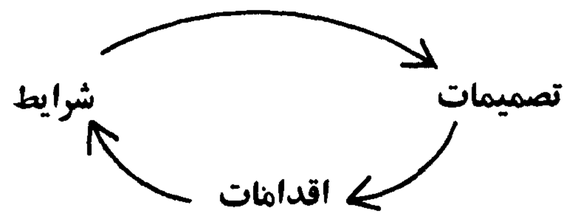
هر مرز بسته، حلقه‌های بازخورانی دارد که بر یکدیگر اثر می‌گذارند و برایند تأثیرات حلقه‌های مزبور، مبین رفتار مورد نظر خواهد بود. هر حلقهٔ باز خوران در حکم سنگ بنای ساختار سیستم مورد نظر می‌باشد. این نظریه در مقابل دیدگاه سنتی ارائه شده که جریان تأثیر گذاری بین پدیده‌ها را یک طرفه می‌انگاشتند. آنها با یک استنباط غلط از قانون علّیت، به یک رابطهٔ خشک یک طرفه بین علتها و معلولها معتقد بودند. آنها توجه نداشتند که آنچه که در قانون علّیت به عنوان علّت تامّه مطرح شده است، تقریباً فاقد مصداق عینی در عالم مادی است، یعنی اگر چه حکم صادره در مورد علت تامه، حکمی قطعی و معتبر است اما این حکم معتبر، موضوعی برای جاری شدن نمی‌یابد. رابطه علّیت بین پدیده‌های عالم مادی، که توسط حواس انسانی قابل درک است، رابطه‌ای از نوع علّیت ناقص است و علّیت ناقص منافاتی با تأثیر متقابل و تعامل بین پدیده‌ها ندارد. ابهام دیگری که در این زمینه ممکن است پدید بیاید، خلط بین مفهوم بازخوران و دور و تسلسل فلسفی است. دور و تسلسل به معنای اینکه ایجاد یک پدیده به وجود قبلی آن (مستقیم یا با واسطه) موکول باشد امری محال است و هرگز تحقق نخواهد یافت و حلقه بازخوران اگر چه از لحاظ ظاهری شباهتی با مفهوم دور و تسلسل دارد، اما با دقت در مفهوم علّیت ناقص این ابهام نیز بر طرف می‌شود. اتصالات علت و معلولی در دوایر بازخوران، اثر گذاری و علّیت ناقص است و همین اثر گذاری و علّیت ناقص دو طرفه هم در آن واحد قابل محاسبه نیست، بلکه در مرحلهٔ شبیه‌سازی هر طرف تأثیر گذاری، در زمان جداگانه‌ای انجام می‌شود، به عنوان مثال در حلقهٔ بازخوران بین جمعیت و زاد و ولد ابتدا جمعیت د رزمان K بر حسب زاد و ولد در فاصله زمانی JK محاسبه شده و سپس همان جمعیت محاسبه شده در زمان K، مبنای محاسبه زاد و ولد در فاصله زمانی KL قرار می‌گیرد مجدداً زاد و ولد محاسبه شده در فاصله KL در محاسبه جمعیت زمان بعدی بکار می‌رود و این فرایند تا پایان زمان شبیه‌سازی (Simulation) ادامه می‌یابد.



نمودار شماره ۴

اگر چه، حلقه‌های بازخوران در مرتبه بعد از مرز بسته قرار دارند اما در اغلب موارد در تعیین مرز بسته نیز ایفای نقش می‌کنند، یعنی مرز بسته تا آنجا گسترش می‌یابد که حلقه‌های بازخوران تشکیل شوند. مرز بسته چیزی غیر از مجموعهٔ حلقه‌های بازخوران نیست و تا زمانی که همهٔ حلقه‌های بازخوران به طور کامل بسته نشوند، مرز بسته تکمیل نخواهد شد. این اشکال می‌تواند ناشی از تفکر ناقصی باشد که در یکی از نوشته‌های این رشته به نام تفکر حلقه باز (Open Loop thinking) نامیده شده است. تفکر حلقهٔ باز (که حتی عنوانش نیز متضمن تناقض است) بیانگر عدم توجه به بازتاب اقدامات انجام شده است. یک تنیس‌باز تازه کار که ضربهٔ محکمی را روانهٔ زمین حریف با تجربه

می‌کند بدون اینکه به دفاع و بازگشت محکم توپ از زمین حریف توجه داشته باشد نمونه‌ای از یک تفکر حلقهٔ باز را به نمایش گذاشته است. مدیری که بدون توجه به بازتاب عمل خود، رفتاری تند و غیر منطقی را در پیش می‌گیرد، از همین قماش محسوب می‌گردد. به طور کلی می‌توان گفت: اگر چه تصمیمات بر اساس شرایط مشاهده شده اتخاذ می‌شوند اما نتایج حاصل از تصمیمات مجدداً بر شرایط تأثیر گذاشته و ممکن است تصمیم جدیدی را طلب کند.



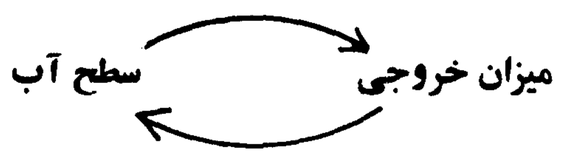
نمودار شماره ۵

بر اساس این نظریه، پویایی سیستمها ناشی از حلقه‌های بازخوران است. بنابراین مدلساز همواره باید تلاش کند که زنجیرهٔ علت و معلولها را که به صورت یک حلقهٔ علت و معلولی در آورد، چرا که تداوم پویایی سیستم مستلزم وجود حلقه‌های علت و معلولی است.

۳و۴- متغیّرهای حالت (سطح) و نرخ

State (Level) & Rate Variables

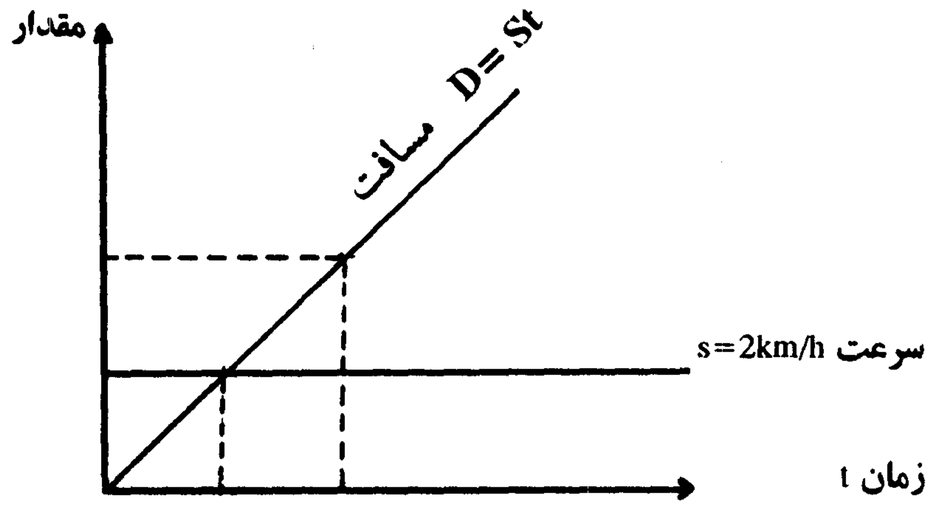
چون مطالعات پویایی سیستم دارای جنبه مقداری و کمی (quantitative) هم می‌باشند، لذا دوایر بازخوران باید به وسیلهٔ یک ابزار کمی و قابل محاسبه تعریف شوند. به همین منظور، فعالیت یک دایره بازخوران به وسیلهٔ متغیّرهای قابل سنجش تعریف می‌شود. برای اینکه بتوان فعالیت یک دایره بازخوران را تبیین نمود دو نوع متغیّر لازم است: متغیّر نوع اول باید سطح یا حالت سیستم را بطور پیوسته نمایش دهد و متغیّر نوع دوم بیانگر هر نوع افزایش یا کاهش در سطح یا حالت باشد. مثلاً یک تانکر آب را در نظر بگیرید که یک شیر خروجی دارد. خروج آب از این تانکر بستگی به سطح آب دارد. هر چه سطح آب تانکر بیشتر باشد میزان خروجی بیشتر خواهد بود. متقابلاً سطح آب تانکر به میزان خروجی بستگی دارد. هر چه میزان خروجی بیشتر شود سطح آب تانکر کاهش خواهد یافت. این دو متغیّر بخوبی یک حلقه بازخوران را تبیین می‌کنند.



نمودار شماره ۶

مطالعات پویایی سیستم این مفهوم را به تمام دوایر بازخوران گسترش داده است. متغیّر نوع اول را متغیّر سطح یا حالت (State variables) و متغیّر نوع دوم را متغیّر نرخ (Rate Variables) نامیده است. در این مثال سطح آب تانکر متغیّر حالت و میزان خروجی متغیّر نرخ است. متغیّر حالت وضعیت سیستم را در هر نقطه از زمان نشان می‌دهد و برای تعریف آن به گذشت زمان نیاز نیست. اما متغیّر نرخ در یک دوره زمانی بوجود می‌آید. متغیّر حالت مشابه مانده حسابهای دائمی در ترازنامه حسابداری است در ریاضیات می‌توان آن را با مفهوم انتگرال بیان کرد. همچنانکه انتگرال بیانگر تراکم و انباشتگی است متغیّر حالت نیز چنین خصوصیتی دارد.

متغیّر نرخ، از طریق نمایش تغییرات حاصل در متغیّر حالت، بیانگر فعالیت سیستم است. بر خلاف متغیّر حالت که یک هستی دائمی و پیوسته دارد. متغیّر نرخ برای ایجاد شدن به زمان نیازمند است. اگر جریان فعالیت سیستم در مثال تانکر آب قطع شود، متغیّر حالت همچنان وجود دارد، اما متغیّر نرخ بلافاصله صفر خواهد شد. متغیّر نرخ را می‌توان با مفهوم سود یا زیان در حسابداری مقایسه کرد. همچنان که سود یا زیان یک واحد تجاری در یک دوره زمانی معنی پیدا می‌کند، متغیّر نرخ نیز برای جلوه گری به زمان نیازمند است. در ریاضیات مشتق گیری بخوبی با متغیّر نرخ همانندی دارد. به عنوان یک مثال بسیار ساده از رابطه بین متغیّر نرخ و حالت (البته بدون دایره بازخوران) اتومبیلی را در نظر بگیرید که با سرعت ثابتی در حرکت است (S=2)



نمودار شماره ۷

از دیدگاه ریاضی می‌توان سرعت را مشتق مسافت دانست و مسافت را انتگرال سرعت تلقی کرد. از نظرگاه دینامیکی، سرعت نرخی است برای مسافت و مسافت طی شده متغیّری است که وضعیت را در هر نقطه از زمان نشان می‌دهد. اگر اتومبیل توقف کند بلافاصله سرعتش صفر می‌شود اما مسافت طی شده تا آن لحظه همچنان وجود خواهد داشت.

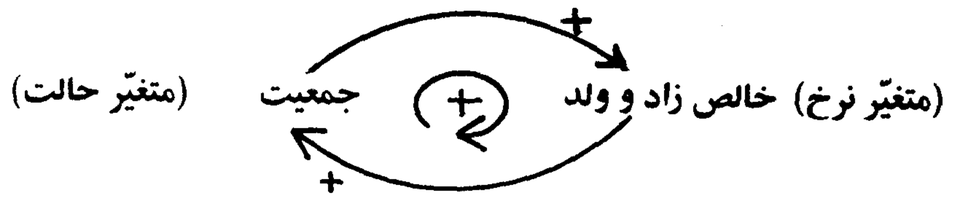
متغیّر نرخ → سرعت = S $S=2\ km/h$

متغیّر حالت → مسافت = D $D=St=2t$

حرکت از مبداء $c=0$, $\int sdt=st+c$ مسافت = انتگرال سرعت

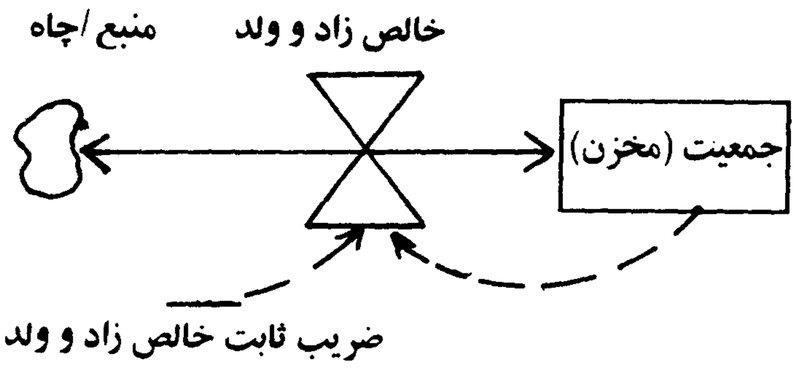
$\frac{dD}{dt}=\frac{d(st)}{dt}=s$ سرعت = مشتق مسافت

اینک با ذکر یک مثال ساده ساختار سلسله مراتبی چهارگانه در یک مدل توضیح داده می‌شود: یک جامعه قدیمی را که جمعیت آن بطور طبیعی (با ضریب نرخ خالص زاد و ولد ثابت) و بدون عوامل غیر مترقبه مانند مهاجرت یا سیل و زلزله و ... در حال رشد است، تصور کنید. ساده‌ترین مدلی که می‌تواند دینامیک و پویایی جمعیت سرزمین فرضی مزبور را بر حسب خالص زاد و ولد تبیین کند، به شرح زیر است: خالص زاد و ولد (زاد و ولد منهای مرگ و میر) موجب افزایش جمعیت می‌شود. افزایش جمعیت بنوبه خود موجب افزایش خالص زاد و ولد می‌شود. چون هدف از مدلسازی در اینجا صرفاً بیان رابطه جمعیت با خالص زاد و ولد است بنابراین مرز بسته سیستم صرفاً شامل متغیّرهای جمعیت و خالص زاد و ولد است. چون این مدل به دلیل سادگی بیش از اندازه صرفاً یک حلقه بازخوران است، بنابراین مرز بسته و حلقه بازخوران بر هم منطبق خواهند بود.



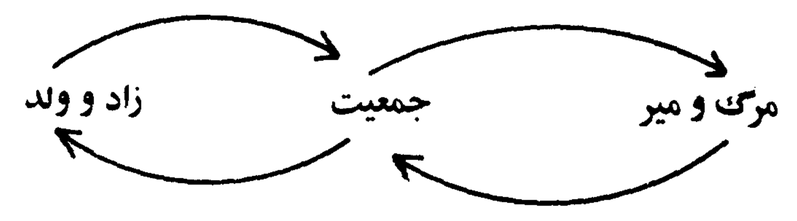
نمودار شماره ۸- علّت و معلولی رابطه جمعیت و خالص زاد و لد

گفتیم که هر حلقه بازخوران حداقل یک متغیّر حالت و یک متغیّر نرخ دارد. در این حلقه بازخوران متغیّر جمعیت بخوبی دارای شرایط متغیّر حالت است. چون بیانگر «وضعیت» یا «حالت» سیستم در هر لحظه از زمان است و آنچه که موجب پویایی و تغییر حالت می‌گردد خالص زاد و ولد است بنابراین خالص زاد و ولد متغیّر نرخ خواهد بود.

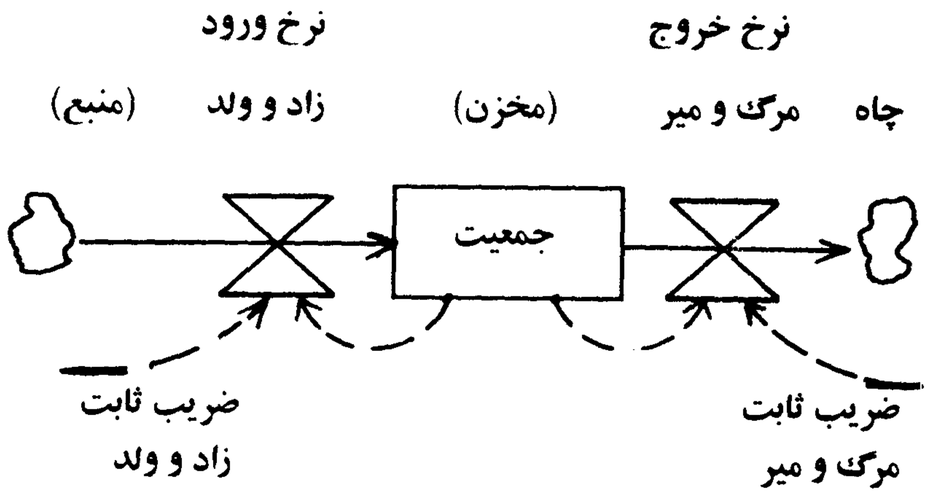


نمودار شماره ۹- جریان رابطه جمعیت و خالص زاد و ولد (در صورت افزودنی زاد و ولد بر مرگ و میر، متغیّر نرخ، موجب کاهش متغیّر حالت شده و علامت منبع به علامت چاه تبدیل می‌گردد).

در صورت تفکیک زاد و ولد از مرگ و میر، مدل به صورت زیر در خواهد آمد:



نمودار شماره ۱۰- علت و معلولی رابطه جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر



نمودارشماره ۱۱- جریان رابطهٔ جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر

انشاءا... در گفتارهای بعدی ساختارهای دینامیکی ساده و مدلسازی با نرم افزار DYNAMO به تفصیل بیان خواهد شد.

منابع

1- Richardson, George P. & Alexander L.Pugh III Introduction to system dynamics modeling with DYNAMO, MIT press, 1981.

2- Good man, Michael R. study notes in System Dynamics, wright-Allen press, 1974.

۳- دکتر علی رضائیان، «مکانیزم تداوم حیات سازمانها در پویاپی محیط»، دانش مدیریت، نشریه دانشکده علوم اداری و مدیریت بازرگانی، شماره ۸، بهار ۱۳۶۹.

۴- دکتر حسن میرزایی اهرنجانی، «سایبرنتیک در مدیریت»، دانش مدیریت، شماره ۱ و ۲، ۱۳۶۷.