نگاهی بر: پویایی سیستم‌ها (۲)

حمیدرضا فرتوک زاده

در قسمت اوّل این مقاله که در شماره ۱۷ فصلنامه علمی و پژوهشی دانش مدیریت به چاپ رسید در ذکر مبانی نظری و شالوده فکری مطالعات پویایی سیستم، گفته شد دانشمندان این رشته معتقدند که پویایی و تحول پدیده‌ها، قانونمند است و روشهای مطالعه پویایی سیستم‌ها برای شناخت این قانونمندیها ابداع شده است. تبیین پویایی پدیده‌ها، از طریق تئوری ساختار سیستمها انجام می‌شود. بر اساس این تئوری، پویایی سیستمها را می‌توان با یک الگوی سلسله مراتبی چهارگانه تبیین کرد:

۱ - مرز بسته

۲ - حلقه‌های بازخوران

۳ - متغیرهای سطح یا حالت

۴ - متغیرهای نرخ

مرز بسته در برگیرندهٔ مجموعه متغیرهایی است که برایند تعامل و تأثیرات متقابل آنهاست و به پویایی مورد نظر منجر می‌شود. اما این متغیرها زمانی با یکدیگر تعامل و کنش متقابل خواهند داشت که در حلقه‌های بازخوران قرار بگیرند. پس هر مرز بسته از تعدادی دایره بازخوران تشکیل می‌گردد. حلقه‌های بازخوران به عنوان سنگ بنای پویایی سیستم تلقی می‌شوند. (FeedBack Loop as Building Blocks of System Dynamics).[1] برای تشکیل حلقه بازخوران حداقل یک متغیر حالت و یک متغیر نرخ لازم است. متغیر حالت، وضعیت سیستم را در هر نقطه از زمان نشان می‌دهد و برای تعریف آن به گذشت زمان نیاز نیست. متغیر نرخ از طریق نمایش تغییرات حاصل در متغیر حالت، بیانگر فعالیت سیستم است. از دیدگاه ریاضی، متغیر حالت مشابه مفهوم انتگرال و متغیر نرخ همانند مفهوم مشتق است. گفته شد که روشهای مطالعه پویایی سیستم، نه تنها قانونمندیهای حاکم بر تحولات پدیده‌ها را می‌شناسد، بلکه با ابزار شبیه‌سازی (Simulation) امکان ساختن مدلی از پدیده‌های واقعی را فراهم می‌آورد که تا اندازهٔ زیادی دارای ویژگیهای پدیده در عالم واقع است.

ویژگیهای مسایلی که در مطالعات پویایی سیستم بررسی می‌شوند:

استفاده از روشهای پویایی سیستم، موکول به رویارویی با یک مسأله است. البته نه هر مسأله‌ای، بلکه مسایل مورد بررسی در مطالعات پویایی سیستم باید حداقل دارای دو ویژگی باشند:

۱ - پویایی

۲ - بازخوران

۱ - پویایی: منظور از پویایی مسأله این است که می‌توان آن را بر حسب مقادیر متغیر در طول زمان تعریف کرد؛ مثلاً رشد «تعداد» تقاضاهای استعفا در یک سازمان، کاهش «تعداد» کالای مورد تقاضای مشتریان، نوسان مقدار ذخایر موجودی انبار، افزایش نرخ تورم، افزایش تعداد شکایات، افزایش تعداد تخلفات یا درگیری بین کارکنان، افزایش استهلاک ماشین آلات یک کارخانه و ....

۲ - بازخوران: شرط دوم برای اینکه یک مسأله را بتوان با این روش بررسی کرد، وجود حلقه‌های بازخوران است. پس مطالعات پویایی سیستم، قادر به تبیین هر نوع پویایی نیستند، بلکه آن نوع از پویایی که از حلقه‌های بازخوران ناشی می‌شود، در این

مطالعات تحت بررسی قرار می‌گیرند.

شاید خواننده تیزبین در اینجا نوعی تناقض را در ادعا احساس کند، از سویی، نظریه ساختار سیستمها، هر نوع پویایی و تحول را به حلقه‌های بازخوران نسبت می‌دهد[۲] و از سوی دیگر خود به بروز پویایی بدون بازخوران قائل است. باید اذعان داشت که مطالعات پویایی سیستم قادر به تبیین همه انواع پویایی و تحول در عالم نیستند بلکه آن نوع از پویایی که ریشه در درون پدیده داشته باشد و از تعامل مداوم و پیوسته متغیرها حاصل شده، در طول زمان از شکل خاصی پیروی کند، موضوع این مطالعات خواهد بود. این شکل خاص رفتار متغیر می‌تواند هر یک از شکلهای شماره ۱ تا ۶ یا ترکیبی از آنها باشد:

مراحل انجام یک مطالعه پویایی سیستم:

بطور کلی می‌توان گفت هر مطالعه پویایی سیتم دارای سه مرحله اساسی است:

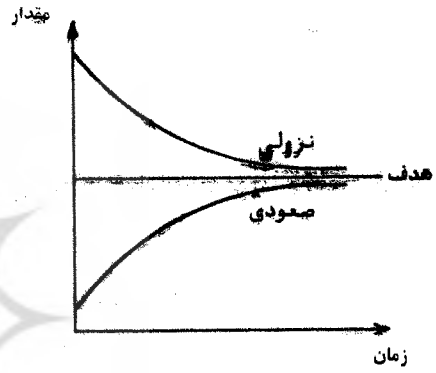
۱- مرحله مفهومی Conceptual Phase

۲- مرحله مقداری Quantitative Phase

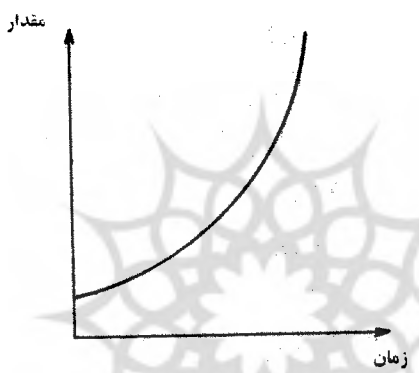
۳- مرحله تجزیه و تحلیل و ارزیابی Analysis & Evaluation Phase

۱- مرحله مفهومی

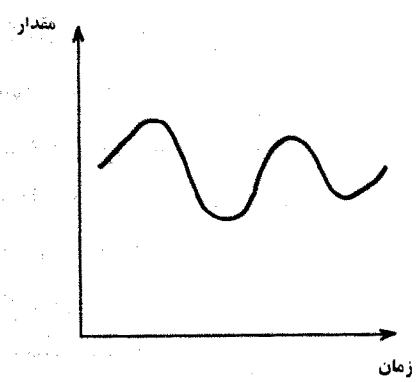
مدلساز در این مرحله زمینه‌ها و نشانه‌های مسأله را تبیین و رفتار متغیرهای اصلی را ترسیم می‌کند، همچنین هدف مدلسازی را



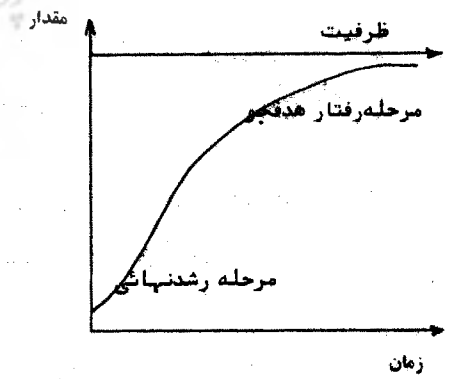
شکل شماره ۱- رفتارهای هدف‌جو Asymptotic



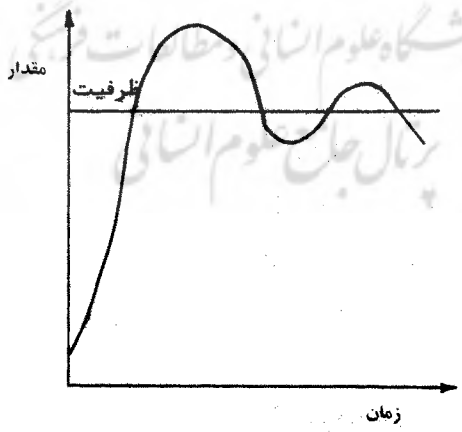
شکل شماره ۲- رشد نمایی Exponential Growth



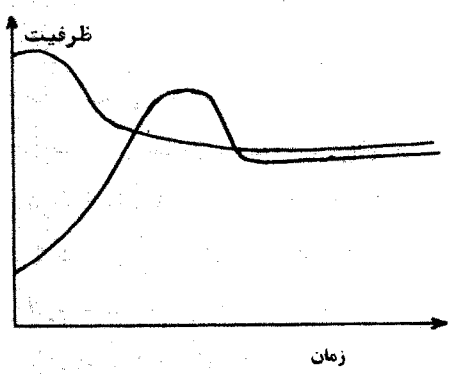
شکل شماره ۳- رفتار نوسانی Oscillation



شکل شماره ۴- رفتار S شکل Sigmoidal



رفتار فوران و نوسان (Overshoot & Oscillation)



رفتار فوران و کاهش (Overshoot & Decline)

روشن می‌سازد، مرز بسته را ترسیم کرده و تصویری از ساختار سیستم به وسیله دوایر بازخوران ارائه می‌نماید. محصول مرحله مفهومی مدلسازی، اسکلت و چارچوب کلی مدل است که در قالب یک فرضیه دینامیکی (Dynamic Hypothesis) ساده ارائه می‌شود. بطور خلاصه می‌توان گامهای مرحله مفهومی مدلسازی دینامیکی را چنین بیان کرد.[۳]

شناسایی مسأله: ارائه یک تعریف واضح از مسأله، بیان زمینه اصلی (Context) و نشانه‌های آن (Symptoms)، و تعریف مسأله به شکل پویا بر حسب رفتار متغیر اصلی آن. رفتار متغیر اصلی را می‌توان در سه حالت مختلف بررسی کرد: رفتار فعلی، رفتار مطلوب (برای آینده) و رفتاری که در گذشته بر اثر اعمال سیاستهای مختلف مشاهده شده است.

نمودار شماره هفت جمعیت یک کشور فرضی را در سه حالت مزبور نشان می‌دهد.

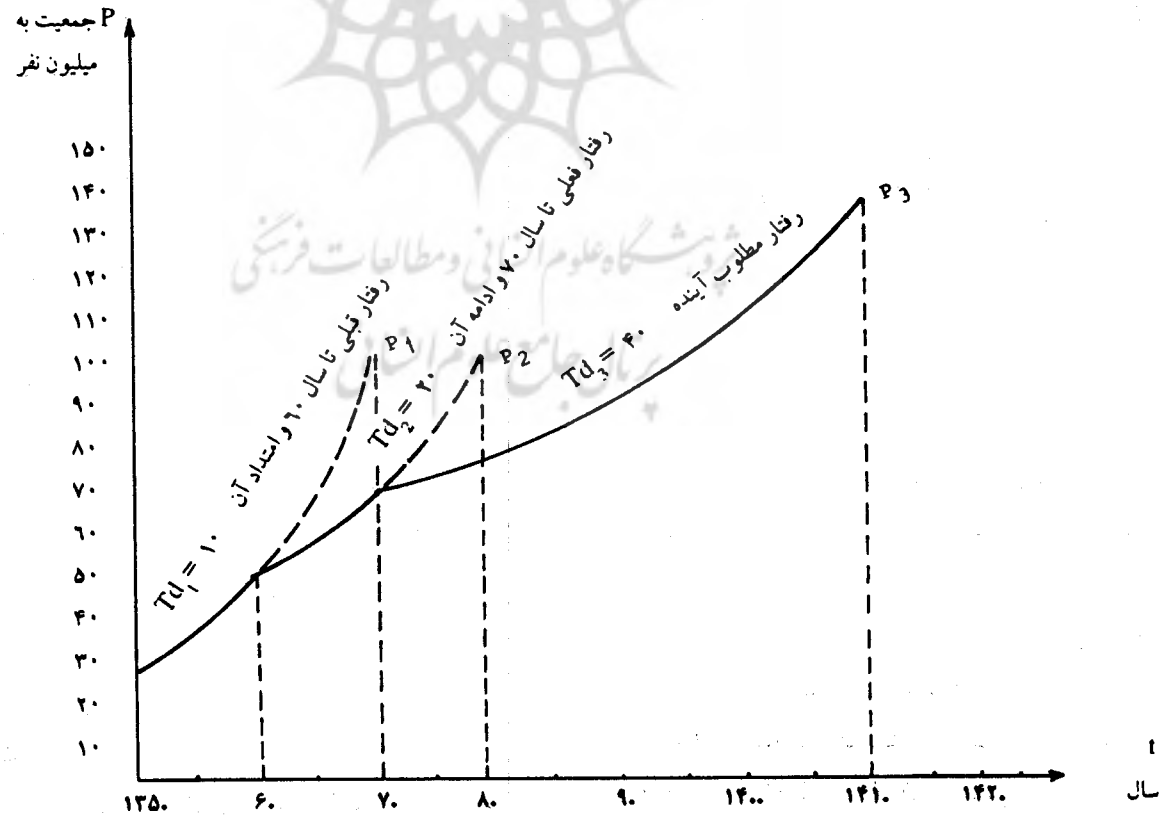
منحنی P_1 بیانگر آن است که رشد جمعیت تا سال ۶۰ طوری بوده که هر ده سال یکبار، جمعیت دو برابر می‌شده

زمان دو برابر شدن Doubling Time, $Td_1 = 10$

و در صورت ادامه همان روند تا سال ۷۰ جمعیت به یکصد میلیون نفر بالغ می‌گردیده است. امّا از سال ۶۰ با اعمال سیاستهایی، نرخ رشد جمعیت کاهش یافته و زمان دو برابر شدن آن به بیست سال افزایش یافته است ($Td_2=20$). منحنی P_2 که نتیجه اعمال سیاستها را تا سال ۷۰ نشان میدهد، بر همین اساس برای ده سال بعد نیز ترسیم گردیده است. منحنی P_2 رفتار متغیر اصلی مسأله در شرایط موجود تلقی می‌شود. اما منحنی P_3 رفتار مطلوب متغیر اصلی است که زمان دو برابر شدن جمعیت را تا چهل سال افزایش داده است. ($Td_3=40$)

هدف مدلسازی

شناخت مخاطبان و کسانی که مطالعه پویایی سیستم برای آنها صورت می‌گیرد، سیاستهایی که اعمال آنها مورد نظر است و از همه مهمتر چگونگی کاربرد و اجرای نتایج حاصل از مدلسازی عوامل اصلی در تعیین هدف می‌باشند. هدف از مدلسازی می‌تواند آموزش و افزایش بصیرت نسبت به مسأله باشد، یا در مرحله‌ای بالاتر، اعمال سیاستهای پیشنهادی مدلساز مد نظر قرار بگیرد و در آخرین مرحله استفاده از مدل به عنوان یک ابزار آزمایشگاهی، که همراه با سیستم اصلی در عالم واقع، به حیات



خود ادامه دهد. کاربرد نوع سوم مستلزم به روز نگاهداشتن مدل در طول زمان و منظور نمودن تحولات مختلف در آن است و معمولاً کمتر انجام می‌شود.

تعیین مرز بسته

مرز بسته اجزایی از ساختار سیستم را در بر دارد که برای تولید رفتار مورد نظر ضروری باشند. مرز بسته تا آنجا ادامه می‌یابد که دوایر بازخوران مؤثر در رفتار سیستم همگی بسته شوند. مرز بسته باید نقاط اعمال سیاستهای پیشنهادی و نیز متغیرهای لازم را برای ارزیابی آن سیاستها در بر داشته باشد. اجزایی که در بروز مسأله دخالت ندارند باید از مرز بسته خارج شوند. (همچنان که گفته شد مطالعات پویایی سیستم، مسأله گرا هستند نه سیستم‌گرا).

ساختار بازخوران

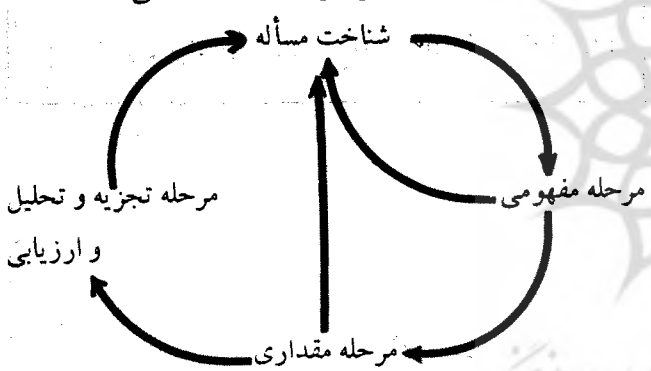
شناسایی دوایر بازخوران در مرحله مفهومی مدلسازی آغاز می‌شود، اما تبیین آن در مرحله مقداری به انجام می‌رسد. همچنان که در مبانی نظری مطالعات پویایی سیستم ذکر شد، ساختار پویایی سیستم، از تعدادی حلقهٔ بازخوران تشکیل می‌گردد. در مرحله مفهومی، با استفاده از نمودارهای علت و معلولی (Causal Loop Diagrams)، الگوی ساده‌ای برای تبیین پویایی پدیده در قالب حلقه‌های بازخوران (Feedback Loops) ارائه می‌شود. یک یا چند حلقه بازخوران مرتبط با یکدیگر که برایند تأثیرات متقابل متغیرهای تشکیل دهنده آنها، منجر به رفتار مورد نظر (Problem Behavior) شود و یا سهم عمده‌ای در بروز آن رفتار داشته باشد، فرضیه دینامیکی (Dynamic Hypothesis) نامیده می‌شود. مدلساز در مرحله مفهومی، تصویر مبهمی از فرضیه دینامیکی ارائه می‌دهد که در مراحل بعدی به تدریج کاملتر خواهد شد. گذر از مرحله مفهومی به مرحله مقداری از طریق نمودار جریان (Flow Diagram) انجام می‌شود. در نمودار، جریان هر یک از اجزا و فرایندهای مدل با علامت خاصی نشان داده می‌شود.

۲- مرحله مقداری

اسکلت و چارچوب کلی مدل که در مرحله مفهومی ترسیم شده بود، در مرحله مقداری، به شکل واقعی پدیده نزدیکتر می‌شود. با تعیین نوع و مقادیر هر یک از متغیرها و پارامترهای مسأله، مدلساز آماده می‌شود تا مدل را با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی DYNAMO به اجرا در آورد. اصطلاح DYNAMO از دو واژهٔ «مدلهای پویا» اتخاذ شده است (DYNamic MOdels). با این زبان کامپیوتری می‌توان رفتار پویای سیستمهای دنیای واقعی را در یک آزمایشگاه کامپیوتری، مورد مداقه و پیگیری قرار داد.[۴]

۳- مرحله تجزیه و تحلیل و ارزیابی

مدلسازی دینامیکی، یک فرایند مکرر است.[۵] هر فرضیه دینامیکی پس از طی مرحله مقداری و اجرای کامپیوتری، مجدداً به مرحله مفهومی بر می‌گردد و در بوته آزمایش و ارزیابی مجدد، پخته‌تر و صافی‌تر می‌شود. در هر بار تکرار، آگاهی مدلساز نسبت به مسأله بیشتر می‌گردد. در واقع مطالعات پویایی سیستم با شناخت اولیه آغاز شده و با شناخت بیشتر ادامه می‌یابد. هر یک از مراحل مدلسازی به افزایش این شناخت کمک می‌کنند.



نمودار شماره ۸- ارتباط متقابل مراحل مدلسازی

نمودارهای علت و معلولی (Causal Diagramming)

اینک که اهمیت تشخیص دوایر بازخوران در مطالعات پویایی یا سیستم تا حدودی روشن شد، به ارائه یک روش عملی برای شناسایی دوایر بازخوران می‌پردازیم. نمودارهای علت و معلولی در مطالعات پویایی سیستم نقش اساسی دارند. اهمیت این نمودارها به اندازه‌ای است که دوایر علت و معلولی (Causal Loop) تقریباً مترادف با دوایر بازخوران (Feed Back Loop) بکار می‌رود. در مراحل اولیه

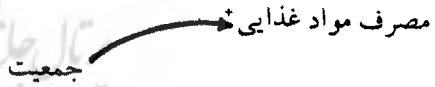
مدلسازی در یک مطالعه پویایی سیستم، نمودارهای علت و معلولی در تعریف اجزای اصلی مسأله و سازماندهی آنها در یک چارچوب منسجم و شناسایی حلقه‌های بازخوران تأثیر بسزایی دارند. پس از تعیین متغیرهای اساسی یک مسأله و مشخص شدن رفتار متغیر اصلی در طول زمان، ارتباط و تأثیر متقابل بین متغیرهای مزبور از طریق روابط علت و معلولی پیگیری می‌شوند. اتصالات و روابط علت و معلولی باید به قدری پیگیری شوند که زنجیره اثرات علت و معلولی به صورت یک دایره در یک جهت بسته شود. نحوه نمایش اتصالات علت و معلولی به شرح زیر است:[6]

اگر متغیر A بر متغیر B اثر بگذارد

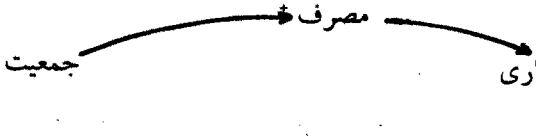
اگر متغیر A به B اضافه شود یا اینکه هر تغییر در A منجر به تغییری در همان جهت در B بشود، اتصال علت و معلولی بین A و B (A→B)مثبت خواهد بود.

اگر متغیر A از B کسر شود یا تغییر در A منجر به تغییری در خلاف جهت در B بشود، اتصال علت و معلولی بین A و B (A→B) منفی خواهد بود.

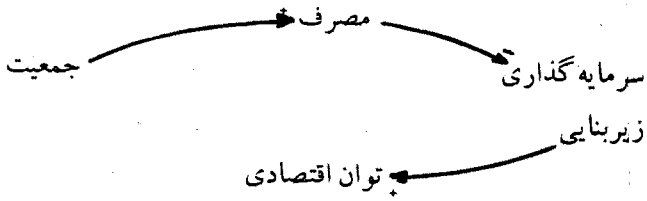
مثال: افزایش جمعیت موجب افزایش مصرف مواد غذایی می‌شود.



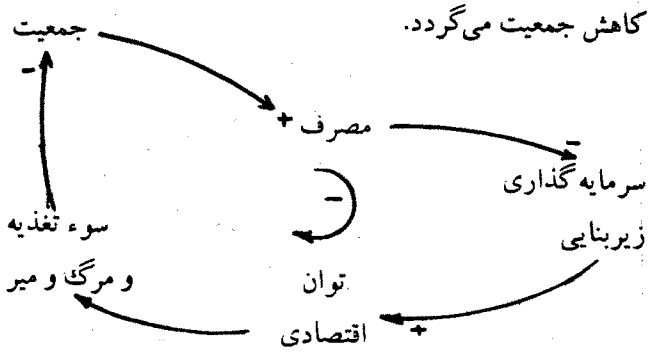
افزایش مصرف، موجب کاهش سرمایه گذاری زیربنایی می‌شود.



کاهش سرمایه گذاری زیربنایی موجب کاهش توان اقتصادی در دراز مدت می‌شود.



کاهش توان اقتصادی موجب مرگ و میر و مرگ و میر موجب کاهش جمعیت می‌گردد.



با بسته شدن مدار اتصالات علت و معلولی در یک جهت نمودار حاصل دایره علت و معلولی (Causal Loop) نامیده می‌شود. دایره علت و معلولی، اگر چه جزئیات لازم را برای مدلسازی ندارد،[7] اما چون بیانگر وجود یک حلقه بازخوران بین متغیرهای تشکیل دهنده پدیده پویاست، در حکم سنگ بنای پویایی سیستم تلقی می‌شود. همچنان که گفته شد دوایر علت و معلولی و حلقه‌های بازخوران در مدلسازی دینامیکی مترادف هم بکار می‌روند.

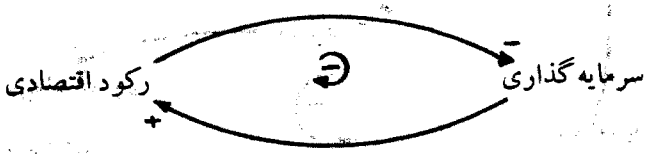
توجه به این نکته بسیار لازم و ضروری است که ملاک تعیین علامت یک اتصال علت و معلولی، هم جهت بودن تغییرات دو متغیر یا ناهم جهت بودن آن است. معمولاً این تمایل وجود دارد که افزایش را با علامت (+) و کاهش را با علامت منفی (-) نشان دهند. در حالی که لزوماً چنین نیست؛ در مثالی که گذشت، دیده می‌شود که کاهش سرمایه گذاری موجب کاهش توان اقتصادی می‌شود، اما اتصال بین این دو متغیر «+» است چون هر دو با هم کاهش می‌یابند، و در واقع تغییرات هم جهت دارند.

علامت دایره علت و معلولی (حلقه بازخوران)

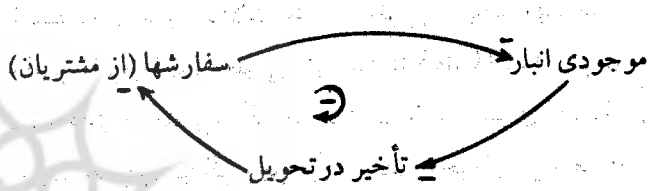
با قدری دقت در مثال فوق، ملاحظه می‌شود که در دایره بازخوران مزبور، در نهایت اثرات ناشی از افزایش جمعیت به کاهش جمعیت منجر می‌شود. بنابر این می‌توان گفت که علامت

دایره بازخوران منفی است، اما روش آسانتری هم برای تعیین علامت دایره بازخوران وجود دارد، چنانچه تعداد اتصالات با علامتهای منفی در یک دایره بازخوران زوج باشد، علامت دایره بازخوران مثبت و در غیر این صورت منفی است. به عبارت دیگر، علامت دایره بازخوران از حاصل ضرب علامات اتصالات تشکیل دهنده آن دایره به دست می‌آید.

مثال ۱ - رکود اقتصادی موجب کاهش سرمایه گذاری می‌شود. کاهش سرمایه گذاری متقابلاً باعث افزایش رکود می‌شود.

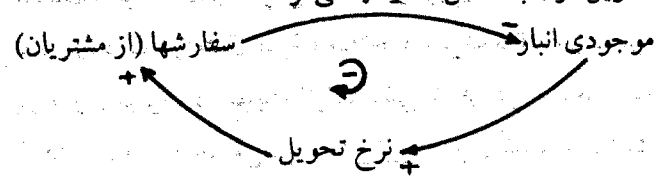


مثال ۲ - سفارشها، موجب کاهش موجودی انبار می‌شود. کاهش موجودی انبار موجب افزایش تأخیر در تحویل می‌گردد. افزایش تأخیر در تحویل موجب کاهش سفارشها می‌شود.



در دو مثال فوق تفاوت بین بازخوران مثبت و بازخوران منفی بخوبی مشخص است. اگرچه تمام اتصالات علت و معلولی در هر دو دایره منفی است، اما در یکی زوج و در دیگری فرد است. بنابر این در مثال اول بازخوران مثبت است یعنی در صورت عدم مداخله عامل خارجی دور شوم (Vicious Circle) بین رکود و کاهش سرمایه گذاری همواره تشدید خواهد شد. در مثال دوم، بازخوران منفی است یعنی در صورت عدم مداخله عامل خارجی، در دراز مدت تمام متغیرها به سمت صفر میل خواهند کرد. به منظور نمایش ماهیت بازخوران منفی، مثال (۲) فوق به شکل دیگری ارائه می‌شود.

سفارشها موجب کاهش موجودی انبار می‌شود. کاهش موجودی انبار موجب کاهش نرخ تحویل می‌گردد. کاهش نرخ تحویل موجب کاهش سفارشها می‌گردد.



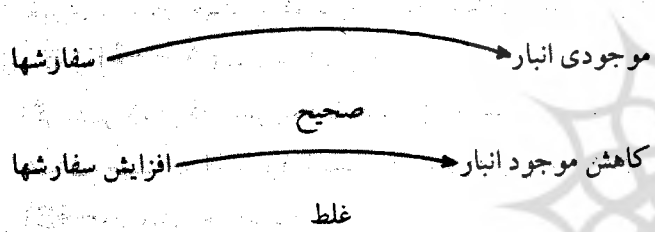
در این حالت اگر چه با تغییر در یک متغیر دو اتصال منفی به مثبت تبدیل شده‌اند اما چون ماهیت مسأله تغییر نکرده است بنابر این علامت دایره بازخوران همچنان منفی باقی خواهد ماند. (در هر دو دایره، تعداد اتصالات منفی فرد است)

چند یادآوری درباره ترسیم دوایر علت و معلولی

سادگی ظاهری نمودارهای علت و معلولی ممکن است تا اندازه‌ای غلط انداز باشد و به استنتاجات نادرستی منجر گردد. یادآوریهای زیر تا اندازه‌ای مدلساز را از ارتکاب خطا باز می‌دارند:

۱ - متغیرهای تشکیل دهنده نمودار علت و معلولی را به صورت «مقادیر» تصور کنید. مقادیری که در طول زمان می‌توانند کم یا زیاد شوند. حتی اگر نتوانستید واحدی برای اندازه گیری مقادیر تعیین کنید، باز هم مهم نیست.

- در ترسیم نمودار علت و معلولی از «اسم» یا «عبارات اسمی» استفاده کنید نه از فعل. مثلاً:



- متغیرها را طوری انتخاب کنید که افزایش یا کاهش آنها، واضح باشد. مثلاً:

تعداد تخلفات	گرایش به تخلفات
صحیح	غلط

- اتصالات علت و معلولی هرگز نباید به معنای «و سپس ...» بکار روند.

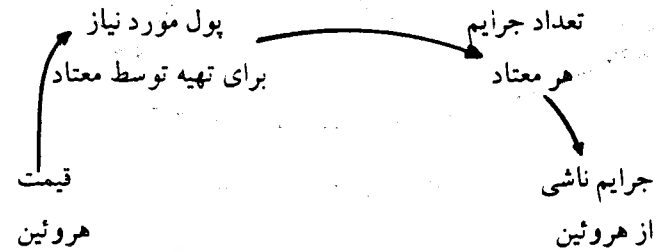
۲ - در صورت امکان واحد اندازه گیری متغیرهای تشکیل دهنده نمودار علت و معلولی را تعیین کنید. در موارد لزوم می‌توانید از واحدهای خود ساخته، استفاده کنید مثلاً «واحد سنجش فشار عصبی» یا «واحد اثر تشویق بر کارایی». این واحدهای ساختگی به تمرکز بیشتر بر مفهوم یک عبارت کمک می‌کنند.

۳- حتی‌المقدور بیشتر متغیرها را با محتوای مثبت در نظر بگیرید تا در تعیین علامت اتصالات و دایره بازخوران دچار مشکل نشوید.

۴- چنانچه یک اتصال علت و معلولی به توضیح نیاز دارد، آن را تفکیک کنید؛ مثلاً اتصال زیر بهتر است به چند اتصال متوالی تقسیم گردد:

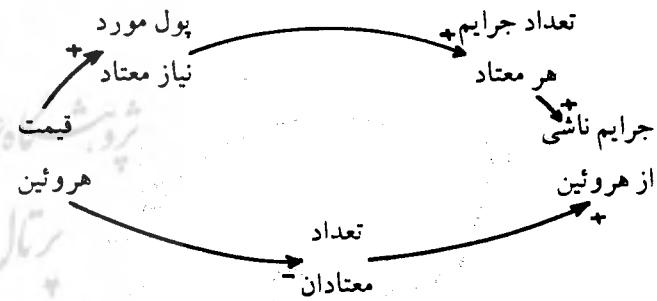
جرایم ناشی از هروئین ← قیمت هروئین

مبهم



با توضیحات بیشتر

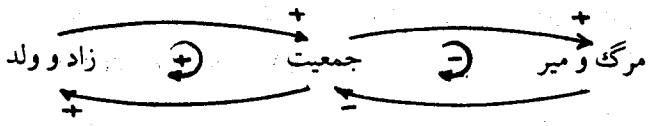
البته مثال فوق صرفاً یک فرضیه است و می‌توان آن را با یک زنجیره اتصالات دیگر تکمیل کرد؛ یعنی افزایش قیمت هروئین از سوی دیگر باعث کاهش معتادان و کاهش معتادان هم موجب کاهش جرائم ناشی از هروئین می‌گردد.



۵- توجه داشته باشید که دایره بازخوران زمانی تشکیل می‌شود که زنجیره اتصالات علت و معلولی به عامل اولیه باز گردد، بنابر این دایره مثال فوق، دایره بازخوران نیست.

اینک چند مثال ساده از نمودارهای علت و معلولی ارائه می‌شود؛ در این مثالها سادگی و سهولت در ارائه موضوع مد نظر بوده و به همین دلیل حداقل متغیرها و پارامترها برای تبیین رفتار مورد نظر بکار رفته است. در صورت لزوم می‌توان زنجیره علل و معلولات را برای ریشه‌یابی عمیقتر و دقیقتر مسأله ادامه داد:

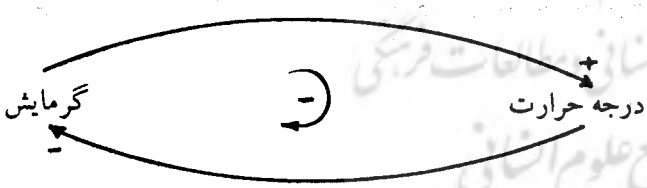
۱- جمعیت: افزایش زاد و ولد باعث افزایش جمعیت می‌شود. متقابلاً افزایش جمعیت سبب افزایش زاد و ولد می‌گردد. از سوی دیگر افزایش جمعیت موجب افزایش مرگ و میر می‌شود و افزایش مرگ و میر باعث کاهش جمعیت.



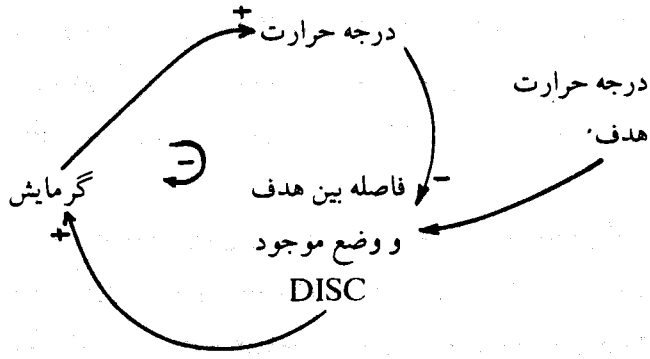
نمودار علت و معلولی رابطه جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر

توضیحات: چون تعداد اتصالات علت و معلولی در ارتباط با جمعیت و زاد و ولد صفر است پس علامت دایره بازخوران آنها مثبت خواهد بود. امّا در رابطه علت و معلولی بین جمعیت و مرگ و میر یک اتصال منفی وجود دارد بنابر این علامت دایره بازخوران از حاصل ضرب منفی در مثبت به دست آمده، منفی خواهد بود.

۲- ترموستات: افزایش گرمایش موجب افزایش درجه حرارت می‌شود. افزایش درجه حرارت موجب کاهش گرمایش می‌گردد.



توضیحات: دایره علت و معلولی حاوی یک اتصال منفی بوده، علامت آن منفی است. اما به نظر می‌رسد که این نمودار برای تبیین کامل رفتار ترموستات باید عنصر «هدف» را در بر داشته باشد. هر ترموستات برای هدف مشخص تنظیم می‌شود. بنابر این گرمایش برای کم کردن فاصله بین هدف و وضع موجود (Discrepancy) صورت می‌پذیرد و در صورت نبودن فاصله، گرمایش متوقف خواهد شد. بدین ترتیب می‌توان ساختار زیر را برای تبیین رفتار ترموستات ارائه کرد:

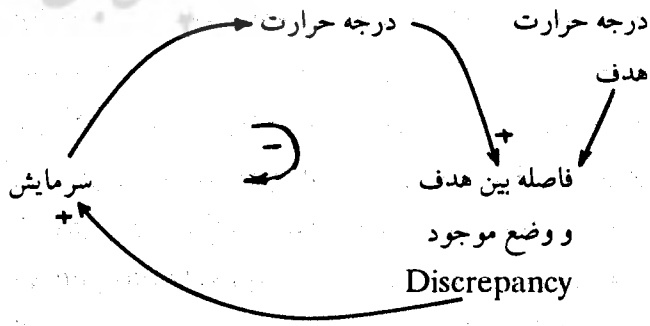


نمودار علت و معلولی ترموستات (هدف بالاتر از درجه حرارت موجود)

نمودار فوق را می‌توان با جملات زیر توصیف کرد (Verbal Description):

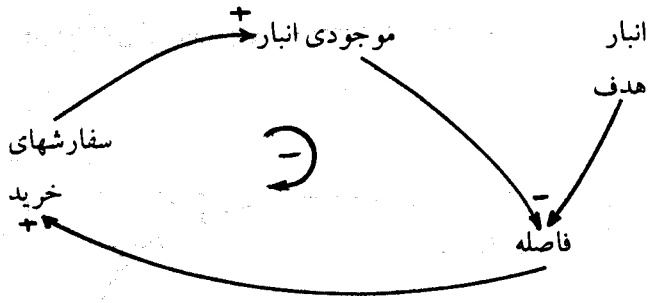
افزایش گرمایش موجب افزایش درجه حرارت می‌شود. افزایش درجه حرارت موجب کاهش فاصله بین هدف و وضع موجود می‌شود. کاهش فاصله سبب کاهش گرمایش می‌شود. در نتیجه تعداد اتصالات منفی در دایره علت و معلولی فرد بوده و علامت آن منفی خواهد بود.

در اینجا توجه به دو نکته ضروری است. اول اینکه این مدل بیانگر رفتار دستگاهی است که گرمایش آن تابعی از فاصله بین هدف و وضع موجود باشد چون در صورت ثابت بودن میزان گرمایش اتصال بین فاصله و گرمایش پیوسته نخواهد بود. نکته دوم اینکه این مدل حاکی از سیستمی است که میزان درجه حرارت هدف آن بیش از درجه حرارت وضعیت سیستم باشد. البته در صورتی که هدف پایین‌تر از وضعیت فعلی باشد، ساختار کلی مدل تغییر نمی‌کند بلکه علامت دو اتصال جابجا خواهد شد؛ به شرح زیر:



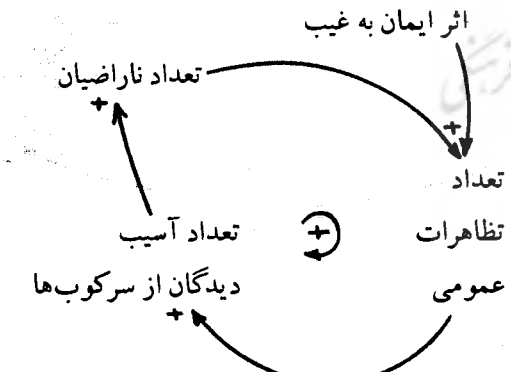
نمودار علت و معلولی ترموستات (هدف پایین‌تر از درجه حرارت موجود)

۳- تنظیم موجودی انبار: سفارشهای خرید موجب افزایش موجودی انبار می‌شود. افزایش موجودی انبار موجب کاهش فاصله بین انبار موجود و انبار مطلوب، و کاهش فاصله سبب کاهش سفارشهای خرید می‌گردد. از سوی دیگر فروش موجب کاهش موجودی انبار می‌شود.



نمودار علت و معلولی موجودی انبار

۴- رشد عدم رضایت عمومی در جامعه ایران در اواخر عمر رژیم شاه: افزایش عدم رضایت عمومی به همراه روحیه شهادت طلبی ناشی از ایمان و رهبری امام راحل موجب افزایش جسارت عمومی و در نتیجه، تظاهرات عمومی بر ضد رژیم شاه می‌گردید. افزایش تظاهرات عمومی سبب افزایش سرکوب خشونت بار توسط عمال رژیم می‌شد. افزایش سرکوب خشونت بار موجبات افزایش عدم رضایت عمومی را فراهم می‌آورد:

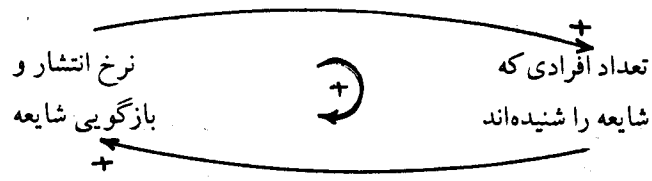


نمودار علت و معلولی رشد عدم رضایت عمومی در اواخر عمر رژیم شاه

۵- رشد شایعه: اگر هر کس که شایعه را بشنود به چند نفر دیگر بگوید و آنها هم به نوبه خود چنین روشی را در پیش بگیرند، در مدت کوتاهی میلیونها نفر شایعه را خواهند شنید. هر چه تعداد

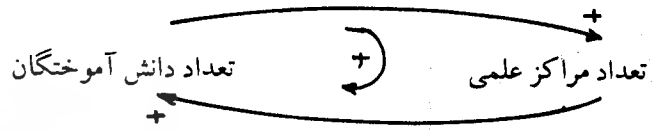
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

افرادی که یک شایعه را شنیده‌اند بیشتر شود، نرخ انتشار و بازگویی شایعه بیشتر خواهد شد؛ متقابلاً افزایش نرخ بازگویی و انتشار شایعه موجب افزایش تعداد افرادی که شنیده‌اند، می‌گردد.

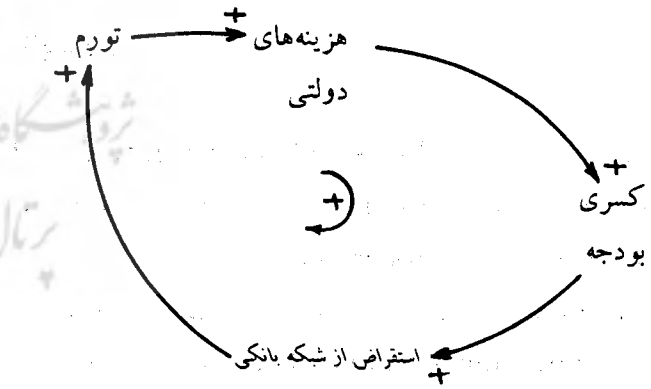


نمودار علت و معلولی رشد شایعه

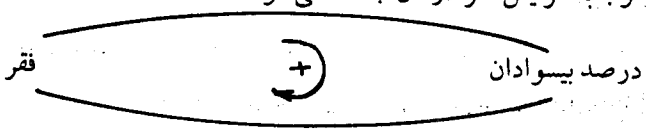
۶- ارتباط متقابل بین تعداد دانش آموختگان و تعداد مراکز علمی: هر چه تعداد مراکز علمی بیشتر باشد، تعداد دانش آموختگان بیشتر می‌شود. افزایش تعداد دانش آموختگان به نوبه خود سبب افزایش تعداد مراکز علمی خواهد شد.



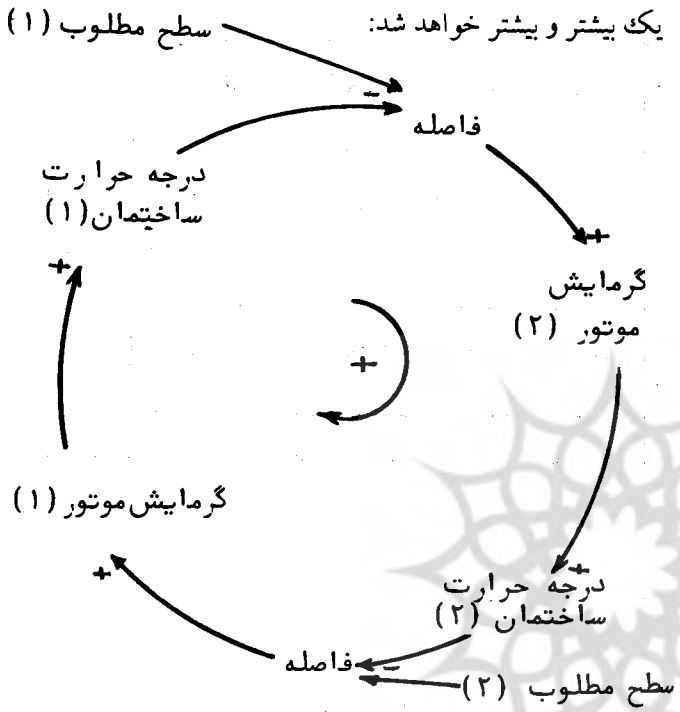
۷- ارتباط متقابل بین تورم، کسر بودجه و استقراض از شبکه بانکی: تورم موجب افزایش هزینه‌ها و بروز کسری بودجه می‌شود. کسری بودجه دولت را به افزایش استقراض از شبکه بانکی مجبور می‌کند. افزایش استقراض از شبکه بانکی سبب افزایش تورم می‌گردد.



۸- ارتباط متقابل فقر و بیسوادی: هر چه جامعه‌ای فقیرتر باشد میزان بیسوادی در آن بیشتر خواهد بود و افزایش تعداد بیسوادان موجب افزایش فقر در آن جامعه می‌شود.



۹- سیستم حرارتی دو ساختمان که کلیدهای تنظیم حرارت آنها جابجا نصب شده باشد: افزایش درجه حرارت ساختمان شماره یک موجب می‌شود که ساکنان آن، کلید تنظیم حرارت ساختمان شماره دو را کمتر کنند. این اقدام موجب کاهش گرمایش و نتیجتاً کاهش درجه حرارت ساختمان شماره دو می‌شود. با کاهش درجه حرارت ساختمان شماره دو، ساکنان آن کلید تنظیم حرارت موجود در اتاقشان را، که در واقع سیستم ساختمان شماره یک را کنترل می‌کند، زیادتر خواهند کرد، در نتیجه گرمایش ساختمان شماره یک بیشتر و بیشتر خواهد شد:



توضیح در مورد بیان ریاضی متغیرهای نرخ و حالت

مقایسه مفاهیم نرخ و حالت با مشتق و انتگرال همواره به معنی مطابقت آنها نیست. بلکه منظور این است که رابطه نرخ و حالت به رابطه مشتق و انتگرال شباهت دارد. تنها در مواردی که مشتق و انتگرال با یکدیگر حلقه بازخوران تشکیل بدهند، این مطابقت حاصل خواهد شد؛ مثلاً اگر رابطه ریاضی ذیل، بیانگر رشد جمعیت یک کشور باشد:

رابطه ریاضی رشد جمعیت	$P = P_0 * e^{BC*t}$
مقدار اولیه جمعیت = P_0	جمعیت = P
ضریب ثابت خالص زاد و ولد = BC	e ۲/۷۱۸
زمان = t	

با مشتق‌گیری از رابطه ریاضی رشد جمعیت داریم:

$$\frac{dp}{dt} = BC*P_0*e^{BC*t}$$

$$\frac{dp}{dt} = BC*P$$

اما از دیدگاه دینامیکی می‌توان مشتق حاصل را با رابطه نرخ زاد و ولد برابر دانست:

$BR = BC*P$ ← رابطه دینامیکی متغیر نرخ

با مقایسه دو رابطه فوق مشاهده می‌شود که طرف راست هر دو تساوی برابر است:

متغیر نرخ $\frac{dP}{dt} = BR$ مشتق جمعیت

متقابلاً با انتگرال‌گیری از متغیر نرخ می‌توان متغیر حالت را به دست آورد:

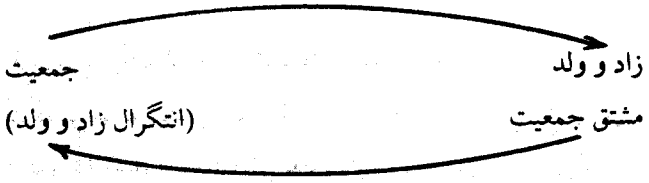
$$\int BR\,dt = \int BC*P_0*e^{BC*t}\,dt$$

$$= \frac{1}{BC}*BC*P_0*e^{BC*t}+C$$
$$= P_0\,e^{BC*t}$$

چون در فرض مسأله جمعیت فاقد جزء ثابت است پس $C=0$ از مقایسه تساوی فوق با معادله ریاضی رشد جمعیت ملاحظه می‌شود که طرف راست هر دو تساوی برابر است:

متغیر حالت $P = \int BR\,dt$ انتگرال زاد و ولد

نتایج حاصل از مقایسه روابط فوق را می‌توان از نظرگاه دینامیکی با استفاده از نمودارهای علت و معلولی اینگونه بیان کرد:



بیان دینامیکی رابطه جمعیت و زاد و ولد (دایره بازخوران وجود دارد).

اما در رابطه ریاضی ذیل، اگر چه تشابه با مفاهیم متغیرهای نرخ و حالت وجود دارد ولی بر خلاف مثال بالا، مشتق و انتگرال با یکدیگر دایره بازخوران تشکیل نمی‌دهند:

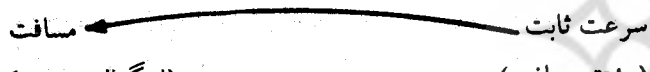
رابطه ریاضی مسافت با سرعت ثابت $D = S*t$

زمان $= t$ سرعت ثابت $= S$ مسافت $= D$

از معادله مسافت مشتق می‌گیریم:

$$\frac{dD}{dt} = S$$

چون S عدد ثابت است، بنابر این نمی‌تواند به عنوان متغیر نرخ در دایره بازخوران قرار بگیرد:



سرعت ثابت و مسافت رابطه یک طرفه دارند و دایره بازخوران ایجاد نمی‌کنند

پانویسها:

1,2-Forrester, Jay, W."Market Growth as Influenced by Capital Investment", Industrial Management Review, Vol. IX, No. 2, Winter 1966, PP. 83-105.

3-Richardson, George, p & Pugh III Alexander L. "Introduction to System dynamics", modeling with DYNAMO the MIT Press, 1969, PP. 62.

4-Ibid, PP. 67.

5-Ibid, PP. 267.

6-Ibid. PP. 25.

7-Goodman Michael R. "Study Notes in System Dynamics", Wright-Allen Press, Inc, 1976, PP. 11.