نگاهی بر:

پویایی سیستم‌ها (۳)

حمیدرضا فرتوک زاده

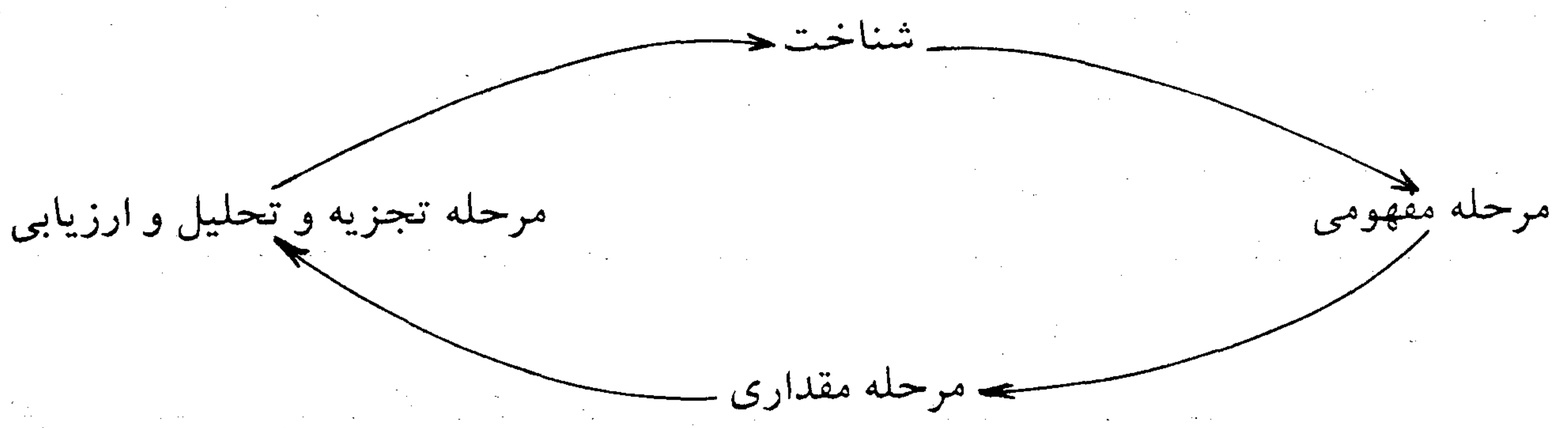
در قسمت قبلی مقاله که در شماره ۱۹ به چاپ رسید گفتیم که فرایند مدلسازی در مطالعات پویایی سیستم، از سه مرحله تشکیل شده است:

۱- مرحله مفهومی (Conceptual Phase)

۲- مرحله مقداری (Quantitative Phase)

۳- مرحله تجزیه و تحلیل و ارزیابی (Evaluation & analysis Phase)

هر یک از این مراحل به افزایش شناخت تحلیلگر منجر می‌گردد. تحلیلگر در مطالعات پویایی سیستم، مدل را مانند یک جعبه دربسته سحرآمیز تلقی نمی‌کند بلکه خود با مدل همراه است و بهره‌ای که از مدل می‌برد، افزایش شناخت و بصیرت نسبت به مسأله است، به گونه‌ای که در پایان مدلسازی، حتی بدون استفاده از مدل هم بتواند از فرضیه دینامیکی حاصل دفاع کند. بنابر این مدلسازی با اجرای کامپیوتری، پایان نمی‌پذیرد بلکه چرخه‌ای است که با هر بار اجرای کامپیوتری موجب افزایش شناخت و بصیرت می‌گردد. تصویر کلان مطالعات پویایی سیستم را می‌توان در یک چرخه نمایش داد:

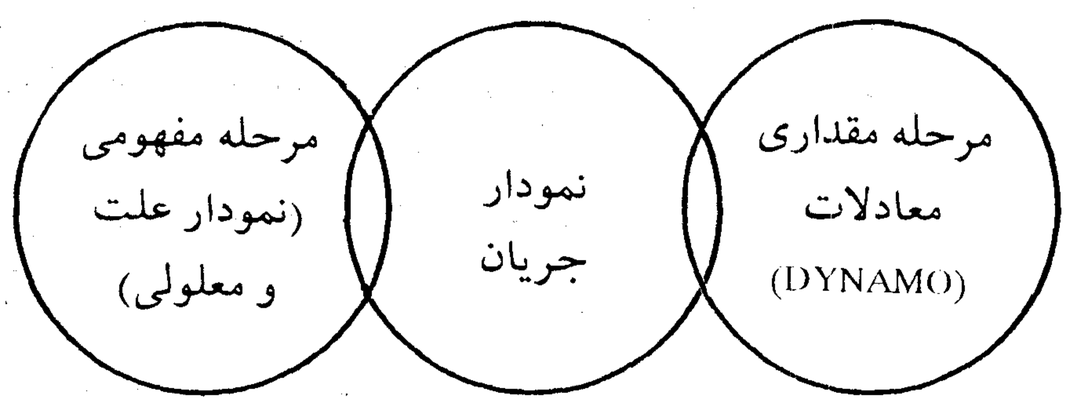


شکل شماره ۱ - چرخه مراحل فرایند مدلسازی در مطالعات پویایی سیستم

محصول مرحله مفهومی، اسکلت و چارچوب کلی مدل است که در قالب یک فرضیه دینامیکی ساده ارائه می‌شود. این فرضیه در مرحله مقداری، دقیقتر و واضحتر می‌گردد و سرانجام با فرموله کردن در قالب معادلات DYNAMO به کامپیوتر سپرده می‌شود. تحلیلگر پس از اجرا توسط کامپیوتر، به تجزیه و تحلیل و ارزیابی مدل می‌پردازد و با افزایش شناخت حاصل از تجزیه و تحلیل، مجدداً به تبیین مفاهیم مسأله (Conceptualization) می‌پردازد. فرضیه دینامیکی پس از هر بار گذر از بوته آزمایش مراحل سه گانه مزبور، محکمتر، دقیقتر و صافی‌تر می‌گردد تا آنجا که تحلیلگر احساس کند که فرضیه آزمون شده از کفایت و کارآیی لازم برخوردار است.

گفته شد که سنگ بنای پویایی سیستم، دوایر بازخوران است. نمودارهای علت و معلولی (Causal Diagrams) به عنوان روش ساده‌ای برای ارائه الگوی اوّلیه تبیین پویایی سیستم در مرحله مفهومی بیان گردید. مدلساز با ترسیم نمودارهای علت و معلولی، تصویر مبهم و ساده‌ای از فرضیه دینامیکی ارائه می‌دهد. در این تصویر پله‌های اوّل و دوم سلسله مراتب چهارگانه ساختار سیستمهای پویا یعنی مرز بسته (Closed Boundary) و دوایر بازخوران (Feed back Loops) تا حدودی مشخص می‌شوند. پله‌های سوم و چهارم ساختار سیستم‌های پویا یعنی

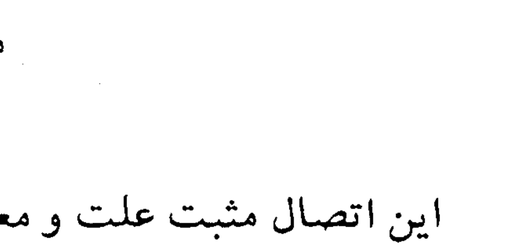
متغیرهای حالت (State or Level Variables) و متغیرهـــای نـــرخ (Rate Variables) با ابزاری به نام نمودار جریان (Flow Diagram) نمایش داده می‌شوند. نمودار جریان را می‌توان حلقه واسطه بین مرحله مفهومی و مرحله مقداری نامید:



شکل شماره ۲ - جایگاه نمودار جریان در مراحل مدلسازی دینامیکی

نمودار جریان Flow Diagram

در بیان سلسله مراتب چهارگانه ساختار پویایی سیستم، گفته شد که متغیرهای حالت، حاصل انباشتگی متغیرهای نرخ هستند و از دیدگاه ریاضی، رابطه متغیر حالت با متغیر نرخ مانند رابطه انتگرال با مشتق است. در نمودارهای علت و معلولی، این انباشتگی نمایش داده نمی‌شود. اثرات متقابل متغیرها در نمودار علت و معلولی، هیچ نشانه‌ای از مفهوم انباشتگی ندارند. امّا واقعیت این است که برخی از اثرگذاریها در نمودار علت و معلولی از نوع انباشتگی هستند. سفارشهای خرید کالا، موجب افزایش موجودی انبار می‌گردد.



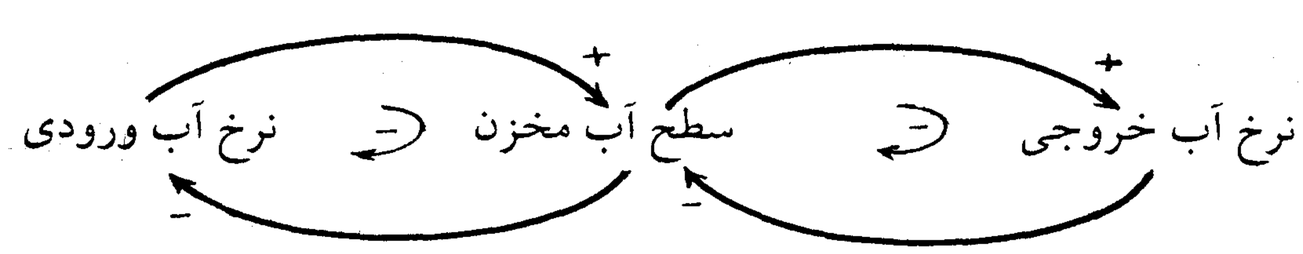
این اتصال مثبت علت و معلولی، اگر چه با سایر اتصالات در ترسیم نمودار تفاوتی ندارد، امّا در واقع، مفهوم انباشتگی را می‌توان از آن استنباط کرد. دانشمندان رشته پویایی سیستم مفهوم انباشتگی را با پر شدن و خالی شدن یک مخزن آب مقایسه کرده‌اند. در نظر آنها فرایند سیستمهای بازخوران را می‌توان با جریان مایع از منبع (Source) به مخزن (Level) و از مخزن به چاه (Sink) همانند دانست. سطح مایع در مخزن را متغیر حالت یا سطح نامیده‌اند و جریان ورودی و خروجی را متغیر نرخ. متغیر نرخ مانند شیری است که مایع را از منبع به مخزن وارد می‌کند و یا از مخزن به چاه می‌ریزد.

مثال: مخزن آبی را در نظر بگیرید که دارای یک شیر ورودی از منبع مجهز به سیستم کنترل کننده «شناور» باشد. از سوی دیگر با تعبیه یک لوله خروجی با قطر ثابت، آب مخزن به چاه می‌ریزد. در این سیستم دو دایره بازخوران وجود دارد:

۱ - بازخوران بین سطح آب مخزن و نرخ ورودی از منبع

۲ - بازخوران بین سطح آب مخزن و نرخ خروجی به چاه

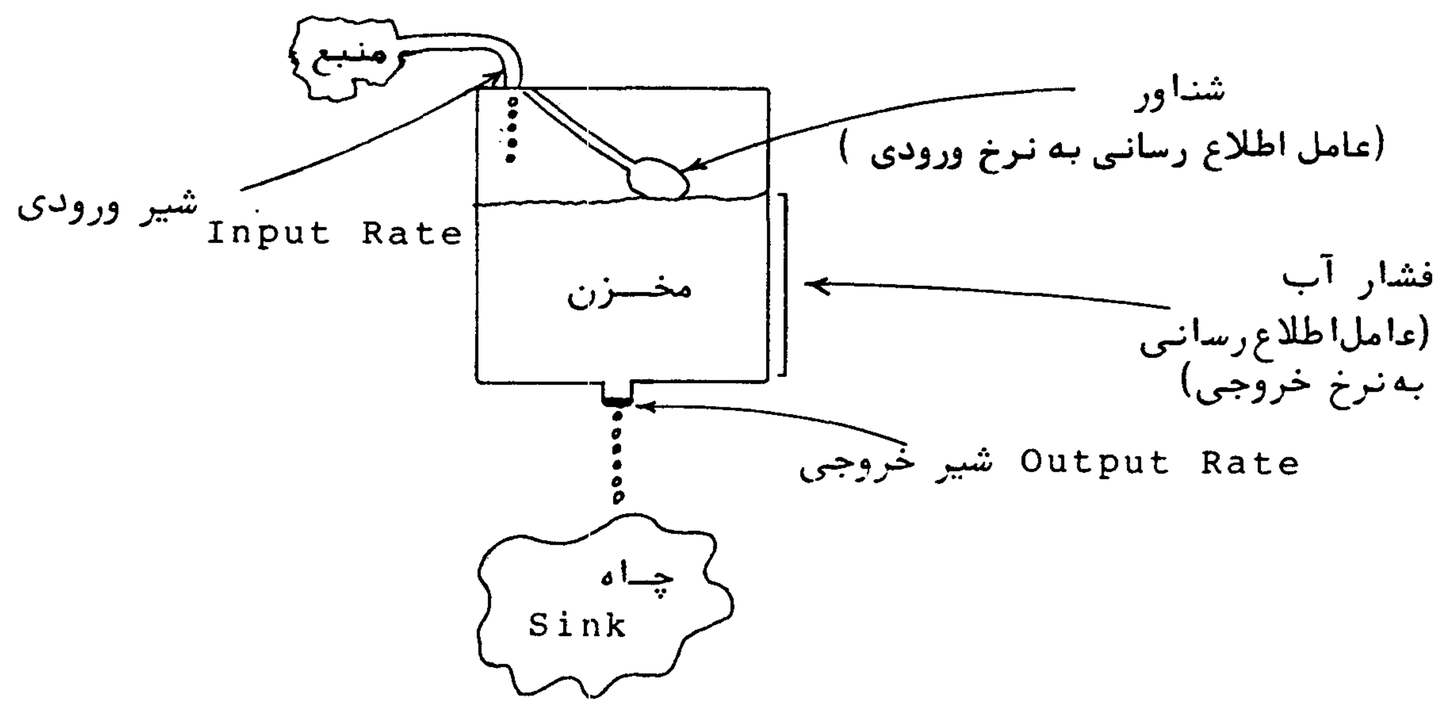
با استفاده از نمودار علت و معلولی این دو دایره بازخوران را می‌توان چنین بیان کرد:



هر چه نرخ آب ورودی بیشتر شود، سطح آب مخزن افزایش خواهد یافت، هر چه سطح آب مخزن افزایش یابد (به دلیل تعبیه سیستم کنترل «شناور») میزان نرخ ورودی کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، هر چه سطح آب مخزن افزایش یابد (به دلیل افزایش فشار آب) نرخ آب خروجی افزایش خواهد یافت و هر چه نرخ آب خروجی افزایش یابد، سطح آب مخزن کاهش خواهد یافت.

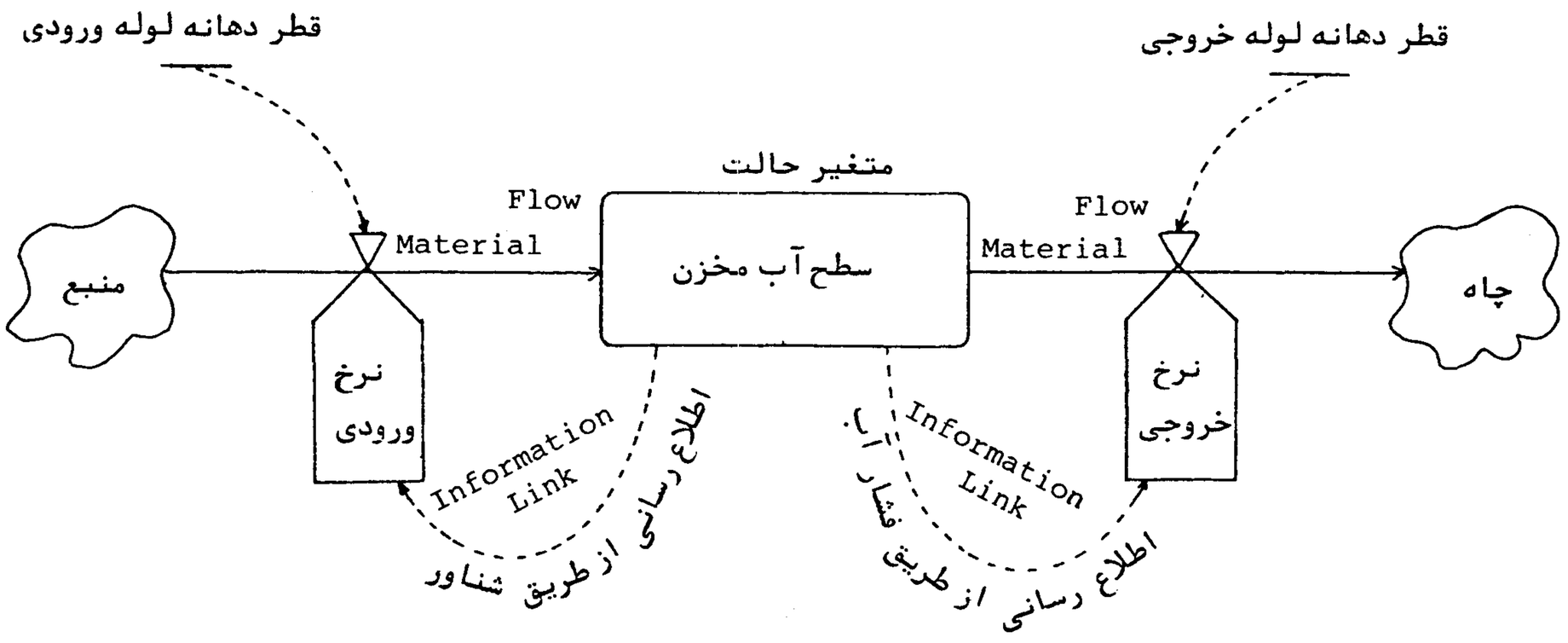
در بیان توصیفی و لغوی (Verbal Descreption) سیستم فوق، مفهوم انباشتگی بسیار واضح و روشن است اما نمودار علت و معلولی

نمی‌تواند آن را نمایش دهد. نمودار جریان با استفاده از نمادهایی مشابه با واقعیت، چنین نقشی را ایفا می‌کند.



نمودار شماره ۳

آنچه که در نمودار شماره ۳ دیده می‌شود، به شکلی ساده و قابل استفاده، در نمودار جریان بکار می‌رود. بیان عملکرد سیستم فوق با استفاده از نمادهای نمودار جریان مطابق نمودار شماره ۴ می‌باشد.

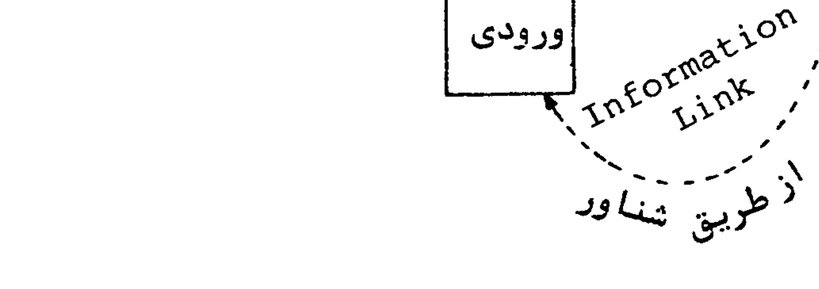


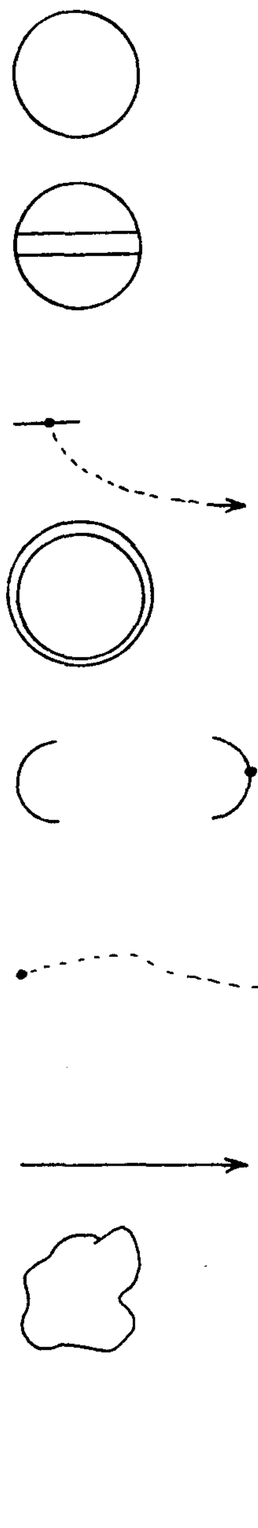
نمودار شماره ۴

در مطالعات پویایی سیستم با استفاده از نمادهای ساده مزبور و چند نماد ساده دیگر، به شرح زیر، تمام فعل و انفعالات سیستمهای پویا در قالب نمودار جریان بیان می‌شوند:[1]

متغیر حالت یا سطح (Level or state variable)

متغیر نرخ (Rate variable)





متغیر کمکی (Auxiliary variable)

تابـع (Function)

پارامتر یا عدد ثابت (Costant)

متغیر خارجی (Exogenous variable)

متغیری که درنمودار تعریف نشده است (Variable not defined in diagram)

اتصال اطلاعاتی (Information Link)

جریان مواد (Material Flow)

منبع یا چاه مواد (Source or sink of material)

شکل شماره ۵- نمادهای نمودار جریان (Symbols For Flow Diagrams)

جریان مواد و اتصال اطلاعاتی

همچنان که ملاحظه شد، نمودار جریان، بر خلاف نمودار علت و معلولی، بین جریان مواد و اتصال اطلاعاتی تفاوت قائل است. در نمودار علت و معلولی هر اثرگذاری، صرف نظر از نوع آن، با اتصال علت و معلولی نمایش داده می‌شود امّا در نمودار جریان، چنین نیست. هر جریانی که خروجش، سطح مخزن را کاهش دهد، جریان مواد نامیده می‌شود. امّا انتقال اطلاعات به سایر قسمتها، در سطح مخزن تأثیری نمی‌گذارد، در نمودار جریان، اتصال اطلاعاتی با خط نقطه چین ⇢ نشان داده می‌شود در حالی که جریان مواد را با خط پر نشان می‌دهند ⟶.

متغیرهای کمکی

اگر چه اساس ساختار پویایی سیستم را متغیرهای نرخ و حالت تشکیل می‌دهند، اما برای تبیین سیستمهای پیچیده، اکتفای به این دو نوع متغیر بسیار مشکل می‌شود. در مسیر اتصالات اطلاعاتی (Information Path) غالباً استفاده از متغیرهای کمکی ناگزیر است. متغیرهای کمکی هم در فرموله کردن متغیرهای نرخ بکار می‌آیند و هم بیانگر اطلاعات مفیدی هستند که در مرحله ارزیابی مدل می‌توان مورد مداقه و بررسی قرار داد.

متغیر خارجی

هر متغیری که در دایره بازخوران واقع نشود و فقط بطور یک جانبه بر یکی از متغیرهای مسأله تأثیر بگذارد، متغیر خارجی نامیده می‌شود. نحوه کارکرد متغیر خارجی در مطالعات پویایی سیستم، با پارامترها و اعداد ثابت تفاوت چندانی ندارد. هر دو بیانگر اثـرگذاری عـوامـل محیطی بر مرز بسته مسأله مورد بررسی هستند، نکته مهم این است که تغییرات متغیر خارجی، تحت تأثیر و کنترل متغیرهای داخل مرز بسته

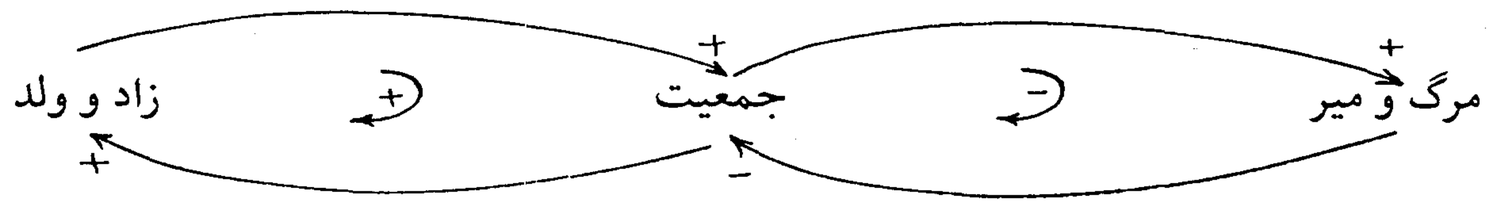
قرار ندارد.

اینک نمودار جریان تعدادی از مثالهای گفتار پیشین، ترسیم می‌گردد. یادآوری می‌شود که در این مثالها به منظور رعایت سادگی و سهولت، از حداقل متغیرها و پارامترها استفاده شده است.

برای رعایت اختصار، از تکرار توضیحات مربوط به توصیف لغوی (Verbal Descreption) و نمودار علت و معلولی (Causal Diagrams) خودداری می‌شود. خواننده گرامی در صورت لزوم به توضیحات مقاله قبلی مراجعه خواهند نمود. همچنین به منظور سهولت در یادگیری مفاهیم اوّلیه، از تعبیه متغیرهای کمکی برای اصلاح واحد سنجش (Dimension) خودداری شده است. بدیهی است که در مرحله فرموله کردن معادلات DYNAMO باید این تبدیل انجام شود.

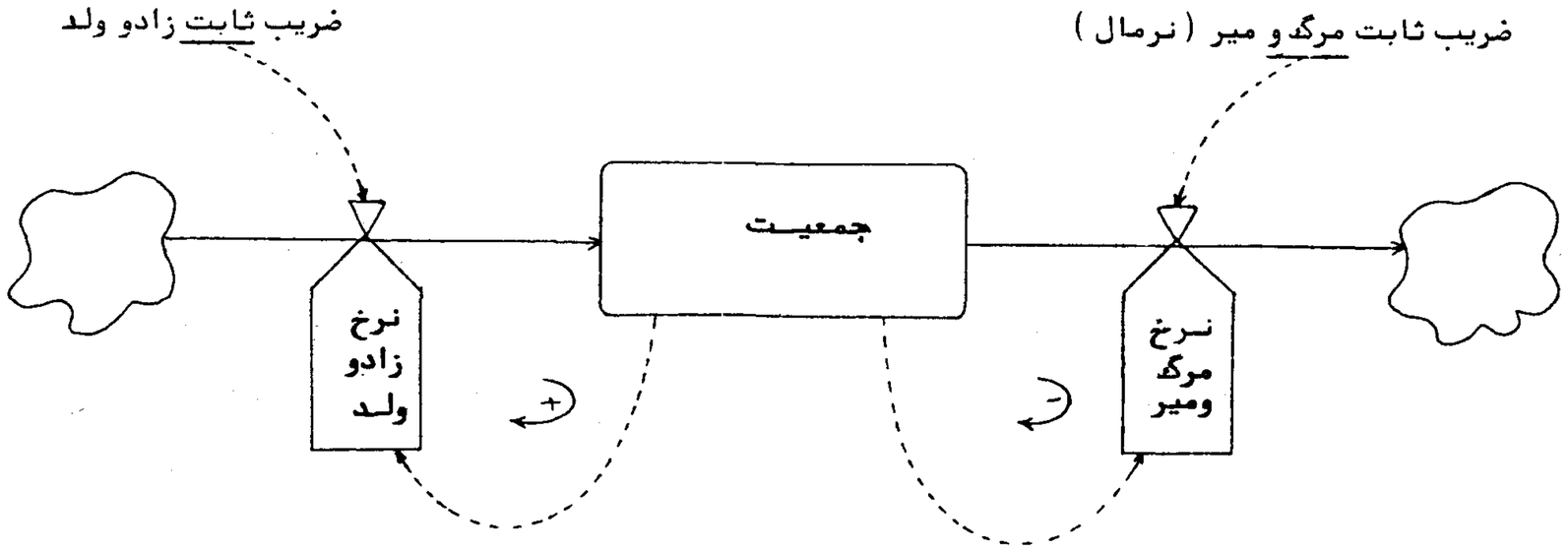
الف - جمعیت

۱ - دوایر بازخوران بین جمعیت، زادو ولد و مرگ و میر در ساده‌ترین شکل[۲]



شکل شماره ٦- نمودار علت و معلولی رابطه بازخوران بین جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر در ساده‌ترین شکل

با قدری دقت در این نمودار علت و معلولی، می‌توان مفهوم انباشتگی را در جمعیت بخوبی مشاهده کرد. از مقایسه این مدل با مدل پر و خالی شدن مخزن آب سابق‌الذکر، و با استفاده از نمادهای نمودار جریان شکل شماره ۷ به دست می‌آید:

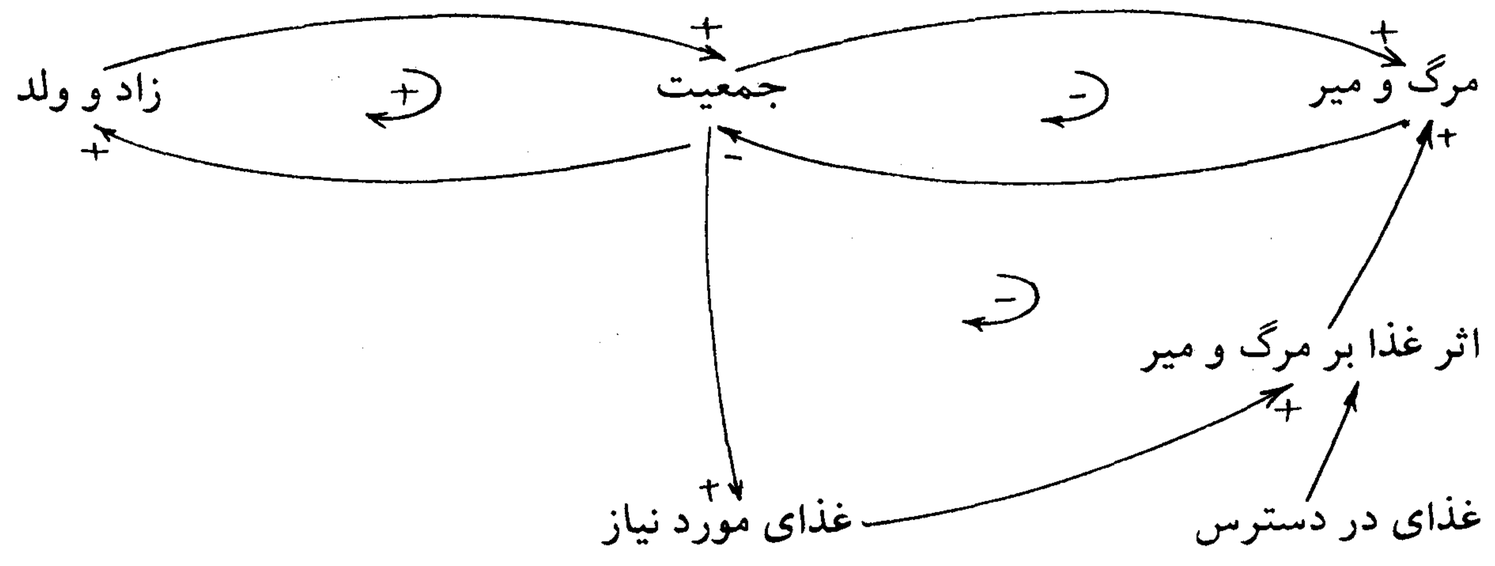


شکل شماره ۷- نمودار جریان رابطه بازخوران فوق

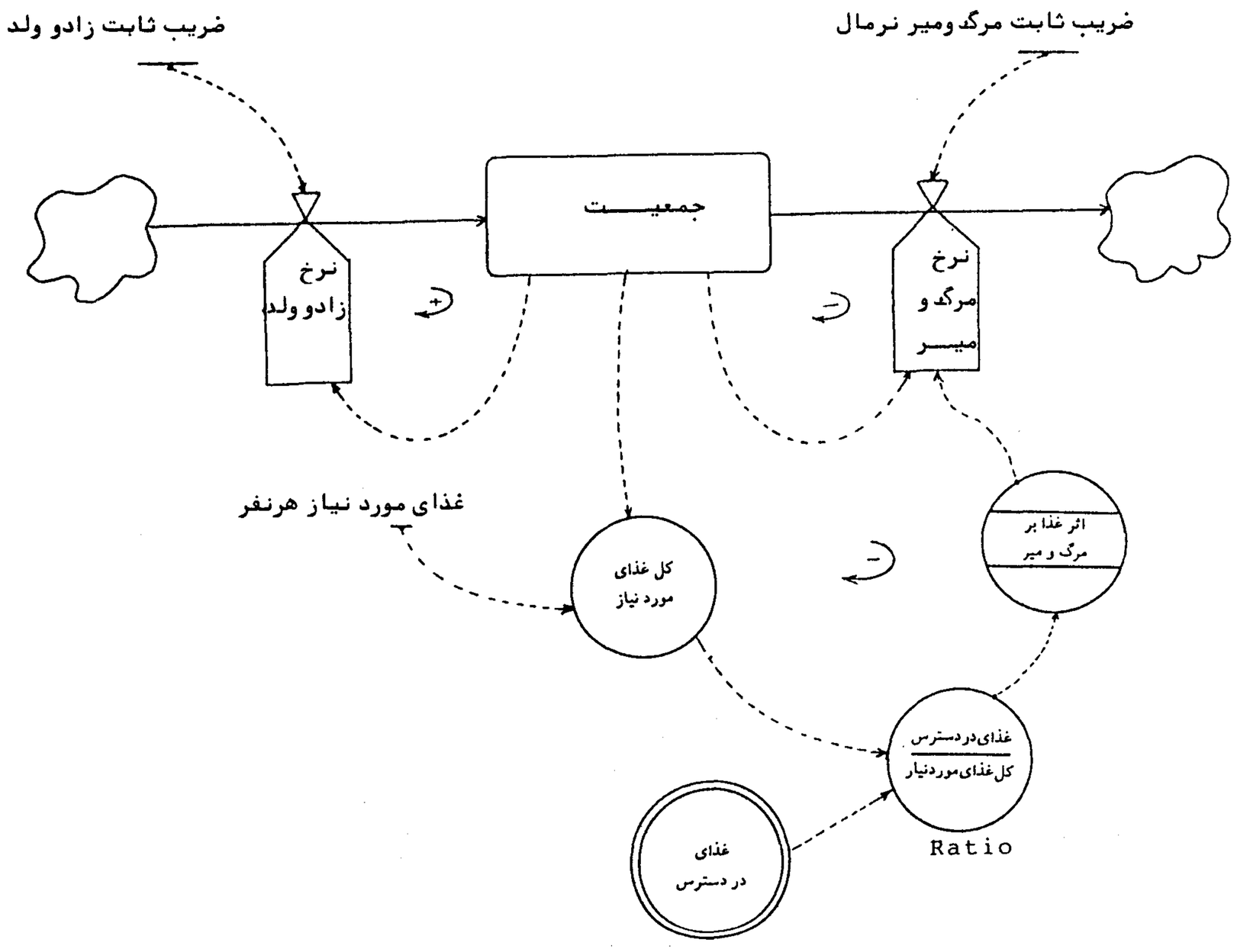
در این نمودار جریان، جمعیت، به صورت جریانی تصور شده که از منبعی به وسیله یک شیر ورودی (نرخ زاد و ولد) به مخزن (کل جمعیت کشور) جاری شده و از مخزن به وسیله شیر خروجی (نرخ مرگ و میر) به چاه سرازیر می‌شود، جمعیت متغیر حالت، زاد و ولد متغیر نرخ ورودی، مرگ و میر متغیر نرخ خروجی و دو ضریب ثابت زاد و ولد و مرگ و میر، پارامترهای مدل محسوب می‌شوند. در این مدل، به منظور رعایت اختصار و سادگی، تنها ضریب ثابت مرگ و میر معمولی مورد نظر قرار می‌گیرد و از سایر علل مرگ و میر چشم‌پوشی شده است.

۲ - دوایر بازخوران بین جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر با توجه به اثر سوء تغذیه بر مرگ و میر:

یکی از عواملی که می‌تواند در مرگ و میر مؤثر باشد و میزان طبیعی مرگ و میر را افزایش دهد، اثر سوء تغذیه بر مرگ و میر است. در صورتی که مواد غذایی، همراه با رشد جمعیت و متناسب با آن افزایش نیابد، سوء تغذیه ایجاد می‌شود و عمر طبیعی متوسط افراد جامعه کاهش خواهد یافت. ابتدا این عامل را در نمودار علت و معلولی منعکس کرده، سپس نمودار جریان آن را ترسیم خواهیم کرد:



شکل شماره ۸- نمودار علت و معلولی رابطه بازخوران بین جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر پس از منظور نمودن اثر محدودیت غذایی بر مرگ و میر



شکل شماره ۹- نمودار جریان رابطه بازخوران فوق

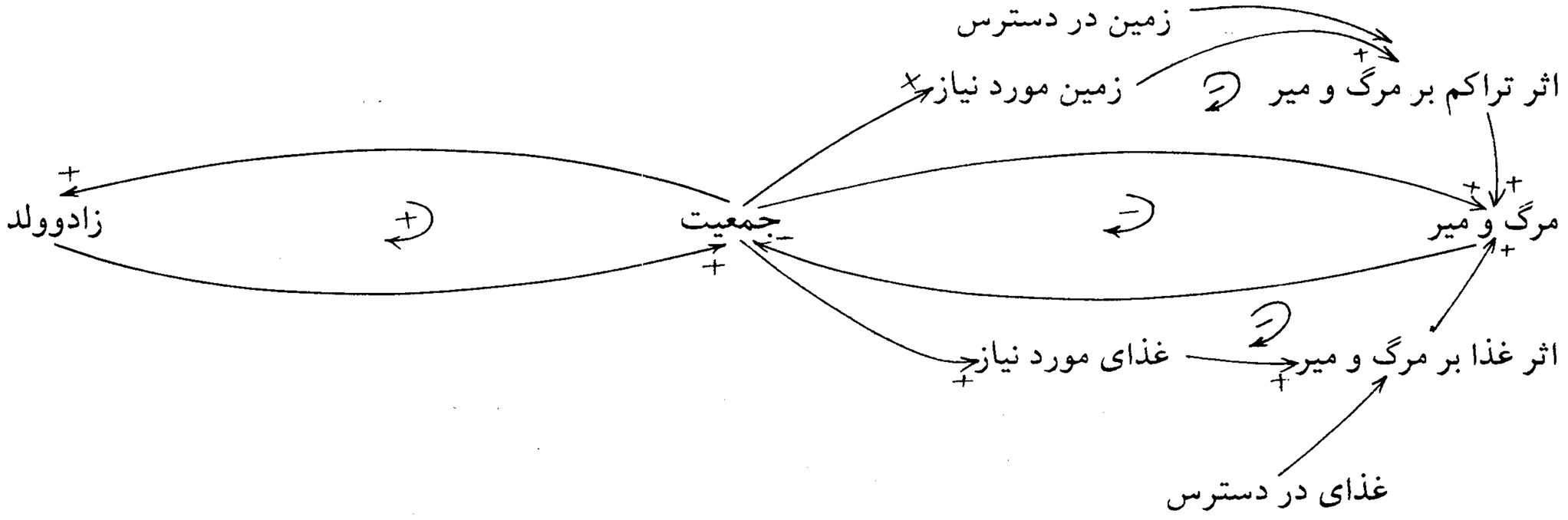
از حاصل ضرب مقدار غذای مورد نیاز هر نفر در تعداد جمعیت، کل غذای مورد نیاز به دست می‌آید. غذای در دسترس خارج از مدار تأثیرات متقابل مسأله فرض شده و به صورت متغیری خارجی، که تحت تأثیر عوامل خارج از مدل (مانند بارندگی، قیمت نفت و ...) است، نشان داده شده است. اگر میزان غذای در دسترس ثابت فرض شود، می‌توان آن را با نماد مربوط به پارامتر یا عدد ثابت (غذای در دسترس) نشان داد. اگر مدلساز، مدل دیگری در مورد مواد غذایی تهیه کرده باشد که غذای در دسترس یکی از متغیرهای آن باشد، می‌تواند از نماد متغیری که در نمودار تعریف نشده (غذای در دسترس) استفاده نماید. در هر صورت از تقسیم غذای در دسترس به کل غذای مورد نیاز، نسبت دسترسی به غذا (Ratio) به دست می‌آید.

هر چه این نسبت به صفر نزدیکتر باشد، سوء تغذیه بر مرگ و میر اثر بیشتری دارد و هر چه به یک نزدیکتر شود، اثر سوء تغذیه بر مرگ و میر کمتر خواهد شد، چنانچه این نسبت برابر با یک یا بیشتر از یک باشد، سوء تغذیه بر مرگ و میر اثری نخواهد داشت. این ترتیب

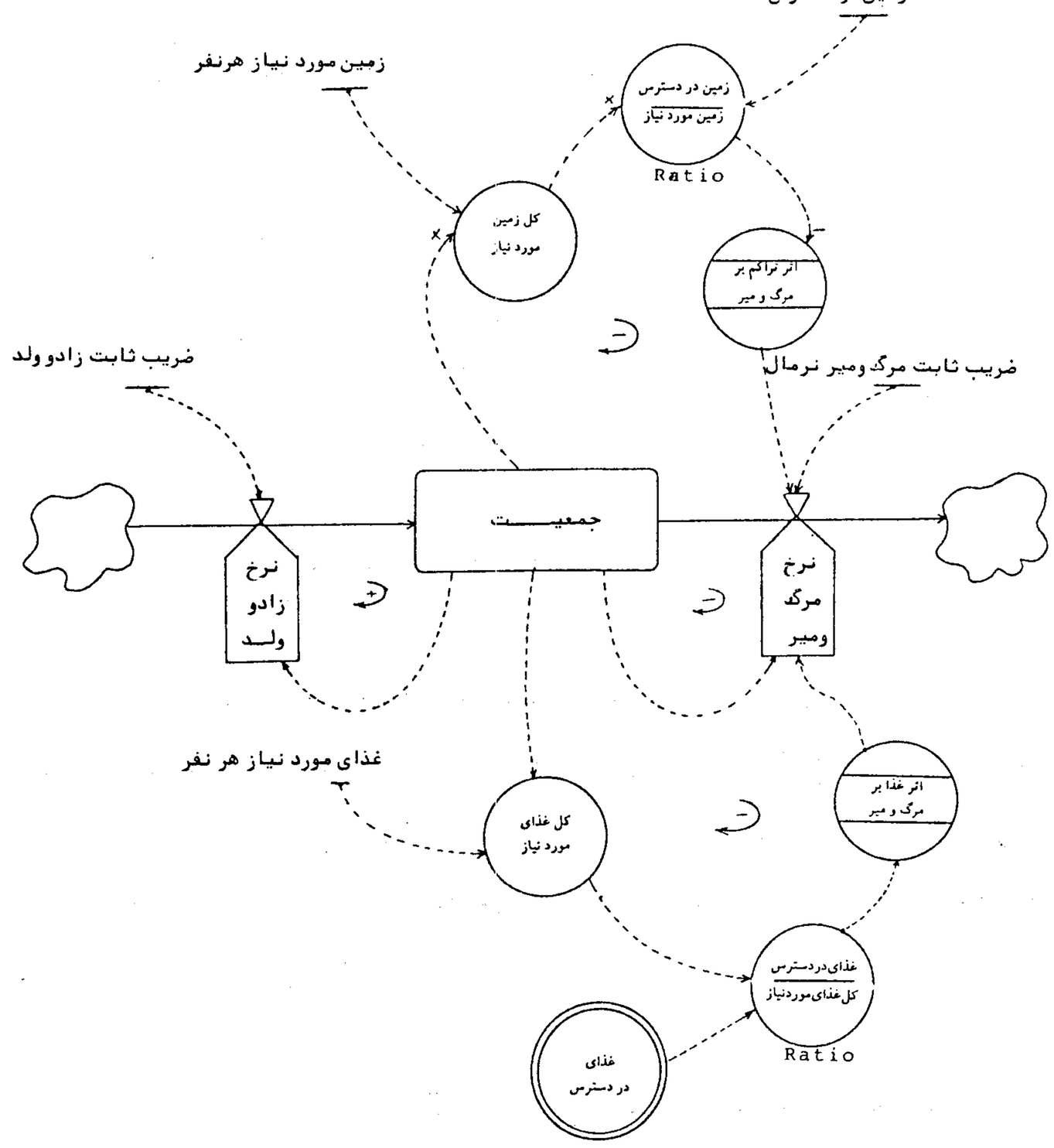
اثرگذاری،نیازمند یکی از توابع DYNAMO به نام تابع جدولی (Table Function) است که در مبحث معادلات DYNAMO بیان خواهد شد.

۳- دوایر بازخوران بین جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر با توجه به اثر سوء تغذیه و تراکم جمعیت بر مرگ و میر:

اینک اثر عامل دیگری که فارستر (J. W. Forrester) در یکی از تحقیقات خود با عنوان پویایی دنیا (World Dynamics) به عنوان عامل مؤثر بر مرگ و میر ذکر کرده است، بررسی می‌گردد.[۳] بر اساس مدل دینامیکی ارائه شده توسط این دانشمند، با توجه به محدودیت زمین در دسترس، افزایش جمعیت، موجب افزایش تراکم جمعیت در واحد سطح می‌گردد و این عامل موجب افزایش مرگ و میر می‌شود. با این فرض نمودار علت و معلولی ذیل (شکل شماره ۱۰) حاصل خواهد شد:



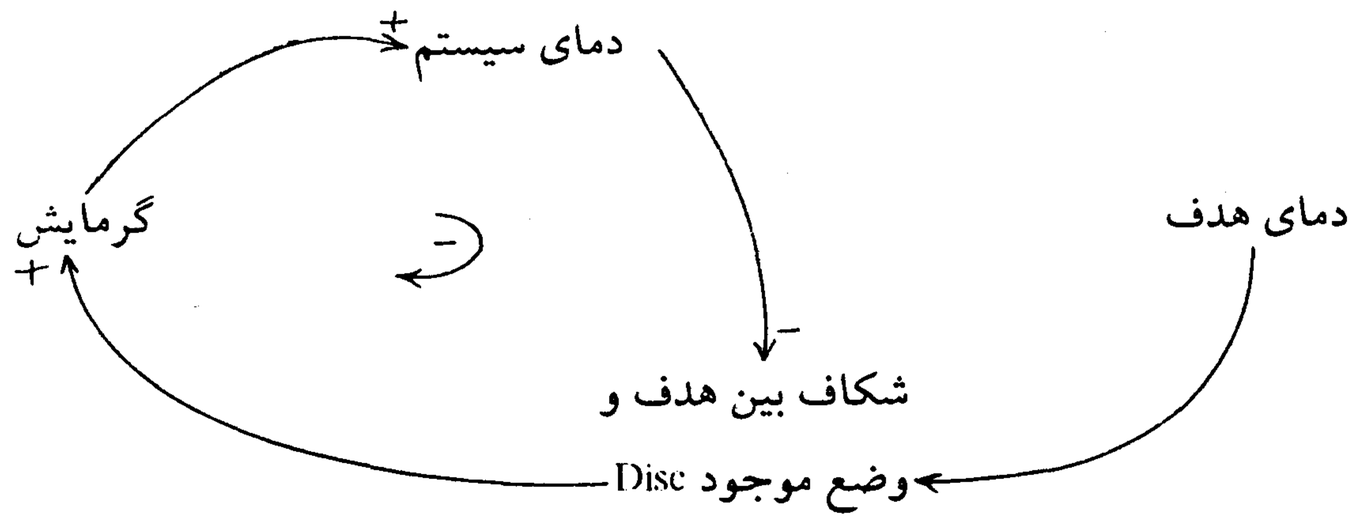
شکل شماره ۱۰ - نمودار علت و معلولی رابطه بازخوران بین جمعیت زاد و ولد و مرگ و میر پس از منظور نمودن اثر محدودیت غذایی و تراکم جمعیت بر مرگ و میر



شکل شماره ۱۱ - نمودار جریان رابطه بازخوران فوق

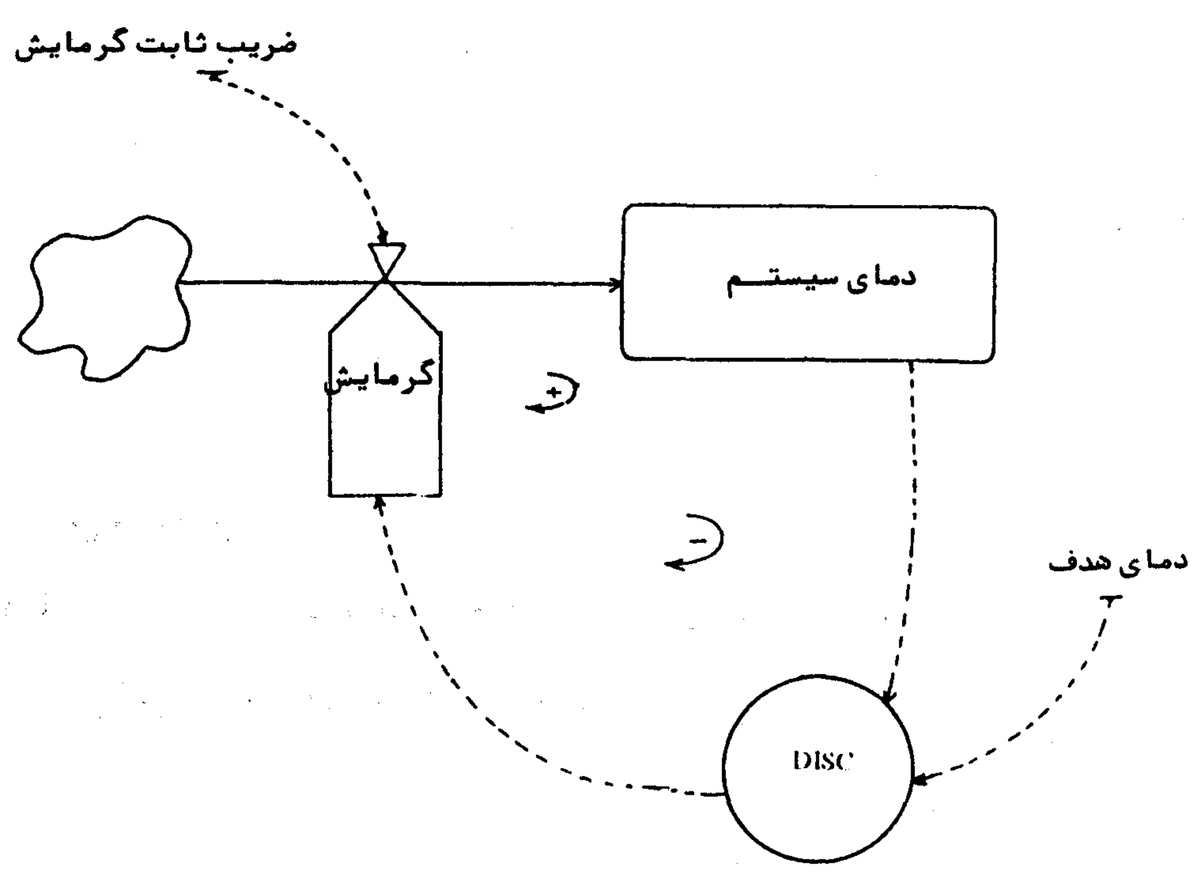
ب - ترموستات[۴]

۱ - رابطه بازخوران بین دما و گرمایش



نمودار شماره ۱۲ - نمودار علت و معلولی رابطه بازخوران بین دما و گرمایش در حالتی که دمای سیستم از دمای هدف کمتر است

از مقایسه بین نمودار شماره ۱۲ و مدل پر شدن و خالی شدن مخزن آب، می‌توان مفهوم انباشتگی را در «دمای سیستم» مشاهده کرد. گرمایش یا نرخ افزایش دما مانند شیر آب ورودی به مخزن است. بدین ترتیب دمای سیستم در حکم متغیر حالت و گرمایش در حکم متغیر نرخ تلقی می‌شود. هدف، پارامتر ثابتی است که توسط بهره‌بردار بر سیستم تحمیل می‌شود. فاصله بین هدف و وضع موجود (Discrepancy) متغیر کمکی است که در مسیر اطلاعاتی (Information Path) دایره بازخوران قرار گرفته و از تفاضل دمای هدف و دمای سیستم به دست می‌آید. با استفاده از نمادهای نمودار جریان شکل شماره ۱۳ حاصل می‌شود.

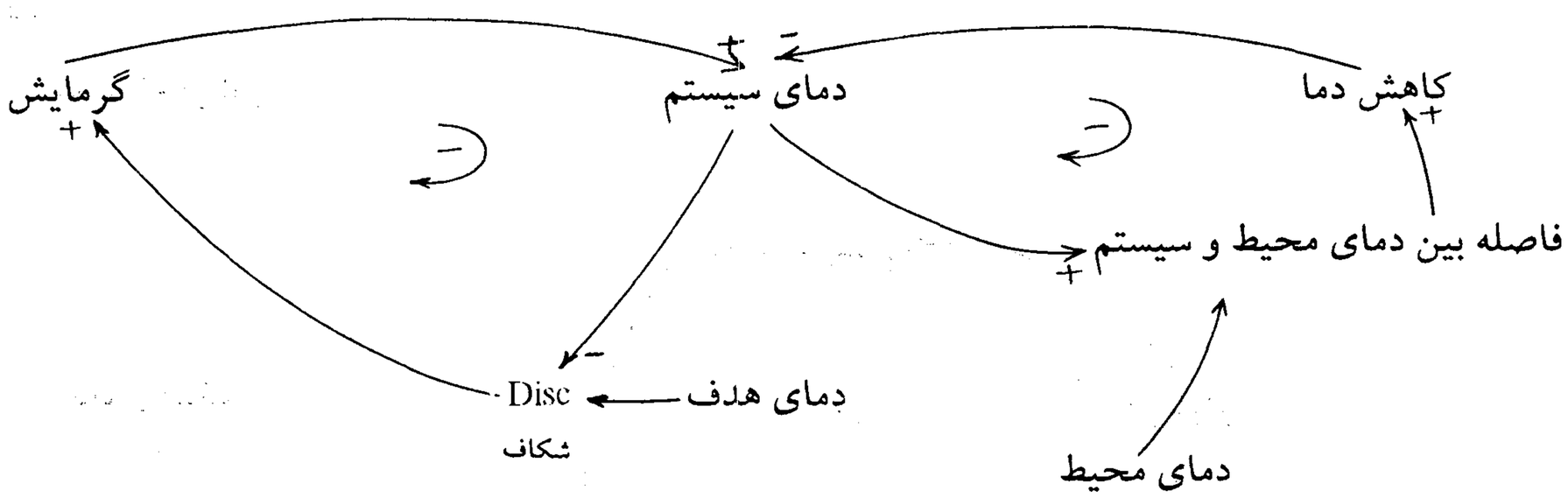


شکل شماره ۱۳ - نمودار جریان رابطه بازخوران فوق

در شکل شماره ۱۳ به منظور رعایت سادگی و اختصار، کاهش دما، ناشی از درجه حرارت هوای محیط پیرامون سیستم در نظر گرفته نشده است.

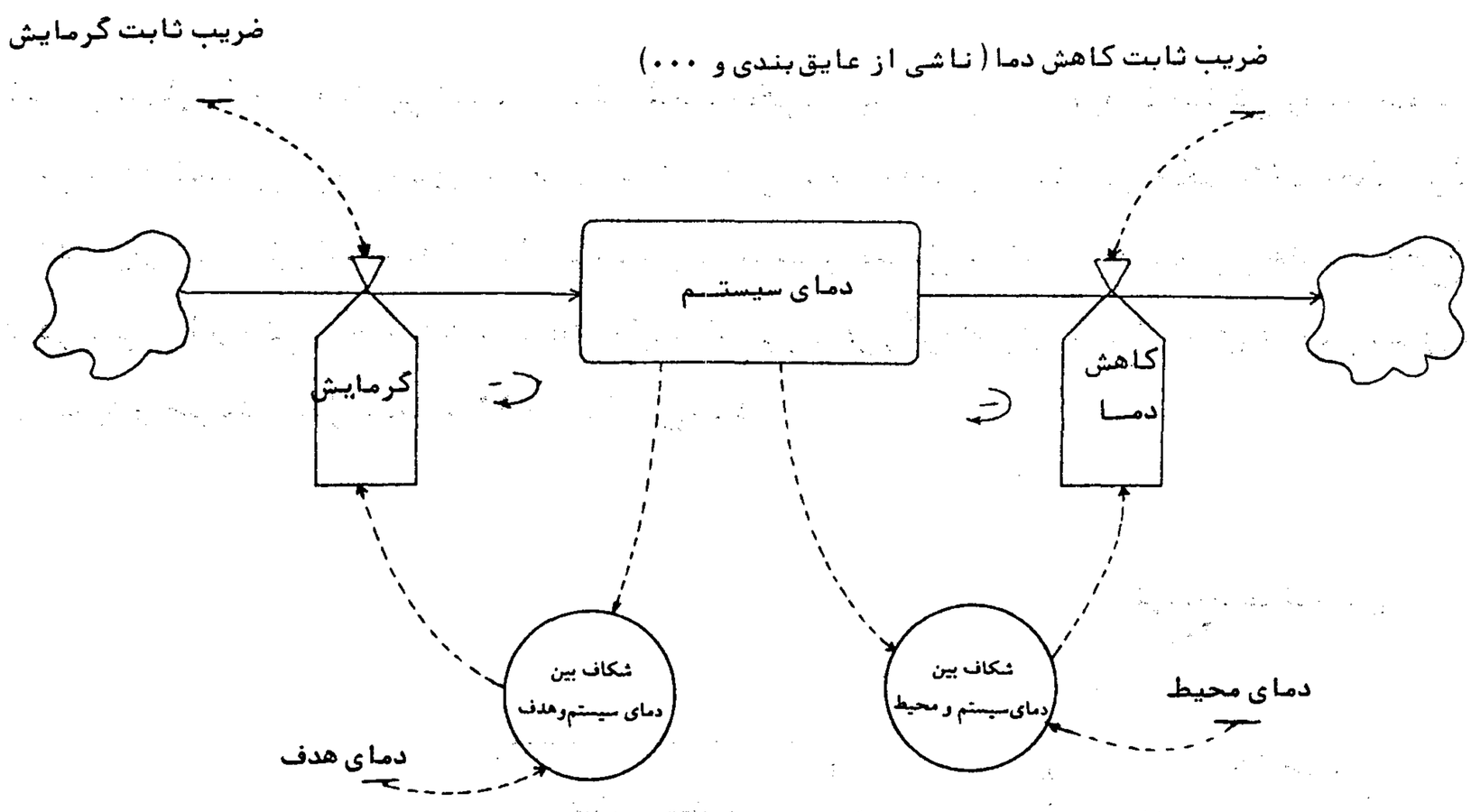
۲ - رابطه بازخوران بین دما، گرمایش و کاهش دما

اگر سرمای محیط را به عنوان عامل کاهش دما در نظر بگیریم نمودار علت و معلولی شماره ۱۴ به دست خواهد آمد:



شکل شماره ۱۴ - نمودار علت و معلولی رابطه بازخوران بین دما، گرمایش و کاهش دما ناشی از سرمای محیط. (درجه حرارت اوّلیه سیستم از دمای هدف کمتر است)

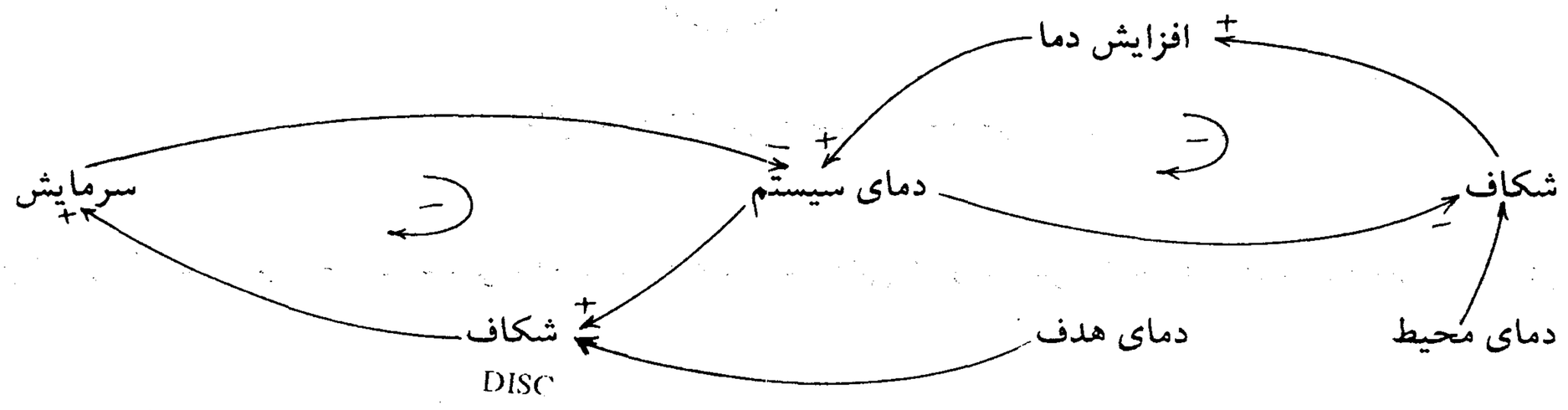
با اضافه شدن دایره بازخوران جدید، نمودار جریان شماره ۱۵ حاصل می‌گردد:



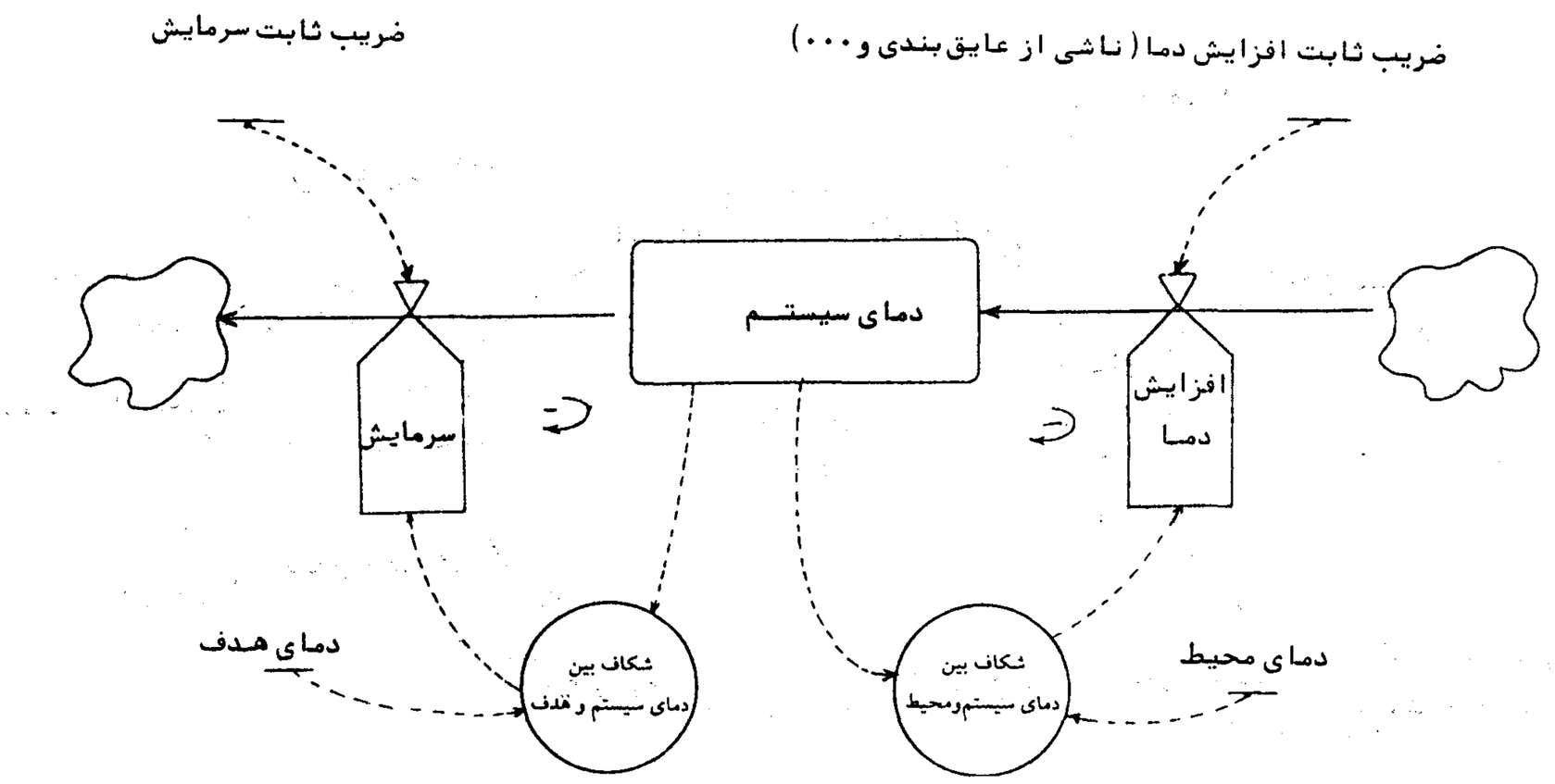
شکل شماره ۱۵ - نمودار جریان رابطه بازخوران فوق

۳- رابطه بازخوران بین دما، سرمایش و افزایش دما

اگر دمای سیستم بیشتر از دمای هدف باشد، پر شدن شکاف بین دمای سیستم و هدف، مستلزم سرمایش است. هر چند ساختار کلی مدل در این حالت تغییری نمی‌کند، اما برخی از اجزای مدل دگرگون می‌شوند:

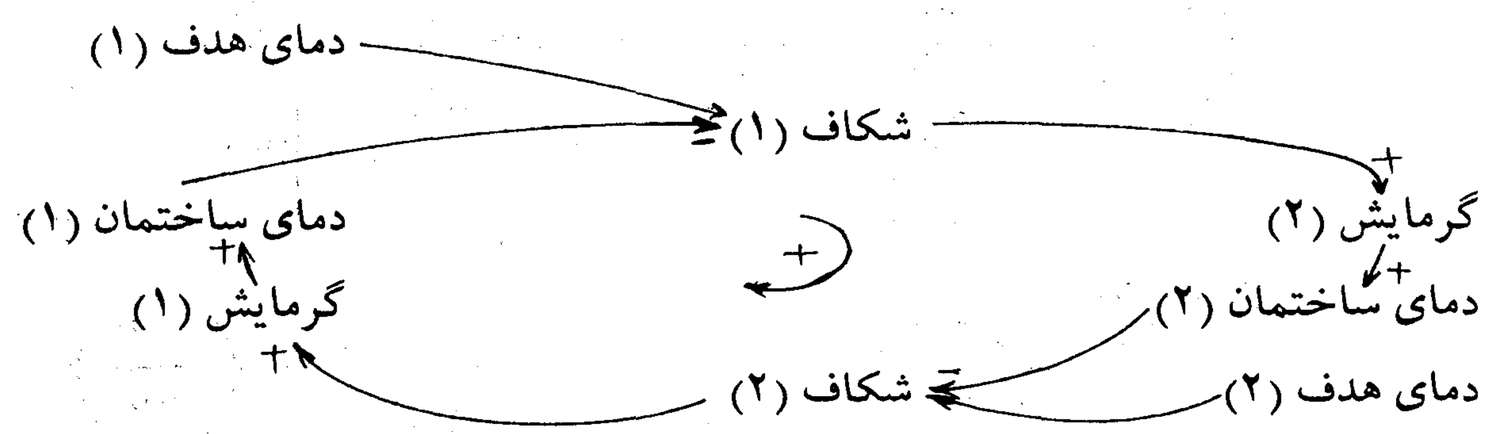


شکل شماره ۱۶ - نمودار علت و معلولی رابطه بازخوران بین دما، سرمایش و افزایش دما ناشی از گرمای محیط (دمای اولیه سیستم از دمای هدف بیشتر است).



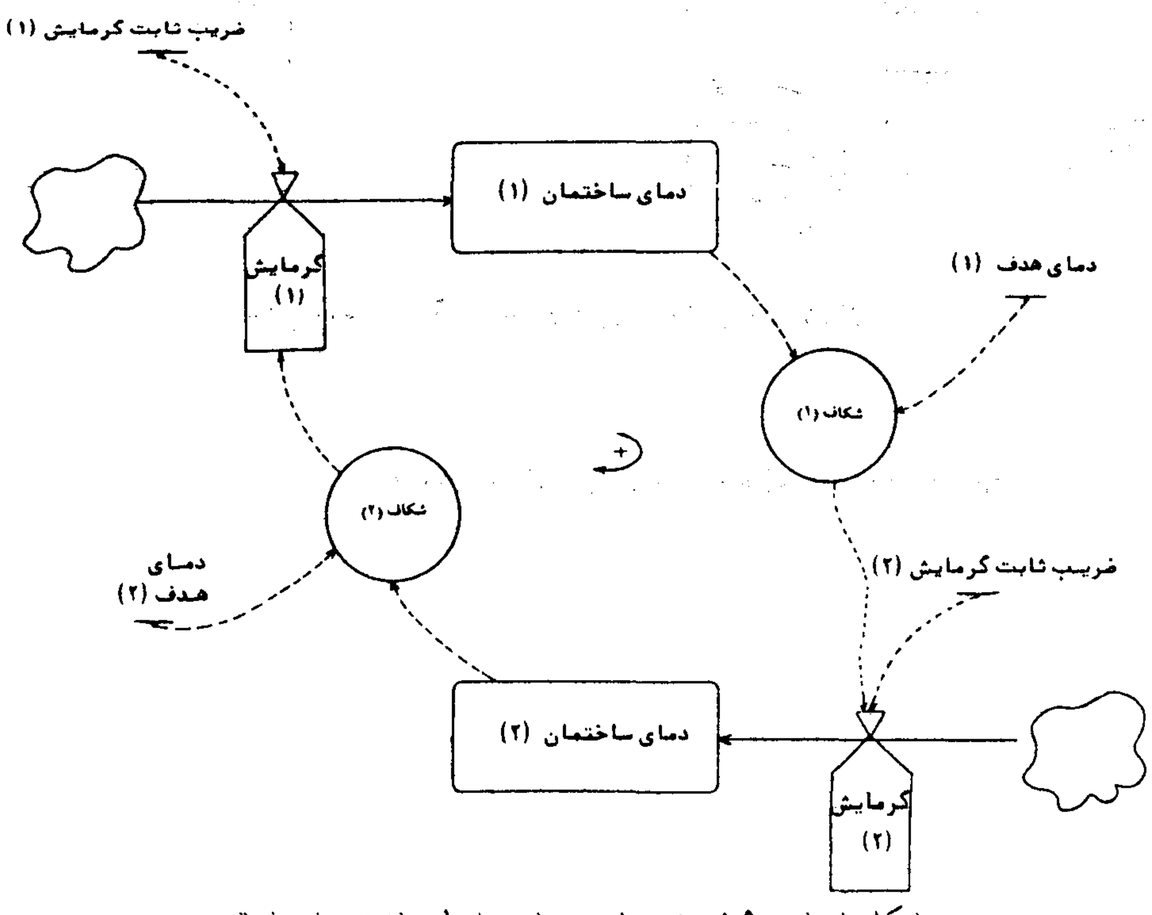
شکل شماره ۱۷ - نمودار جریان رابطه بازخوران فوق

۴ – سیستم حرارتی دو ساختمان که کلیدهای تنظیم گرمایش آنها جابجا نصب شده باشد.



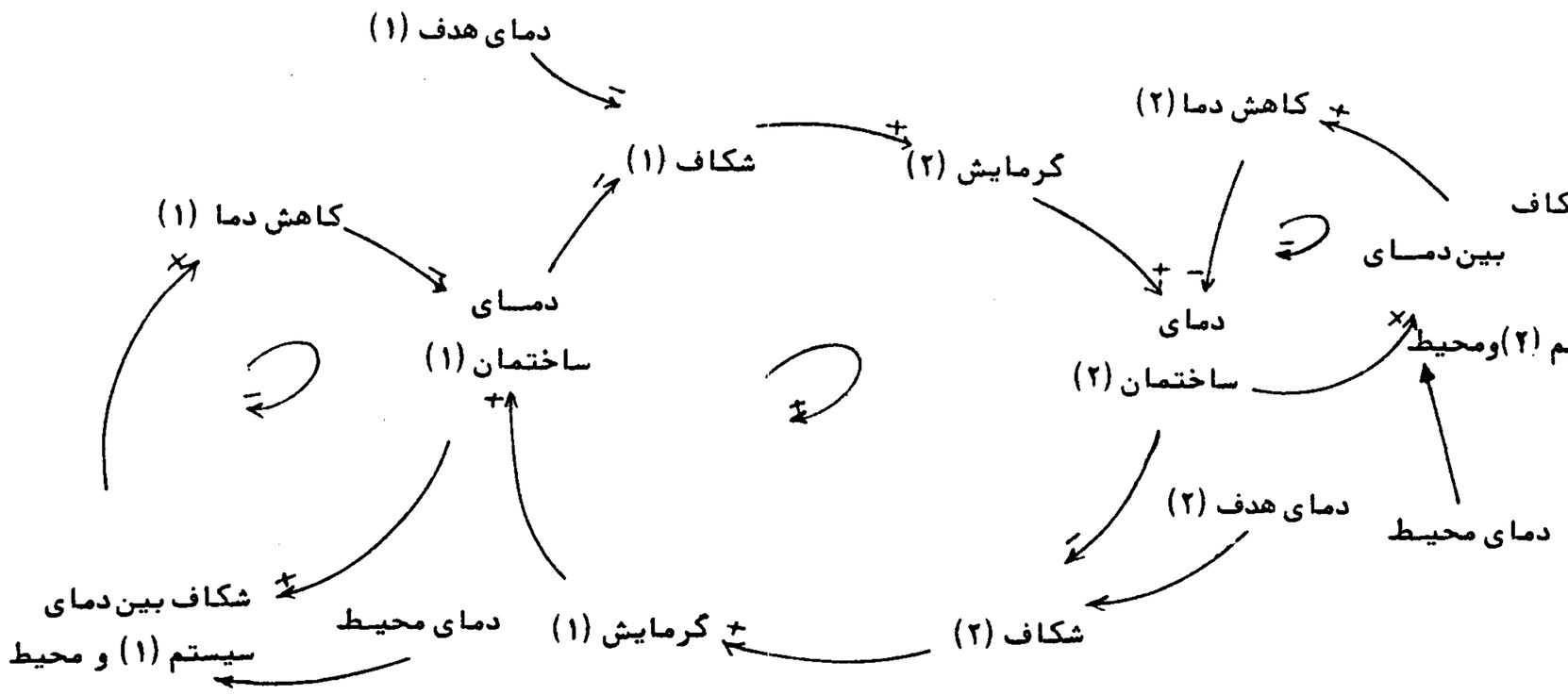
شکل شماره ۱۸ - نمودار علت و معلولی رابطه بازخوران بین سیستمهای حرارت دو ساختمان که کلیدهای تنظیم گرمایش آنها با هم تعویض شده است.

دقت در نمودار علت و معلولی شماره ۱۸، نشان می‌دهد که این مدل در دو جا انباشتگی دارد. بنابر این دارای دو متغیر حالت است: متغیر حالت اوّل دمای ساختمان شماره (۱) و متغیر حالت دوم دمای ساختمان شماره (۲) خواهد بود:

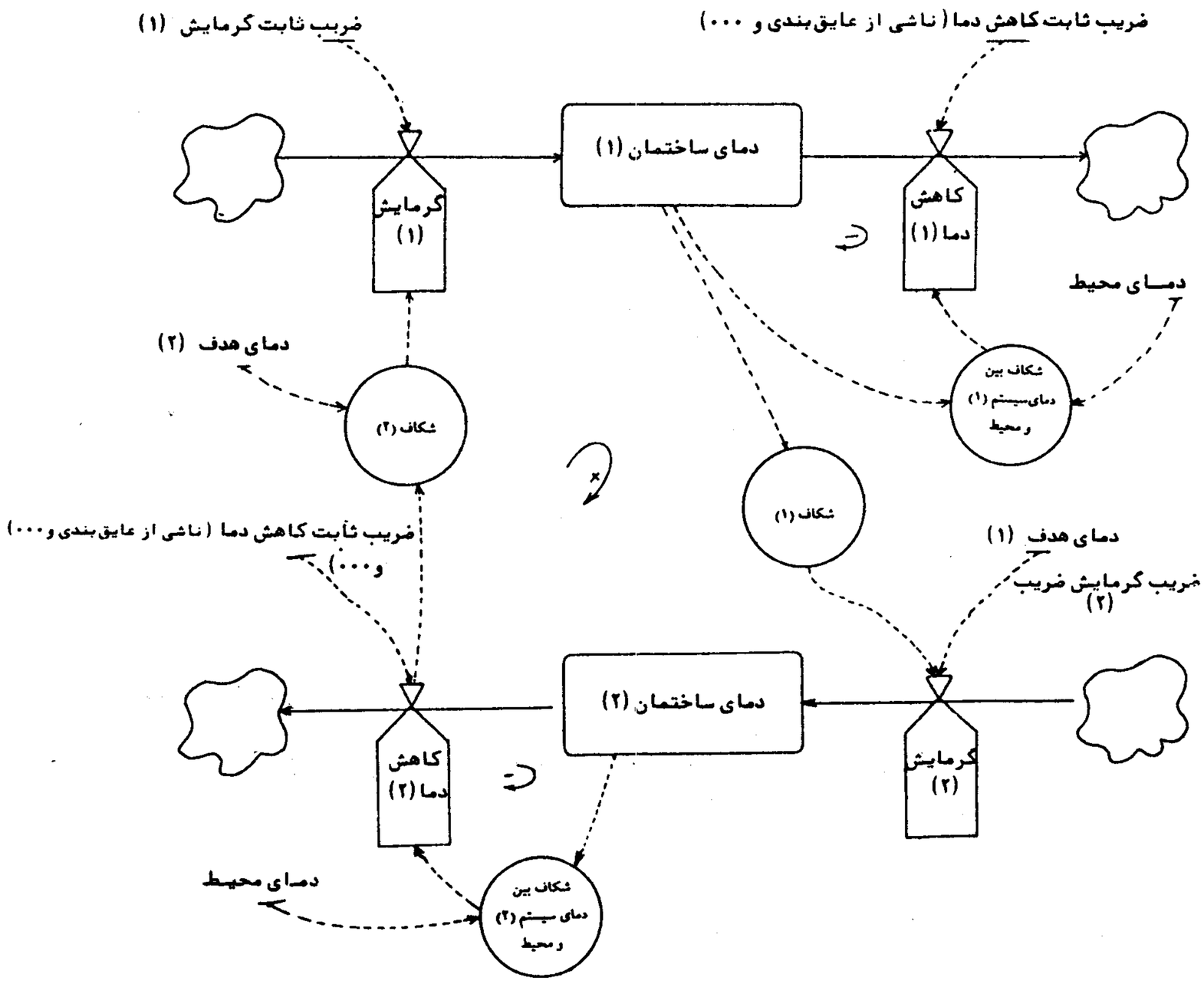


شکل شماره ۱۹ - نمودار جریان رابطه بازخوران فوق

۵- با اضافه کردن دایره‌های بازخوران مربوط به کاهش دما، ناشی از درجه حرارت محیط، نمودار علت و معلولی ذیل به دست خواهد آمد.



شکل شماره ۲۰ - نمودار علت و معلولی دوایر بازخوران پس از اضافه کردن دو مکانیزم کاهش دما



شکل شماره ۲۱ - نمودار جریان دوایر بازخوران فوق

منابع

1-Richardson & Pugh III. Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO.

(MIT Press, 1981)

2,3-Forrester Jay, W. World Dynamics.

(Wright-Allen Press, 1971)

4-Goodman M, R. Study Notes in System Dynamics.

(Wright-Allen Press, 1974)