

## فصل سوم: روش‌شناسی پژوهش در مورد سیستم‌های دینامیک (پویایی‌شناسی سیستم‌ها)

### مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌شناسی پژوهش در زمینه سیستم دینامیک (پویایی‌شناسی سیستم‌ها) می‌پردازیم. سیستم دینامیک روشی برای تحلیل و مدل‌سازی رفتار سیستم‌های پیچیده در طول زمان است که به‌ویژه در حوزه‌های مدیریتی و صنعتی کاربردهای زیادی دارد. این فصل شامل تشریح مراحل مختلف پژوهش، از تعریف مسئله تا اعتبارسنجی مدل‌های پویایی‌شناسی خواهد بود و در نهایت به معرفی نرم‌افزار ونسیم به‌عنوان ابزاری قدرتمند در این زمینه پرداخته خواهد شد. در فصل‌های بعد، کاربرد این روش‌شناسی در حل مساله این پژوهش تشریح می‌گردد.

### روش‌شناسی پژوهش

روش‌شناسی پژوهش در زمینه سیستم‌های دینامیک به‌عنوان یک رویکرد منظم و ساختاریافته به منظور تحلیل و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده طراحی می‌شود. این روش پژوهشی شامل مجموعه‌ای از مراحل گام به گام است که هر یک دارای اهمیت خاصی در راستای دستیابی به نتایج قابل‌استفاده و معتبر هستند. اولین گام در این فرایند، تعریف دقیق مسئله‌ای است که نیاز به تحلیل و بررسی دارد. در این مرحله، محقق باید عواملی که بر رفتار سیستم تأثیر می‌گذارند را شناسایی کند و نتایج و تغییرات مورد انتظار را مشخص نماید. این مرحله پایه‌ای و کلیدی برای مراحل بعدی است و نادیده‌گرفتن یا عدم دقت در آن می‌تواند باعث کاهش دقت مدل و تحلیل‌ها گردد.

پس از تعیین مسئله، مرحله بعدی تدوین فرضیات پویا است. فرضیات باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که قابل آزمون و مرتبط با روابط علت و معلولی موجود در سیستم باشند. این فرضیات به محقق کمک می‌کنند تا فرضیه‌هایی منطقی در مورد رفتار سیستم ارائه دهد و بتواند تحلیل‌های لازم را بر اساس آن‌ها اجرا کند. در این مرحله، ضروری است که محقق از روش‌های مناسب مدل‌سازی و تحلیلی بهره‌برداری کند، زیرا این ابزارها به او کمک خواهند کرد تا ساختار سیستم و روابط میان متغیرها را به‌طور مؤثر نمایان کند (کانتی و همکاران ۲۰۱۷).

مدل‌سازی یکی از مراحل کلیدی در روش‌شناسی پژوهش است. در این مرحله، محقق با استفاده از ابزارها و تکنیک‌های مختلف، مانند نمودارهای زیرسیستم‌ها، روابط علت و معلولی، و نمودارهای حلقه‌های بازخوردی، روابط پیچیده میان متغیرها را ترسیم می‌کند. همچنین در این مرحله، متغیرهای حالت و نرخ، که نمایان‌گر وضعیت و تغییرات در طول زمان هستند، شناسایی و تعریف می‌شوند. این مدل‌ها به محقق اجازه می‌دهند تا دیدگاهی جامع از رفتار سیستم در طول زمان بدست آورد و بتواند بر اساس آن تحلیل‌های لازم را انجام دهد.

پس از آن، اعتبارسنجی مدل‌ها به منظور اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد آن‌ها حیاتی است. در این مرحله، پژوهشگر باید از معیارهای مختلفی برای ارزیابی مدل‌ها استفاده کند، از جمله بررسی کفایت مرزها، تحلیل ساختار مدل و سازگاری ابعاد آن. اعتبارسنجی مدل‌ها نقش مهمی در اطمینان از این دارد که مدل مورد استفاده قادر به شبیه‌سازی رفتار واقعی سیستم است و می‌تواند به عنوان ابزاری معتبر برای پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، استفاده از نرم‌افزارهایی مانند ونسیم به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که مدل‌های پویایی‌شناسی خود را به راحتی طراحی و تحلیل کنند و نتایج را به صورت گرافیکی مشاهده نمایند. این نرم‌افزار به دلیل رابط کاربری آسان و ابزارهای قدرتمندش، به یکی از ابزارهای محبوب در فرایند مدل‌سازی سیستم‌های دینامیک تبدیل شده است (زالکلی و همکاران ۲۰۱۷).

به طور خلاصه روش‌شناسی پژوهش در این مطالعه به صورت گام به گام طراحی شده است. ابتدا مسئله مورد نظر به دقت تعریف می‌شود و سپس فرضیات پویا برای تحلیل رفتار سیستم ایجاد می‌گردد. در این مرحله، لازم است که از روش‌های مناسب برای مدل‌سازی و تحلیل استفاده شود. در ادامه به تشریح گام‌های اصلی پژوهش پرداخته می‌شود.

## تشریح گام‌ها

### ○ تعریف مسئله

تعریف مسئله یکی از مراحل کلیدی در پژوهش‌های علمی است و در واقع بنیاد و چارچوب سایر مراحل پژوهش را شکل می‌دهد. در این مرحله، پژوهشگر با دقت به شناسایی و تحلیل مسئله‌ای می‌پردازد که نیاز به بررسی و تحلیل عمیق دارد. برای شروع، می‌توان به سوالات اساسی پاسخ داد تا دامنه و ماهیت مسئله به روشنی مشخص شود. این سوالات ممکن است شامل مواردی همچون: "مسئله چیست؟"، "چرا این مسئله اهمیت دارد؟"،

"دینامیک‌سازی این مسئله چقدر اهمیت دارد؟"، و "چه عواقبی نتایج این مسئله بر سیستم یا زیرسیستم‌ها خواهد داشت؟" باشد (کانتی و همکاران ۲۰۱۷).

در این مرحله، پژوهشگر همچنین باید به شناسایی عوامل تاثیرگذار بر رفتار سیستم بپردازد. این عوامل می‌توانند شامل متغیرهای فیزیکی، اقتصادی، اجتماعی، یا حتی تکنولوژیکی باشند که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر رفتار سیستم تاثیر می‌گذارند. برای مثال، اگر مسئله مربوط به تحلیل تولید یک کارخانه باشد، عواملی همچون تعداد نیروی کار، میزان مواد اولیه، روش‌های تولید و حتی شرایط بازار می‌توانند بر رفتار سیستم تاثیرگذار باشند. در این راستا، تهیه و تدوین «نقشه ذهنی» یا «نمودارهای تحلیلی» می‌تواند به فهم بهتر مسئله و روابط بین عوامل کمک کند.

در ادامه، پژوهشگر باید نتایج مورد انتظار از تحلیل مسئله را مشخص کند. این نتایج می‌تواند شامل پیش‌بینی‌های رفتار سیستم در شرایط مختلف، شناسایی نقاط قوت و ضعف سیستم، یا پیشنهاد راهکارهای بهبود باشد. در واقع، شفاف‌سازی نتایج کمک می‌کند تا پژوهشگر با هدف و جهت‌گیری روشن‌تری به مراحل بعدی پژوهش بپردازد و همچنین به دیگران (مانند سرمایه‌گذاران، مدیران، یا سایر ذینفعان) امکان می‌دهد تا به خوبی متوجه اهداف و اهمیت پژوهش شوند.

به‌طور خلاصه اولین گام در پژوهش، شناسایی و تعریف دقیق مسئله‌ای است که قرار است مورد تحلیل قرار گیرد. در این مرحله، باید مشخص شود که چه عواملی بر رفتار سیستم تاثیر می‌گذارند و چه نتایجی مورد انتظار است.

## ○ ۲) فرضیات پویا

پس از تعریف دقیق مسئله، گام بعدی تدوین فرضیات پویا است. فرضیات پویا، پیش‌بینی‌هایی هستند که پژوهشگر درباره رفتار سیستم در شرایط خاص یا در پاسخ به تغییرات در متغیرها بیان می‌کند. این فرضیات به‌طور کلی به منظور ایجاد یک چارچوب تحلیلی برای بررسی روابط علت و معلولی در سیستم‌ها طراحی می‌شوند و باید از ویژگی‌ها و شرایط زیر برخوردار باشند:

○ **قابلیت آزمون:** فرضیات باید طوری تدوین شوند که امکان تایید یا رد آن‌ها با استفاده از داده‌های واقعی یا شبیه‌سازی‌های مدل فراهم باشد. این ویژگی به پژوهشگر این امکان را می‌دهد که نتایج را ارزیابی کرده و از صحت آن‌ها مطمئن شود.

○ **رابطه علت و معلولی:** فرضیات باید مربوط به روابط علت و معلولی در سیستم باشند. این بدان معناست که پژوهشگر باید بتواند مشخص کند که چگونه یک تغییر در یک متغیر می‌تواند تغییری در متغیر دیگری ایجاد کند. این روابط می‌توانند به صورت خطی یا غیرخطی، مستقیم یا غیرمستقیم باشند.

○ **بینش و شفافیت:** فرضیات باید به گونه‌ای تدوین شوند که بینش روشنی به رفتار سیستم ارائه دهند. این فرضیات باید روشن و شفاف باشند تا سایر پژوهشگران و ذینفعان بتوانند مفهوم و قیاس آن‌ها را به راحتی درک کنند.

○ **تناسب با داده‌های موجود:** فرضیات باید با داده‌های موجود سازگار باشند و به طور منطقی از چارچوب نظری پژوهش نشأت گرفته باشند. به عبارت دیگر، فرضیات باید مربوط به زمینه تحقیقاتی خاصی باشند و بر اساس مشاهدات و تجربیات قبلی شکل گیرند (کانتی و همکاران ۲۰۱۷).

به طور خلاصه، پس از تعریف مسئله، فرضیات مربوط به رفتار سیستم تدوین می‌شود. این فرضیات باید قابل آزمون و مرتبط با روابط علت و معلولی در سیستم باشند. فرضیات پویا به عنوان یک پل بین مرحله تعریف مسئله و مراحل مدل‌سازی و تحلیل عمل می‌کنند. آن‌ها پایه و اساس تحلیل‌های بعدی را فراهم می‌آورند و به پژوهشگر این امکان را می‌دهند که روابط پیچیده در سیستم را بررسی کرده و به درک بهتری از رفتارهای پیش‌بینی شده دست یابد. انتخاب و طراحی دقیق این فرضیات می‌تواند بر نتیجه نهایی پژوهش تأثیر بسزایی داشته باشد.

## مدل‌سازی

مدل‌سازی یکی از مراحل کلیدی در سیستم دینامیک است. در این مرحله، چندین ابزار و تکنیک برای نمایاندن روابط میان متغیرها به کار گرفته می‌شود.

(۱) **نمودار زیرسیستم‌ها:** در این نمودار، اجزای مختلف سیستم و زیرسیستم‌ها به صورت گرافیکی نمایش داده می‌شوند. نمودار زیرسیستم‌ها ابزاری گرافیکی است که اجزای مختلف یک سیستم و تعاملات آن‌ها را به صورت ساختاریافته نمایش می‌دهد. این نمودارها به پژوهشگران و مهندسان کمک می‌کنند تا بخش‌های مختلف یک سیستم بزرگتر را شناسایی و تجزیه و تحلیل کنند و همچنین نقاط قوت و ضعف هر زیرسیستم را مورد

بررسی قرار دهند. برای ایجاد این نمودارها، معمولاً از اشکال هندسی ساده نظیر دایره‌ها، مستطیل‌ها و خطوط استفاده می‌شود که نشان‌دهنده موجودیت‌ها و ارتباطات بین آن‌ها هستند.

به‌عنوان مثال، در یک سیستم مدیریت زنجیره تأمین، نمودار زیرسیستم‌ها می‌تواند شامل اجزای مختلفی مانند تأمین‌کنندگان، تولیدکننده‌ها، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان باشد. هر یک از این اجزا به‌صورت جداگانه نمایش داده می‌شوند، و خطوط اتصال نشان‌دهنده روابط و تعاملات میان آن‌ها است. این تجزیه و تحلیل به شناخت بهتر نقاط تأثیرگذار بر کل زنجیره تأمین کمک می‌کند و می‌تواند به بهبود عملیات و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی منجر شود.

**۲) روابط علت و معلولی:** این روابط به شناسایی چگونگی تأثیرگذاری یک متغیر بر متغیر دیگر کمک می‌کند. روابط علت و معلولی به شناسایی و تحلیل اینکه چگونه یک تغییر در یک متغیر می‌تواند تأثیراتی بر سایر متغیرها داشته باشد، می‌پردازد. این روابط به شناخت متقابل میان متغیرها و همچنین تعیین روابط وابستگی بین آن‌ها کمک می‌کند. در سیستم دینامیک، این روابط معمولاً در قالب نمودارهای علت و معلولی نمایش داده می‌شوند و به پژوهشگر امکان می‌دهند تا چرخه‌های بازخوردی و اثرات زنجیره‌ای<sup>۱</sup> را بررسی کند (عبدالقواد، ۲۰۲۳).

برای نمونه، در یک سیستم اقتصادی، می‌توان رابطه‌ای میان «نرخ بیکاری» و «نرخ تولید» را بررسی کرد. در این مورد، افزایش نرخ بیکاری می‌تواند منجر به کاهش تقاضا برای کالاها و خدمات شود که در نهایت به کاهش نرخ تولید منجر می‌گردد. این کاهش نرخ تولید مجدداً به افزایش بیکاری کمک می‌کند و بدین ترتیب یک چرخه منفی ایجاد می‌کند. شناخت این روابط به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا از آثار منفی متقابل و زنجیره‌ای جلوگیری کنند (حجازین و همکاران ۲۰۲۱).

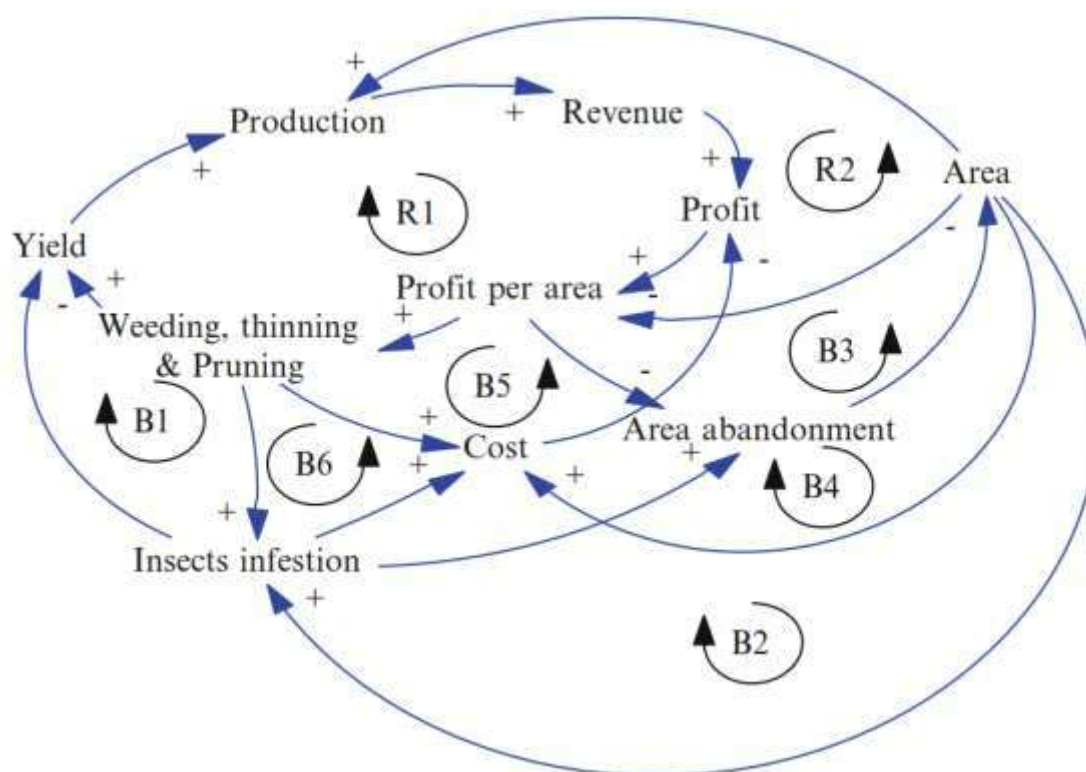
**۳) نمودار حلقه‌های علت معلولی:** این نمودارها نشان‌دهنده روابط بازخوردی در سیستم هستند که می‌توانند منجر به تغییرات در رفتار سیستم شوند. نمودار حلقه‌های علت معلولی، یک نمای گرافیکی است که روابط بازخوردی و تأثیرات متقابل میان متغیرها را نشان می‌دهد. این نمودارها به‌ویژه در سیستم‌های دینامیک کاربرد دارند، زیرا نشان‌دهنده نحوه تأثیرگذاری یک تغییر بر دیگر متغیرها و همچنین چگونگی ایجاد چرخه‌های

---

<sup>۱</sup>Cascading

بازخورد مثبت یا منفی هستند. نمودارهای حلقه‌های علت معلولی معمولاً با استفاده از پیکان‌های نشان‌دهنده جهت تأثیر به همراه علامت‌گذاری مثبت (+) و منفی (-) برای نشان دادن نوع تأثیر، رسم می‌شوند.

به عنوان مثال، در یک سیستم اکولوژیکی، می‌توان مدلی از اثرات جمعیت شکارچیان و طعمه را بیان کرد. افزایش جمعیت شکارچیان منجر به کاهش جمعیت طعمه می‌شود، که این کاهش به نوبه خود می‌تواند منجر به کاهش جمعیت شکارچیان شود. این نوع روابط به صورت یک حلقه منفی (کاهش) نشان داده می‌شود که در آن تعدادی از متغیرها به صورت متقابل بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند تا یک وضعیت متعادل برقرار شود (قربان و همکاران ۲۰۲۴).



شکل ۱: نمودار حلقه علت و معلولی سیستم دینامیک تولید کاکائو (کانتی و همکاران ۲۰۱۷).

۴) مدل حالت جریان: مدل حالت جریان، به نمایش و تحلیل جریان‌ات مختلف (مواد، اطلاعات یا انرژی) میان اجزای مختلف یک سیستم اشاره دارد. این مدل به طور خاص به شناخت چگونگی حرکت و تغییر وضعیت متغیرها در طول زمان کمک می‌کند. در این نوع مدل‌سازی، به طور معمول از نشانگرهایی مانند "حالت‌ها" (مقادیر موجود در سیستم) و "نرخ‌ها" (سرعت تغییر حالت‌ها) استفاده می‌شود (دنگ و همکاران ۲۰۲۳).

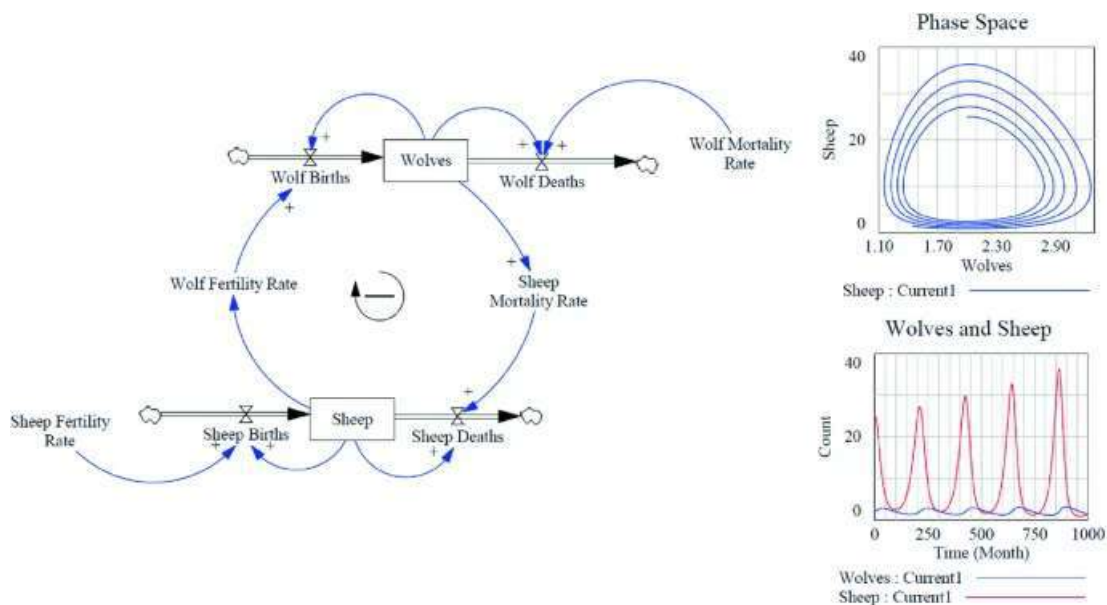
به عنوان مثال، در یک سیستم آبرسانی شهری، مدل حالت جریان می تواند شامل وضعیت آب در مخازن، لوله کشی ها و نقاط مصرف (مثل منازل) باشد. جریانات آب (ورود و خروج آب) در این سیستم به روشنی نشان دهنده تغییرات حجم آب در مخازن و توزیع آن در شبکه لوله کشی است. در این مدل، پژوهشگر می تواند با تعریف وضعیت های متفاوت (حجم آب در مخزن) و نرخ های جریان (سرعت پمپاژ آب)، رفتار سیستم در شرایط مختلف را شبیه سازی کند.

مثال دیگری در این زمینه، مدل حالت جریان گرگ و گوسفند می باشد (لین و همکاران ۲۰۲۰): مدل حالت جریان گرگ و گوسفند یکی از مدل های شناخته شده در نظریه سیستم های دینامیک و شبیه سازی است که معمولاً برای مطالعه و تحلیل تعاملات بین دو جمعیت (گرگ ها و گوسفند ها) به کار می رود. این مدل به بررسی دینامیک و تغییرات جمعیتی این دو گونه در یک بوم سازگان خاص می پردازد و می تواند به ما کمک کند تا درک بهتری از تعادل های اکولوژیکی و اثرات متقابل بین شکارچی و شکار را به دست آوریم (کاستاس و همکاران ۲۰۱۲).

مدل حالت جریان گرگ و گوسفند به طور کلی از روابط زیر پیروی می کند:

- تولید مثل گوسفند ها: تعداد گوسفند ها با نرخ تولید مثل آن ها افزایش می یابد.
- مرگ و میر گوسفند ها: تعداد گوسفند ها با نرخ مرگ و میر آن ها و همچنین با نرخ شکار شدن توسط گرگ ها کاهش می یابد.
- تولید مثل گرگ ها: تعداد گرگ ها به تعداد گوسفند های موجود بستگی دارد؛ هرچه تعداد گوسفند ها بیشتر باشد، غذای بیشتری برای گرگ ها وجود دارد و بنابراین نرخ تولید مثل گرگ ها افزایش می یابد.
- مرگ و میر گرگ ها: اگر تعداد گوسفند ها کاهش یابد، تأمین غذا برای گرگ ها سخت تر می شود و در نتیجه تعداد گرگ ها نیز کاهش می یابد.

مدل حالت جریان گرگ و گوسفند به ما کمک می کند تا به طور سیستماتیک و علمی به بررسی و تحلیل تعاملات پیچیده بین شکارچی و شکار پردازیم و درک بهتری از رفتار های جمعیتی و اکولوژیکی به دست آوریم. این مدل می تواند در زمینه های مختلفی از جمله مدیریت منابع طبیعی، حفاظت از محیط زیست و برنامه ریزی اکولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد (کاستاس و همکاران ۲۰۱۲).



شکل ۱: سمت راست بالا نشان دهنده رابطه فازی علت و معلولی بین جمعیت گرگ و گوسفند است. نمودار پایین سمت راست نشان دهنده سری زمانی جمعیت گرگ و گوسفند است. شکل سمت چپ خروجی نرم افزار ونسیم در مدل حالت جریان گرگ و گوسفند می باشد (لین و همکاران ۲۰۲۰).

(۵) **متغیرهای حالت:** متغیرهای حالت نمایانگر وضعیت‌های موجود در سیستم هستند و معمولاً به تغییرات در طول زمان پاسخ می‌دهند. این متغیرها به عنوان نماینده‌هایی برای ذخایر، ظرفیت‌ها و مقادیر کلیدی در سیستم عمل می‌کنند. اندازه‌گیری متغیرهای حالت به پژوهشگران امکان می‌دهد تا وضعیت کنونی سیستم را درک کرده و تغییرات ایجاد شده را ثبت کنند.

به عنوان مثال، در یک کارخانه تولیدی، متغیرهای حالت می‌توانند شامل موجودی مواد اولیه، تعداد دستگاه‌های فعال یا تعداد کارگران در خط تولید باشند. با توجه به تغییرات در این متغیرها، مدیران می‌توانند تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تری در مورد بهینه‌سازی تولید و هماهنگی موجودی مواد اولیه اتخاذ کنند. به همین دلیل، اندازه‌گیری و نظارت بر این متغیرها برای عملکرد بهینه سیستم ضروری است.

(۶) **متغیرهای نرخ:** متغیرهای نرخ، نمایانگر سرعت تغییر متغیرهای حالت به صورت خاص هستند و به نوعی نشان‌دهنده جریان‌ها و حرکات در سیستم می‌باشند. این متغیرها معمولاً به صورت نرخ‌های افزایش یا کاهش تغییر وضعیت‌ها تعریف می‌شوند و در نتیجه می‌توانند تأثیرات لحظه‌ای و آنی بر رفتار کلی سیستم داشته باشند. متغیرهای نرخ مجرای ارتباطی میان متغیرهای حالت و جریان‌ها هستند.

به عنوان مثال، در یک سیستم تولید انرژی، متغیرهای نرخ می توانند شامل نرخ تولید برق، نرخ کارایی تجهیزات، یا نرخ مصرف سوخت باشند. در این سیستم، افزایش نرخ تولید برق ممکن است به تغییر در رفتار مصرف سوخت منجر شود، به طوری که با افزایش بار مصرفی، نیاز به تولید بیشتر برق احساس می شود. این تعاملات بین متغیرهای حالت و نرخ به مدیران امکان می دهد تا برنامه ریزی های دقیق تری انجام دهند و نسبت به شرایط متغیر سیستم واکنش مناسب نشان دهند.

(۷) **متغیرهای کمکی و سایه ای:** متغیرهای کمکی و سایه ای به عنوان ابزارهایی برای تسهیل در تحلیل و مدل سازی رفتار سیستم به کار می روند. متغیرهای کمکی معمولاً به منظور جذب یا تعدیل اثرات برخی دیگر از متغیرها وارد مدل می شوند و ممکن است به بهبود شفافیت و تحلیل رفتار کلی سیستم کمک کنند. متغیرهای سایه ای نیز مانند متغیرهای کمکی به شناخت و مدل سازی بهتر کمک می کنند، اما معمولاً به عنوان مقادیر داخلی و غیر قابل مشاهده در نظر گرفته می شوند.

برای نمونه، در یک سیستم سلامت عمومی، متغیرهای کمکی می توانند شامل عواملی مانند "آگاهی عمومی از بیماری ها" یا "دسترسی به خدمات بهداشتی" باشند. این متغیرها به جریان اطلاعات و درک عمومی از مسیرهای مختلف پیشگیری و درمان بیماری ها کمک می کنند. در حالی که متغیرهای سایه ای ممکن است به سادگی نشان دهنده خصوصیات غیر قابل مشاهده ای مانند "شعارهای عمومی" یا "میزان استرس جامعه" باشند که مستقیماً نمی توانند اندازه گیری شوند اما تأثیرات آن ها بر رفتار کلی سیستم کاملاً واضح و محسوس است (ارشادی و همکاران ۲۰۲۴).

### اعتبارسنجی مدل های پویایی شناسی سیستم ها

اعتبارسنجی مدل ها به منظور اطمینان از دقت و کارایی آن ها در پیش بینی رفتار سیستم ضروری است. در این مرحله، چندین معیار برای ارزیابی مدل ها به کار گرفته می شود:

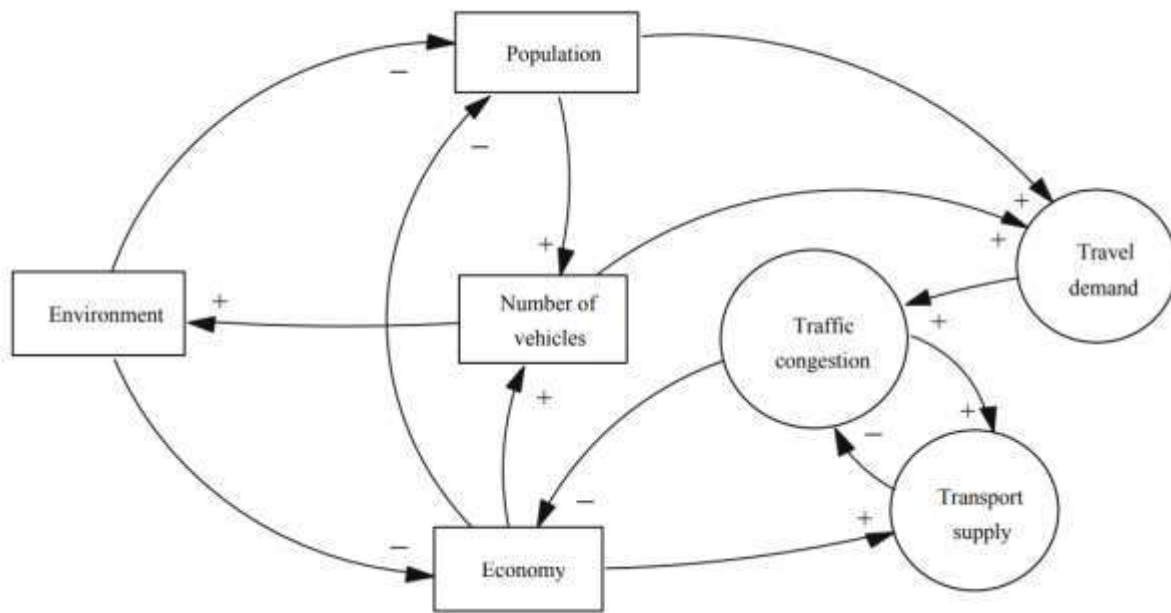
(۱) **کفایت مرزها:** کفایت مرزها به بررسی این موضوع می پردازد که آیا مدل در تعریف مرزهای سیستم به درستی عمل کرده است یا خیر. این معیار اهمیت زیادی دارد چرا که مرزهای مدل تعیین کننده آن دسته از جزئیاتی هستند که در مدل گنجانده شده و همچنین جزئیات نادیده گرفته شده نیز در این دسته می باشند. بررسی کفایت مرزها کمک می کند تا مشخص شود آیا تمامی عوامل و معیارهای مهم که می توانند بر رفتار سیستم تأثیر

بگذارند، در مدل لحاظ شده‌اند یا خیر. بررسی اینکه آیا تمامی عوامل و متغیرهای مؤثر بر تخریب و بهسازی زیرساخت‌ها در مدل لحاظ شده‌اند یا خیر، از اهمیت بالایی برخوردار است (راشدی و همکاران ۲۰۱۵). در واقع، این معیار امکان شناسایی نقاط ضعف و نواقص در دامنه مدل را فراهم می‌آورد و به پژوهشگر این امکان را می‌دهد تا اطمینان حاصل کند که مدل به‌طور کامل شرایط واقعی را منعکس می‌کند (راشدی و همکاران ۲۰۱۵).

به عنوان مثال، فرض کنید که در حال مدلسازی یک سیستم زنجیره تأمین هستید. اگر در این مدل تنها عوامل داخلی مانند تولید و توزیع را در نظر بگیرید و عوامل محیطی همچون تأثیرات بازار، تغییرات قیمتی و رقابت را نادیده بگیرید، کفایت مرزها دچار نقص خواهد شد. برای اجتناب از این مشکل، باید مرزهای سیستم را گسترش داد تا شرایط واقعی بازار و تأثیرات خارجی به‌طور مناسب‌تری در مدل لحاظ شوند.

۲) **ارزیابی ساختار:** تحلیل ساختار مدل برای اطمینان از صحت روابط علت و معلولی است. ارزیابی ساختار به تجزیه و تحلیل روابط و تعاملات بین متغیرها در مدل می‌پردازد. این ارزیابی شامل بررسی این است که آیا ساختار مدل به‌طور منطقی و صحیحی روابط علت و معلولی بین اجزای سیستم را نشان می‌دهد یا خیر. ساختار مدل باید قادر باشد رفتار سیستم را پیش‌بینی کند و همچنین چگونگی تأثیر تغییرات در متغیرهای ورودی بر خروجی‌ها را نمایش دهد. این بررسی همچنین شامل استفاده از نمودارهای ساختاری، مانند نمودارهای حلقه علت و معلولی، برای تأیید صحت منطقی ساختار سیستم است.

به عنوان مثال، در مطالعه‌ای درباره سیستم حمل‌ونقل شهری، فرض کنید که روابط علت و معلولی بین تعداد خودروها، ترافیک و زمان سفر به‌درستی مدلسازی نشده است. به عنوان مثال، اگر زمان سفر به عنوان علت در نظر گرفته شود در حالی که واقعاً یک متغیر وابسته است، این ساختار اشتباه باعث خواهد شد که نتایج مدل نادرست باشد. برای اصلاح این موضوع، باید روابط درست بین متغیرها شناسایی و وارد مدل شوند (وانگ و همکاران ۲۰۰۸). شکل ۳ نمونه ارزیابی ساختار و رابطه علت و معلولی یک سیستم دینامیک حمل و نقل شهری را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: ارزیابی ساختار و رابطه علت و معلولی متغیرهای سیستم دینامیک حمل و نقل شهری (وانگ و همکاران ۲۰۰۸).

۳) **سازگاری ابعاد:** اطمینان از این که تمامی ابعاد مدل با یکدیگر سازگار هستند. سازگاری ابعاد به مفهوم این است که آیا ابعاد و مقیاس‌های مختلف در مدل به‌طور معقول و منطقی با یکدیگر مرتبط هستند یا خیر. این معیار ضرورت دارد تا اطمینان حاصل شود که تمامی متغیرها و پارامترها با یکدیگر سازگاری دارند و مدل نمی‌تواند به خاطر تغییرات در مقیاس‌ها به نتایج نادرست برسد. برای مثال، اگر واحدهای مختلف (مانند طول، زمان و دما) در یک مدل به درستی مدیریت نشوند، ممکن است نتایج غیر منطقی و غیر واقعی به وجود آید. بررسی سازگاری ابعاد به پژوهشگر این امکان را می‌دهد که از صحت و اعتباری که مدل به‌واسطه استفاده از واحدهای صحیح دارد، اطمینان حاصل کند.

به عنوان مثال، در یک مدل اقتصادی که شامل پارامترهای تولید (مثل تعداد تولیدات در یک دوره) و قیمت‌گذاری (در واحد پول) می‌شود، اگر مقادیر تولید به‌صورت میلیون واحد و قیمت‌ها به‌صورت دلار باشد، سازگاری ابعاد ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد. اگر از مقادیر مختلف برای واحدها استفاده شود، ممکن است نتایج غیر منطقی به دست آید و این مسئله به تحلیل‌های نادرست و بی‌دقت منجر شود. بنابراین، نیاز است که تمامی پارامترها با یکدیگر سازگار باشند.

۴) **ارزیابی پارامترها:** بررسی این که پارامترهای مورد استفاده در مدل واقع گرایانه و دقیق هستند. ارزیابی پارامترها به بررسی سطوح و مقادیر پارامترهای ورودی در مدل مربوط می شود. این ارزیابی به پژوهشگران کمک می کند تا درک بهتری از تأثیر پارامترهای کلیدی بر نتایج کلی مدل به دست آورند. بررسی و تحلیل پارامترها این امکان را فراهم می کند که مشخص شود آیا مقادیر انتخاب شده برای پارامترها منطقی و مبتنی بر داده های واقعی و معتبر هستند یا خیر. همچنین، این ارزیابی می تواند به شناسایی پارامترهای بحرانی که ممکن است باعث ایجاد تغییرات شدید در رفتار سیستم شوند، کمک می کند.

به عنوان مثال، در یک مدل کشاورزی که به شبیه سازی تأثیرات آب و هوا بر تولید محصولات می پردازد، ارزیابی پارامترها می تواند شامل بررسی دما، بارش و نوع خاک باشد. اگر دما به عنوان ۱۰۰ درجه فارنهایت لحاظ شود در حالی که دماهای واقعی نمی توانند به این مقدار برسند، نتایج مدل به طور غیر واقعی ارائه خواهند شد. بنابراین، باید اطمینان حاصل شود که پارامترها بر اساس داده های واقعی و قابل اعتماد تعریف شوند (مارتینز و همکاران ۲۰۲۳).

۵) **شرایط نهایی:** تحلیل اینکه مدل در شرایط نهایی چه رفتاری از خود نشان می دهد. شرایط نهایی به بررسی رفتار سیستم در هنگام رسیدن به وضعیت پایدار یا تعادل می پردازد. این معیار ضرورت دارد تا اطمینان حاصل شود که مدل توانایی شبیه سازی وضعیت های پایانی واقعی را دارد و بررسی کند که آیا رفتار در این شرایط متناسب و منطقی است یا خیر. این ارزیابی معمولاً شامل تحلیل از شرایط مرزی و شناسایی آثار مختلف بر رفتار سیستم در بلندمدت است. شناسایی شرایط نهایی به پژوهشگران این امکان را می دهد که پیش بینی دقیق تری از وضعیت آینده سیستم داشته باشند و همچنین نحوه انطباق سیستم با تغییرات مختلف را بررسی کنند.

به عنوان مثال، فرض کنید که در حال مدل سازی رفتار یک اکوسیستم می باشید. اگر بررسی کنید که آیا این اکوسیستم به حالت پایدار (تعادل) رسیده است یا خیر، می توان مشاهده کرد که آیا جمعیت گونه های موجود در اکوسیستم به یک مقدار ثابت می رسند یا خیر. اگر پس از شبیه سازی، جمعیت گونه ها به طور مداوم در حال افزایش یا کاهش باشد و به حالتی متعادل نرسد، باید مدل مجدداً بررسی و اصلاح شود (ژو و همکاران ۲۰۲۰).

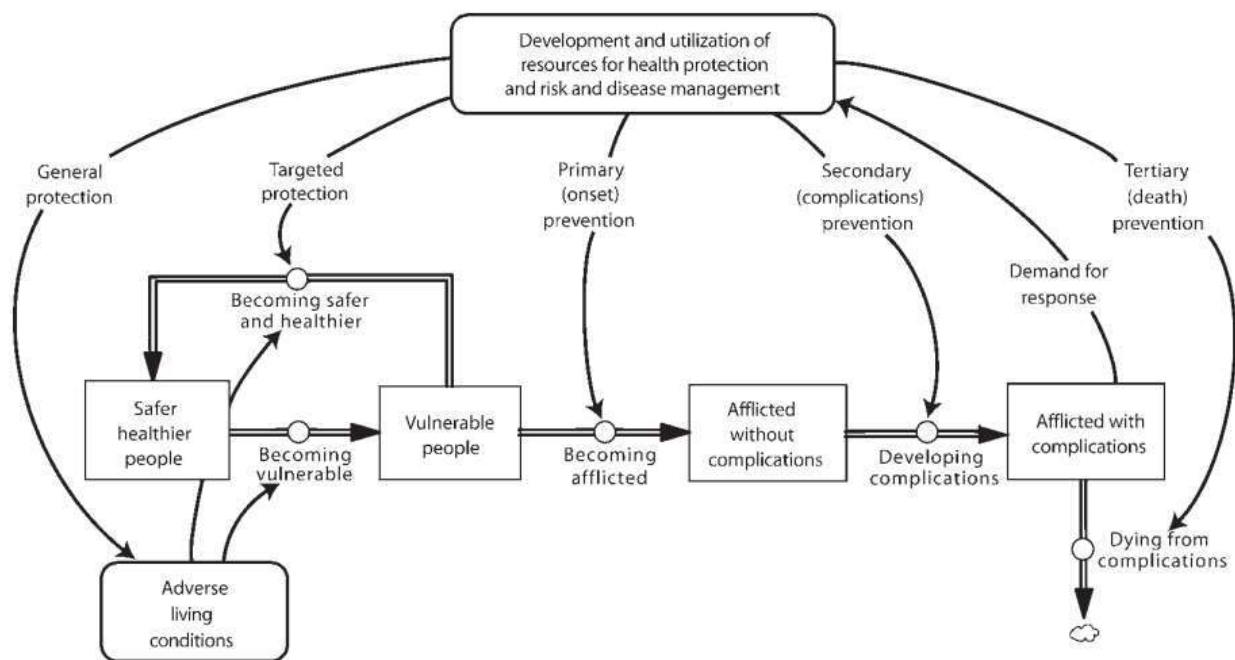
۶) **خطای انتگرال:** بررسی دقت انتگرال گیری در مدل. خطای انتگرال به اندازه گیری دقت پیش بینی های مدل در طول زمان پرداخته و به بررسی انحرافات بین نتایج مدل و داده های واقعی می پردازد. این معیار به خصوص برای مدل هایی که از روش های انتگرال گیری استفاده می کنند اهمیت دارد. با کاهش خطای انتگرال، می توان

اطمینان حاصل کرد که مدل عملکرد صحیحی دارد و تغییرات پیش‌بینی شده به‌طور معقولی با نتایج مشاهده‌شده مطابقت دارد. این ارزیابی می‌تواند به بهبود مستمر مدل و به‌روز کردن پارامترها کمک کند.

به عنوان مثال، در ارزیابی یک مدل مربوط به پیش‌بینی تقاضای انرژی در یک منطقه، محقق ممکن است متوجه شود که مدل با نتایج واقعی انحراف زیادی دارد. برای مثال، اگر خطای انتگرال محاسبه شده نشان دهد که تفاوت میان پیش‌بینی‌ها و داده‌های واقعی در طول زمان افزایش می‌یابد، این نشان‌دهنده این است که مدل در پیش‌بینی تقاضای واقعی کارآمد نیست و نیاز به تعدیل دارد (دهقان و همکاران ۲۰۲۱).

(۷) **اعضای خانواده:** تحلیل ساختار خانواده‌ای مدل برای شناسایی رفتارهای مشابه. اعضای خانواده به گروه‌های مختلف مدل‌ها اشاره دارد که دارای ساختار یا ویژگی‌های مشترکی هستند. این اعضای خانواده معمولاً در زمینه‌های مختلف شبیه‌سازی رفتاری که بر اساس یک اصل یا الگوی واحد ساخته شده‌اند، به کار می‌روند. ارزیابی بستگی و تناسب بین اعضای خانواده به پژوهشگران کمک می‌کند تا بهترین مدل را برای شرایط خاص و نیازهای خود انتخاب کنند. این بررسی می‌تواند باعث شناسایی مدل‌های قابل استفاده در زمینه‌های مشابه شود که به‌طور خاص توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم را داشته باشند، و همچنین کمک می‌کند تا از تجربیات قبلی در بهینه‌سازی و اعتبارسنجی مدل جدید استفاده شود.

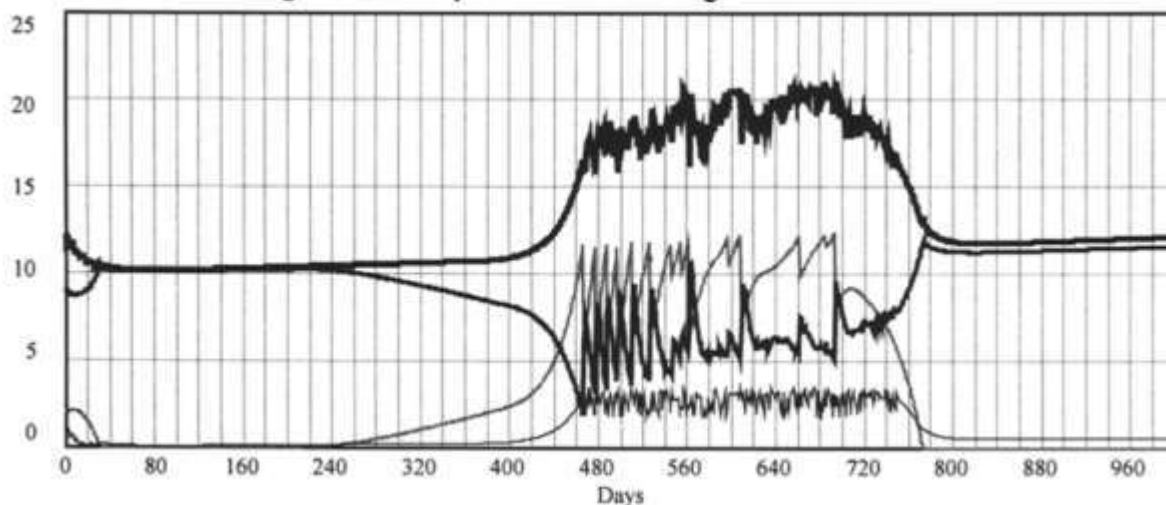
به عنوان مثال، در یک مطالعه درباره سیستم‌های بهداشتی، هر الگوریتم مختلفی که به مدل‌سازی گسترش‌پذیری بیماری‌ها پرداخته، می‌تواند به‌عنوان عضوی از خانواده‌ای خاص در نظر گرفته شود. اگر یکی از این مدل‌ها به‌طور خاص در شبیه‌سازی داده‌ها کارآمد و مدل دیگر نه، محققین می‌توانند از ویژگی‌ها و ساختار مدل موفق‌تر برای بهبود خانواده مدل‌های دیگر استفاده کنند (هومر و همکاران ۲۰۰۶). شکل ۴ نمونه تحلیل ساختار خانواده‌ای یک مدل دینامیک در رابطه با سلامت جامعه و طیف خانواده‌های ممکن را نمایش می‌دهد.



شکل ۴: نمونه تحلیل ساختار خانواده‌ای مدل داینامیک سلامت جامعه و طیف خانواده‌های ممکن (هومر و همکاران ۲۰۰۶).  
مستطیل های گرد روابط علت و معلولی چند بعدی را نشان می‌دهند.

۸) رفتار عجیب: شناسایی و تحلیل رفتارهای غیرمنتظره در سیستم. رفتار عجیب به مطالعه موارد غیرمنتظره و ناهنجاری‌های مشاهده‌شده در نتایج مدل اشاره دارد. اگر مدل نتایج غیر منطقی یا غیرقابل پیش‌بینی ارائه دهد، آن را می‌توان به عنوان رفتار عجیب توصیف کرد. این رفتارها معمولاً نشان‌دهنده نقص‌هایی در طراحی، فرضیات ناکافی یا نادرست و عدم تطابق بین ساختار مدل و واقعیت هستند. شناسایی و تحلیل این رفتارها به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که نقاط ضعف مدل خود را تشخیص دهند و از آن برای بهبود و اعتبارسنجی بهتر مدل استفاده کنند. این ارزیابی کمک می‌کند تا از بروز خطاهای غیرنظام‌مند در مدل جلوگیری شود و از نتایج نادرست پرهیز شود.

به عنوان مثال، در یک مدل مربوط به بازار سهام، شاید یک رفتار عجیب مشاهده شود که در آن قیمت سهام به طور ناگهانی به میزان فراوانی افزایش یابد یا کاهش یابد. اگر این تغییرات بدون هیچ دلیلی مشخص رخ دهد، ممکن است نشان‌دهنده وجود نقص در مدل باشد. پژوهشگران باید این رفتار را شناسایی کرده و دلایل آن را بررسی کنند تا مطمئن شوند که مدل به درستی واقعیت بازار را نمایان می‌کند (کانچ و همکاران ۲۰۰۰).



شکل ۵: نمونه رفتار عجیب بازار سهام ریسک بهره در بازه خاص (کانچ و همکاران ۲۰۰۰).

۹) **تحلیل حساسیت:** بررسی تاثیر تغییرات کوچک در پارامترها بر نتایج مدل. تحلیل حساسیت به بررسی اینکه چگونه تغییرات در پارامترها و متغیرهای ورودی می‌تواند بر خروجی‌های مدل تأثیر بگذارد، می‌پردازد. این تحلیل به شناسایی متغیرهای کلیدی کمک می‌کند که بیشترین تأثیر را بر نتایج کلی مدل دارند و می‌تواند به پژوهشگران با اهمیت زیادی کمک کند تا درک بهتری از پایداری و حساسیت مدل خود داشته باشند. تحلیل حساسیت می‌تواند شامل تغییر تدریجی پارامترها و بررسی تأثیر آن‌ها بر خروجی مدل باشد و به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مفید است، زیرا به شناسایی جنبه‌های بحرانی و نیاز به توجه بیشتر اشاره می‌کند.

به عنوان مثال، در یک مدل اقتصاد کلان، اگر نرخ بهره به عنوان یک پارامتر اصلی شبیه‌سازی شود، تحلیل حساسیت می‌تواند نشان دهد که تغییر یک درصدی نرخ بهره چگونه آن را به تغییرات موثر در رشد اقتصادی منجر می‌شود. این تحلیل کمک می‌کند تا مشخص شود که کدام پارامترها بیشتر بر روی نتایج مدل تأثیر دارند و مدیران تصمیم‌گیرنده باید کدام یک از این پارامترها را بیشتر مورد توجه قرار دهند.

۱۰) **تولید مجدد رفتار:** اطمینان از این که مدل می‌تواند رفتارهای واقعی سیستم را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کند. تولید مجدد رفتار به توانایی مدل در تولید نتایج مشابه در شرایط مشابه اشاره دارد. این معیار به‌خصوص اهمیت دارد زیرا بررسی می‌کند که آیا مدل توانایی شبیه‌سازی تولیدات مشابه در زمان‌های مختلف یا در شرایط مشابه را دارد یا خیر. این ارزیابی به پژوهشگران اطمینان می‌دهد که مدل به‌طور مستمر و پایدار عمل می‌کند و

به‌ویژه در پژوهش‌های علمی و کاربردی که به قابلیت تکرار نتایج نیاز دارند، یک معیار کلیدی محسوب می‌شود. توانایی تولید مجدد رفتار نشان‌دهنده اعتبار و قابلیت اطمینان مدل در پیش‌بینی رفتار سیستم در بلندمدت است. به عنوان مثال، در یک مدل مربوط به کنترل آلاینده‌ها در یک رودخانه، اگر نتایج مدل در شبیه‌سازی‌های مختلف نتایج مشابهی را نشان دهد و رفتار مشابهی را در شرایط مشابه تقلید کند، این بدین معنی است که مدل توانایی تولید مجدد رفتار را دارد. اگر در دو موقعیت مختلف، رفتار نسبت به افزایش مقدار آلاینده‌ها به‌طور مشابه پیش‌بینی شود، این نشان‌دهنده اعتبار و دقت مدل است (موسوی و همکاران ۲۰۲۳).

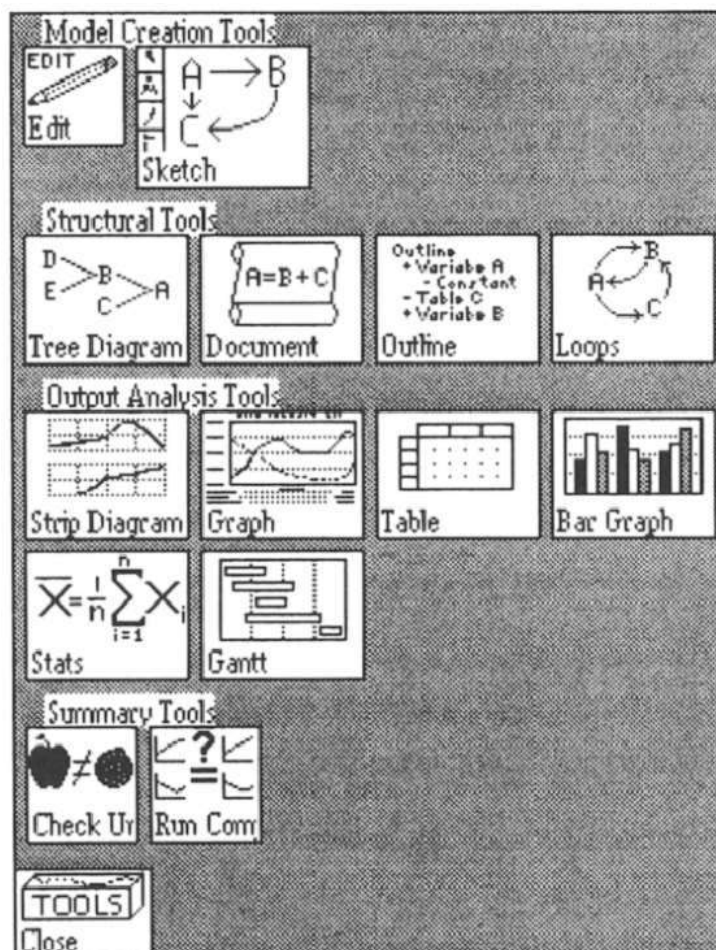
### معرفی نرم‌افزار ونسیم

نرم‌افزار ونسیم یکی از ابزارهای پیشرفته در زمینه مدل‌سازی سیستم دینامیک است که به پژوهشگران و مهندسان کمک می‌کند تا رفتار سیستم‌های پیچیده را شبیه‌سازی و تحلیل کنند. این نرم‌افزار با ارائه رابط کاربری آسان و ابزارهای قدرتمند، امکان طراحی و تحلیل مدل‌های پویایی‌شناسی را فراهم می‌آورد. کاربران می‌توانند با استفاده از ونسیم، مدل‌های خود را به‌راحتی ایجاد و آزمایش کنند و نتایج را به‌طور گرافیکی مشاهده نمایند (زالکلی و همکاران ۲۰۱۷).

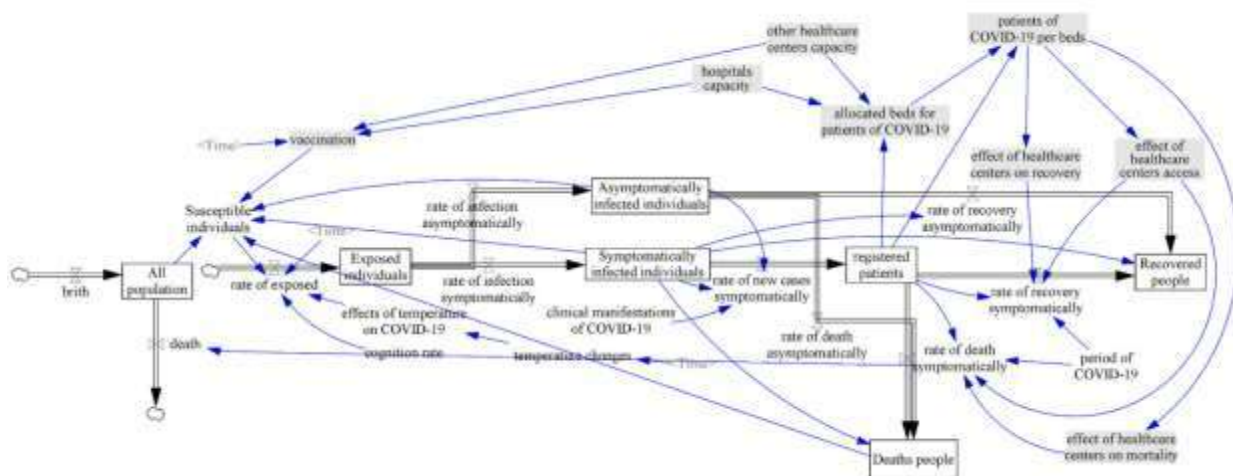
### قدمت نرم‌افزار

نرم‌افزار کاربردی و جامع ونسیم یکی از محصولات نرم‌افزاری است که به‌منظور مدیریت و بهینه‌سازی فرآیندهای مالی و حسابداری در سازمان‌ها و شرکت‌ها طراحی شده است. این نرم‌افزار به‌ویژه در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد و توانسته است با ارائه امکانات متنوع، نیازهای مختلف کاربران در حوزه‌های مالی، حسابداری، فروش، انبارداری و منابع انسانی را پوشش دهد. قدمت نرم‌افزار ونسیم به سال‌های ابتدایی دهه ۸۰ شمسی برمی‌گردد. این نرم‌افزار با هدف تسهیل فرآیندهای مالی و حسابداری و کاهش خطاهای انسانی در انجام محاسبات مالی و اداری طراحی شد. با گذشت زمان و با توجه به نیازهای روزافزون بازار و تغییرات فناوری، این نرم‌افزار به‌روزرسانی‌های متعددی را تجربه کرده و امکانات جدیدی به آن افزوده شده است. نسخه‌های جدید ونسیم علاوه بر بهبود عملکرد و کارایی، تلاش کرده‌اند تا رابط کاربری بهتری را برای کاربران فراهم کنند و همچنین با توجه به تغییرات قانونی و مالیاتی، فرآیندهای مربوط به ثبت و گزارش‌گیری را به‌روز نمایند. این نرم‌افزار به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در مدیریت منابع مالی در بسیاری از سازمان‌ها و شرکت‌های ایرانی شناخته می‌شود. در

نهایت، موفقیت ونسیم در بازار نرم‌افزارهای مالی و حسابداری به دلیل انعطاف‌پذیری، کاربرپسند بودن و قابلیت‌های جامع آن است که توانسته است نیازهای مختلف کاربران را به خوبی برآورده سازد.



شکل ۶: امکانات جعبه ابزار و قدمت نرم افزار ونسیم (رابرت و همکاران ۱۹۹۲).



شکل ۷: تصویری از محیط نرم افزار ونسیم در سیستم داینامیک مراقبت‌های بهداشتی پیرامون کوئید ۱۹ در ایران (اشراقی و همکاران ۲۰۲۴).

## خلاصه مراحل روش‌شناسی پژوهش در سیستم‌های داینامیک

جدول ۱ خلاصه مراحل روش‌شناسی پژوهش در سیستم‌های داینامیک را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ به صورت مختصر و مفید مراحل مختلف روش‌شناسی پژوهش در سیستم‌های داینامیک را همراه با ارزش هر مرحله و یک مثال کاربردی برای هرکدام نمایش می‌دهد. ابتدا، مرحله تعریف مسئله به عنوان بنیان‌گذاری پژوهش با شناسایی دقیق مشکل کاهش فروش در یک فروشگاه خرده‌فروشی ارائه شده است. سپس، در مرحله فرضیات پویا، تدوین فرضیاتی که قابل آزمون باشند و مرتبط با روابط علت و معلولی، با فرضیه کاهش سود دائمی به دلیل تخفیف‌های مکرر مطرح شده است. مدل‌سازی با استفاده از ابزارها و تکنیک‌های مختلف برای نمایاندن روابط میان متغیرها با مثالی از مدل‌سازی رفتار مشتریان و تأثیر تبلیغات بر فروش ادامه می‌یابد. نمودار زیرسیستم‌ها، روابط علت و معلولی، نمودار حلقه‌های علت معلولی، مدل حالت جریان، متغیرهای حالت و نرخ، و متغیرهای کمکی و سایه‌ای نیز به ترتیب با هدف بهبود دقت و کارایی مدل‌سازی و شناسایی نقاط کلیدی سیستم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اعتبارسنجی مدل‌ها با مقایسه پیش‌بینی‌ها و داده‌های واقعی، کفایت مرزها، ارزیابی ساختار، سازگاری ابعاد، ارزیابی پارامترها، و شرایط نهایی برای اطمینان از صحت و قابلیت اعتماد مدل انجام می‌شود. تحلیل حساسیت و تولید مجدد رفتار نیز برای اطمینان از شبیه‌سازی دقیق و قابلیت اعتماد مدل بررسی شده‌اند. در نهایت، استفاده از نرم‌افزار ونسیم برای مدل‌سازی و مشاهده نتایج به‌طور گرافیکی به

عنوان یک ابزار کلیدی معرفی شده است. این جدول به شکل جامع و سازمان‌یافته مراحل مختلف پژوهش در سیستم‌های دینامیک را ارائه می‌دهد و مثال‌های کاربردی را برای هر مرحله بیان می‌کند. این جدول به پژوهشگران کمک می‌کند تا مراحل مختلف پژوهش پویایی‌شناسی سیستم‌ها را به‌طور دقیق و سازمان‌یافته دنبال کنند و مثال‌های کاربردی در هر مرحله را همان‌جا مشاهده کرده و مراحل را بهتر و ملموس‌تر درک نمایند.

جدول ۱ خلاصه مراحل روش‌شناسی پژوهش در سیستم‌های دینامیک.

| مرحله                      | ارزش (نقش کلیدی در مدل)                                                  | تشریح مرحله                                                                               | مثال کاربردی                                      |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| تعریف مسئله                | بنیان‌گذاری پژوهش، تعیین محدوده و اهمیت مسئله.                           | شناسایی و تعریف دقیق مسئله‌ای که قرار است مورد تحلیل قرار گیرد.                           | مشکل کاهش فروش در یک فروشگاه خرده‌فروشی.          |
| فرضیات پویا                | تسهیل درک و تحلیل رفتار سیستم، پایه‌گذاری مدل‌سازی دقیق.                 | تدوین فرضیات مربوط به رفتار سیستم که باید قابل آزمون و مرتبط با روابط علت و معلولی باشند. | فرضیه: تخفیف‌های مکرر موجب کاهش دائمی سود می‌شود. |
| مدل‌سازی                   | ایجاد تصویر گرافیکی از ساختار و رفتار سیستم، شناسایی الگوها و روابط مهم. | استفاده از ابزارها و تکنیک‌های مختلف برای نمایاندن روابط میان متغیرها.                    | مدل‌سازی رفتار مشتریان و تأثیر تبلیغات بر فروش.   |
| نمودار زیرسیستم‌ها         | فهم بهتر ساختار سیستم، شناسایی اجزاء و نقش هر کدام.                      | نمایش گرافیکی اجزای مختلف سیستم و زیرسیستم‌ها.                                            | نمایش زیرسیستم‌های فروش، تبلیغات، و انبارداری.    |
| روابط علت و معلولی         | تحلیل دقیق‌تر علل و اثرات، شناسایی نقاط کلیدی برای مداخله.               | شناسایی چگونگی تأثیرگذاری یک متغیر بر متغیر دیگر.                                         | تأثیر قیمت‌گذاری بر میزان خرید مشتریان.           |
| نمودار حلقه‌های علت معلولی | فهم تأثیرات بازخوردی و پویایی سیستم، شناسایی چرخه‌های تقویتی و تضعیفی.   | نمایش روابط بازخوردی در سیستم.                                                            | حلقه بازخوردی: افزایش تخفیف‌ها باعث افزایش        |

|                                                            |                                                                         |                                                                            |                         |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| خرید موقت و کاهش سود بلندمدت می‌شود.                       |                                                                         |                                                                            |                         |
| جریان محصولات از انبار به فروشگاه و فروش آن‌ها به مشتریان. | نمایش جریان مواد یا اطلاعات بین اجزای مختلف سیستم.                      | ارائه دیدگاه جامع از جریان مواد و اطلاعات، شناسایی مسیرها و گره‌های کلیدی. | مدل حالت جریان          |
| سطح موجودی انبار در طول زمان.                              | نمایش وضعیت کنونی سیستم که معمولاً به تغییرات در طول زمان پاسخ می‌دهند. | بررسی و تحلیل وضعیت کنونی سیستم، شناسایی نقاط حساس به تغییر.               | متغیرهای حالت           |
| نرخ ورود و خروج محصولات به انبار.                          | نشان‌دهنده سرعت تغییرات در متغیرهای حالت.                               | ارزیابی میزان تغییرات، شناسایی نقاط بحرانی در سرعت تغییرات.                | متغیرهای نرخ            |
| متغیر کمکی: تقاضای پیش‌بینی شده بر اساس فصل سال.           | ابزارهایی برای تسهیل در تحلیل و مدل‌سازی رفتار سیستم.                   | بهبود دقت و کارایی مدل‌سازی، تسهیل درک و تحلیل نتایج.                      | متغیرهای کمکی و سایه‌ای |
| مقایسه پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های واقعی فروش.            | اطمینان از دقت و کارایی مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار سیستم.                 | اطمینان از صحت و قابلیت اعتماد مدل، تضمین نتایج دقیق و معتبر.              | اعتبارسنجی مدل‌ها       |
| اطمینان از شامل بودن تمامی عوامل مؤثر بر فروش.             | بررسی اینکه آیا مرزهای مدل به‌درستی تعریف شده‌اند.                      | تعیین محدوده مدل، جلوگیری از تحلیل‌های نادرست و ناقص.                      | کفایت مرزها             |
| بررسی روابط بین تبلیغات و تغییرات فروش.                    | تحلیل ساختار مدل برای اطمینان از صحت روابط علت و معلولی.                | اطمینان از صحت ساختار مدل، شناسایی و اصلاح اشتباهات.                       | ارزیابی ساختار          |
| بررسی تطابق واحدهای اندازه‌گیری بین متغیرها.               | اطمینان از سازگاری تمامی ابعاد مدل با یکدیگر.                           | بهبود انسجام و هماهنگی مدل، افزایش دقت نتایج.                              | سازگاری ابعاد           |

|                       |                                                                                 |                                                                                                    |                                                                             |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ارزیابی پارامترها     | تضمین دقت و صحت پارامترها، افزایش قابلیت اعتماد مدل.                            | بررسی واقع‌گرایانه و دقیق بودن پارامترهای مدل.                                                     | ارزیابی دقت پارامترهای تقاضا و عرضه.                                        |
| شرایط نهایی           | ارزیابی پایداری و قابلیت اعتماد مدل در طول زمان، شناسایی نقاط پایان‌پذیر سیستم. | تحلیل رفتار مدل در شرایط نهایی.                                                                    | بررسی پایداری سود در بلندمدت.                                               |
| خطای انتگرال          | اطمینان از دقت محاسبات و تحلیل‌ها، جلوگیری از خطاهای محاسباتی.                  | بررسی دقت انتگرال‌گیری در مدل.                                                                     | بررسی دقت محاسبه میزان کل فروش در طول یک دوره زمانی.                        |
| اعضای خانواده         | شناسایی الگوهای مشابه، تحلیل و مقایسه مدل‌های مرتبط.                            | تحلیل رفتارهای مشابه مدل.                                                                          | مقایسه با مدل‌های مشابه در صنایع دیگر مانند پوشاک و لوازم خانگی.            |
| رفتار عجیب            | شناسایی نقاط ضعف و احتمالات غیرمنتظره، افزایش دقت مدل.                          | شناسایی و تحلیل رفتارهای غیرمنتظره در سیستم.                                                       | شناسایی نوسانات غیرمنتظره در فروش هنگام تغییرات قیمت.                       |
| تحلیل حساسیت          | ارزیابی حساسیت مدل به تغییرات، شناسایی نقاط بحرانی.                             | بررسی تأثیر تغییرات کوچک در پارامترها بر نتایج مدل.                                                | تحلیل تأثیر تغییرات کوچک در میزان تخفیف بر میزان فروش و سود.                |
| تولید مجدد رفتار      | تضمین تطابق مدل با رفتار واقعی سیستم، افزایش قابلیت اعتماد و دقت مدل.           | اطمینان از شبیه‌سازی دقیق رفتارهای واقعی سیستم.                                                    | تکرار و شبیه‌سازی رفتار مشتریان بر اساس داده‌های تاریخی.                    |
| معرفی نرم‌افزار ونسیم | تسهیل در مدل‌سازی و تحلیل دقیق، امکان شبیه‌سازی و نمایش گرافیکی نتایج.          | استفاده از نرم‌افزار ونسیم برای ایجاد و آزمایش مدل‌های پویایی‌شناسی و مشاهده نتایج به‌طور گرافیکی. | استفاده از ونسیم برای مدل‌سازی تأثیر تبلیغات بر فروش و نمایش گرافیکی نتایج. |

## نتیجه گیری

در این فصل به تشریح روش‌شناسی پژوهش در زمینه سیستم‌های دینامیک پرداخته شد و مراحل کلیدی این روش که به تحلیل و مدل‌سازی رفتار سیستم‌های پیچیده کمک می‌کند، بررسی گردید. با تعریف دقیق مسئله به‌عنوان نخستین گام، پژوهشگران می‌توانند پایه‌ای محکم برای ادامه مراحل پژوهش بنا کنند. تدوین فرضیات پویا به‌عنوان پل ارتباطی بین تعریف مسئله و مدل‌سازی، به تحلیل روابط علت و معلولی کمک می‌کند. مدل‌سازی با بهره‌گیری از ابزارهای گرافیکی و تکنیک‌های مختلف، به شناخت بهتر از ساختار و رفتار سیستم‌های پیچیده منجر می‌شود. مراحل اعتبارسنجی مدل‌ها نیز اهمیت ویژه‌ای دارند، چراکه اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار سیستم را تضمین می‌کنند. معیارهایی چون کفایت مرزها، ارزیابی ساختار، سازگاری ابعاد، و تحلیل حساسیت از جمله ابزارهایی هستند که به پژوهشگران کمک می‌کنند تا نقاط ضعف و قوت مدل‌ها را شناسایی کرده و به بهبود آن‌ها بپردازند.

نهایتاً، معرفی نرم‌افزار ونسیم به‌عنوان ابزاری قدرتمند در مدل‌سازی سیستم‌های دینامیک، قابلیت‌های این نرم‌افزار را در طراحی و تحلیل مدل‌ها، به‌ویژه در ایجاد تجسم‌های گرافیکی از نتایج، به نمایش می‌گذارد. با توجه به این مراحل و ابزارها، پژوهشگران می‌توانند به‌طور مؤثری به تحلیل و بهبود رفتار سیستم‌های پیچیده بپردازند و نتایج قابل‌اعتمادی را در حوزه‌های مدیریتی و صنعتی به دست آورند.

این فصل به‌طور جامع روش‌شناسی پژوهش در سیستم‌های دینامیک را معرفی کرده و مراحل مختلف آن را با مثال‌های کاربردی توضیح داده است. این رویکرد گام‌به‌گام به تکمیل فصل‌های آینده این تحقیق کمک می‌کند تا فرآیند پژوهش به‌صورت ساختاریافته و منظم دنبال شود و نتایج به‌دست‌آمده به‌طور مؤثری در عمل پیاده‌سازی شوند. در فصل‌های آینده مدل مسئله معرفی و موارد ذکر شده در این فصل، به‌طور عملی پیاده‌سازی می‌شوند.

Bilash Kanti Bala, Fatimah Mohamed Arshad, Kusairi Mohd Noh, “System Dynamics” Springer Texts in Business and Economics, 2017.

Roозbeh Rashedi, and Tarek Hegazy, “Holistic Analysis of Infrastructure Deterioration and Rehabilitation Using System Dynamics” Journal of Infrastructure Systems, Volume 22, Issue 1, Sep. 2015, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000273](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000273).

Hala Hjazeen, Mehdi Seraj and Huseyin Ozdeser, “The nexus between the economic growth and unemployment in Jordan” Article number: 42 , Future Business Journal, 2021.

Ahmed A. Abdelgawad, “An Updated System Dynamics Model for Analysing the Cascading Effects of Critical Infrastructure Failures” An Updated System Dynamics Model for Analysing, May 2023.

Muhammad Qurban, Abdul Khaliq, Muhammad Saqib, Thabet Abdeljawad, “Stability, bifurcation, and control: Modeling interaction of the predator-prey system with Alles effect” Ain Shams Engineering Journal, Volume 15, Issue 4, April 2024.

Jifeng WANG, Huapu LU, Hu PENG, “System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application” Volume 8, Issue 3, June 2008, Pages 83-89, [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(08\)60027-6](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(08)60027-6).

Jaime Martínez-Valderrama, Javier Ibáñez, “Implementing climate change projections in System Dynamics models” Volume 10, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102044>.

Fangfang Xu, Wenzhen Gan, De Tang, “Population dynamics and evolution in river ecosystems” Nonlinear Analysis: Real World Applications, Volume 51, February 2020,

Hamed Dehghan, Mohammad Reza Amin-Naseri, Nasim Nahavandi, “A system dynamics model to analyze future electricity supply and demand in Iran under alternative pricing policies” Utilities Policy, Volume 69, April 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101165>.

Jack B Homer, Gary B Hirsch, “System Dynamics Modeling for Public Health: Background and Opportunities” *Am J Public Health*. 2006 Mar;96(3):452–458. doi: 10.2105/AJPH.2005.062059.

Pierre Kunsch, M. Theys, Alain Chevalier, J.-P. Iacopetta, “A System Dynamics Model of Stock Price Movements” January 2000, Recent development and world-wide applications *Applied*, DOI:10.1007/978-1-4757-4919-9\_11.

by S. Hooman Mousavi, S. Hooman Mousavi, SciProfilesSciLitPreprints.orgGoogle Scholar, M. R. Kavianpour, Jorge Luis García Alcaraz and Omid A. Yamini, “System Dynamics Modeling for Effective Strategies in Water Pollution Control: Insights and Applications” 2023, 13(15), 9024; <https://doi.org/10.3390/app13159024>.

Jafri Zulkepli, Norhaslinda Zainal Abidin, Norazura Ahmad, Nurul Nazihah Hawari, “Introduction to System Dynamics Modelling and Vensim Software” UUM Press, Malaysia, September 2017, DOI:[10.32890/9789672064084](https://doi.org/10.32890/9789672064084).

Robert L. Eberlein and David W. Peterson, Understanding models with Vensim, *European Journal of Operational Research* 59 (1992) 216-219, North-Holland.

Tianjie Deng, Yan Zhang, Chenling Fu, “Modelling dynamic interactions between material flow and stock: A review of dynamic material flow analysis” Volume 156, 1 December 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111098>.

Mohammad Mahdi Ershadi, Zeinab Rahimi Rise, “Uncertain SEIAR system dynamics modeling for improved community health management of respiratory virus diseases: A COVID-19 case study” Volume 10, Issue 3, 15 February 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24711>.

Gary Lin, Michele Palopoli & Viva Dadwal, “From Causal Loop Diagrams to System Dynamics Models in a Data-Rich Ecosystem” *Leveraging Data Science for Global Health*, August 2020.

Kostas Karamanos, Aristotelis Gkiolmas, Anthimos Chalkidis, Constantine Skordoulis, Maria Papaconstantinou and Dimitrios Stavrou, “Ecosystem Food-webs as Dynamic Systems: Educating Undergraduate Teachers in Conceptualizing Aspects of Food-webs’ Systemic Nature and Comportment” *Advances in Systems Science and Applications* (2012) Vol.12 No.4.