

بناہم اپنی نام فریاد



ادیبیان روز

# پویایی شناسی سیستم

آموزش جامع (VENISM)

با مقدمه‌ای از پرفسور جان استرمن

## مؤلف:

مارتین گارسیا

## مترجمان:

امیر علم بیگی (عضو هیأت علمی دانشگاه تهران)

الهام فهم (عضو هیأت علمی جهات دانشگاهی)

میثم رجبی نهوجی

سارا جلیلیان و فاطمه اسکوئی

## مقدمه پرفسور استرمن

با افزایش پیچیدگی دنیای ما، تفکر سیستمی به عنوان عاملی حیاتی برای موفقیت و حتی بقا در حال ظهور است. در این صورت، چگونه مردم می توانند به متفکران سیستمی ماهری تبدیل شوند؟ مؤثرترین تجارب یادگیری، تجربه را با تأمل و مبانی نظری را با عمل ترکیب می کند. به طور سنتی، مبانی نظری در مدرسه و دانشگاه آموزش داده می شد و تجربه در زندگی خارج از آن دیوارها کسب می شد. اما در دنیای سیستم های پویای پیچیده همانند کسب و کار، جامعه و یا اکوسیستم، تجربه روزمره شکست می خورد، زیرا افق زمانی و قلمرو این سیستم ها بسیار وسیع است - ما هیچ گاه اکثریت تأثیرات تصمیمات خود را تجربه نمی کنیم و بدون تجربه مرتبط، مبانی نظری برای دانشجویان جالب نیست.

روش های قدیمی یادگیری شکست می خورند. زمانی که آزمایش در دنیای واقعی غیرممکن باشد، شبیه سازی به روشی اصلی تبدیل می شود که ما می توانیم به طور اثربخش برای یادگیری در مورد پویایی شناسی سیستم های پیچیده از آن استفاده کنیم. به این دلیل بسیار خرسندم که کتاب خوان مارتین گارسیا، تحت عنوان «مبانی نظری و تمرین های کاربردی پویایی شناسی سیستم» را معرفی کنم. در این کتاب نظریه و عمل، تجربه و فرصت های تفکر، به نحوی با هم ترکیب شده اند که تازه واردهای این حوزه می توانند یاد بگیرند که سیستم های پویای پیچیده چگونه کار می کنند. مثال ها طیف وسیعی از موضوعات مهم اقتصادی و اجتماعی، از پیر شدن جمعیت در اقتصادهای توسعه یافته تا روند بیماری های واگیردار و انباشت آلاینده ها در محیط زیست را در برمی گیرند. به قدری مثال ها متنوع هستند که هر فردی بر اساس علاقه خود مثال هایی را در این کتاب خواهد یافت. تمرین های مدل سازی، یادگیرنده را از طریق فرآیند ساخت یک شبیه سازی مؤثر هدایت می کنند. فراگیران صرفاً موضوعات بیان شده و استفاده از ویژگی های نرم افزار شبیه سازی را یاد نخواهند گرفت، بلکه مهارت لازم در فرآیند مدل سازی را کسب خواهند نمود. خوان مارتین گارسیا اولین مقدمه لذت بخش را در زمینه پویایی ها و پیچیدگی سیستم نوشته است که در کنار سایر منابع موجود، بسیار مورد نیاز است.

جان دی. استرمن

کمبریج، ماساچوست

## پیشگفتار

این موضوع می‌تواند یک سناریوی خوب برای مقابله با برخی افسانه‌هایی که حول پویایی‌شناسی سیستم وجود دارند باشد. هر فردی که با این روش آشنا نیست، ممکن است تصور کند که در پشت این کلمات پیچیده‌ترین معادلات پنهان هستند، همه آن‌ها پر از نمادهای عجیب و غریب یونانی، دیفرانسیل‌ها و انتگرال‌ها هستند. این وضعیت زمانی که باید با داده‌های آماری سروکار داشته باشید و سعی می‌کنید معنای مبهم آن‌ها را رمزگشایی کنید، می‌تواند بغرنج‌تر هم شود. در نهایت هم انتظار نرم‌افزاری را می‌کشید که به دانش وسیع برنامه‌نویسی نیاز دارد.

شکی نیست که این افسانه‌ها مانند محافظان خوب دانشی، به راحتی ذهن‌های ضعیف را از بین می‌برد. اما در حقیقت، افسانه‌ها بیشتر محصول تخیل و بی‌سوادی هستند تا این که عمداً قصد پنهان کردن یک منبع دانشی ارزشمند را داشته باشند. به دلیل شکست آن‌ها، پویایی‌شناسی سیستم برای مسائل روزمره یعنی دنیای واقعی کاربرد دارد. به ندرت فرمول‌های پیچیده ریاضی را در آن پیدا خواهیم کرد، اما یک سادگی شگفت‌انگیزی بعد از تجزیه و تحلیل دقیق به وجود می‌آید. پیچیدگی در دنیای واقعی بیشتر نمایان است و اغلب نتیجه جهالت ماست. برای مثال، معادلات انتگرالی، به طور نمادین نشان‌دهنده تجمع مواد، انرژی یا اطلاعات هستند. با توجه به علم آمار، از آن‌ها در موقعیت‌های خاص بیشتر به عنوان یک مکمل تا یک مورد اصلی استفاده خواهیم کرد. در نهایت، در رابطه با پیچیدگی نرم‌افزار، ثابت خواهیم کرد که چقدر می‌تواند آسان باشد. بنابراین، ترس خود را فراموش کرده و اجازه دهید به مرزهای دانش سفری داشته باشیم.

بعد از رفع این ابهام‌ها، باید این سؤال مهم را بپرسیم که پویایی‌شناسی سیستم برای ما چه کاری انجام خواهد داد؟ ممکن است در چندین کتاب هزاران پاسخ به این سؤال پیدا کرد، اما ابتدا اجازه دهید از یک قیاس ساده استفاده کنیم. اگر شما مجبور بودید کل تعداد صندلی‌ها را در یک سالن تئاتر با ۳۰ ردیف و ۳۰ صندلی در هر ردیف محاسبه کنید، می‌توانستید آن‌ها را از یک تا ۸۹۹ بشمارید. در پایان هم حتماً نیاز است برای کسب اطمینان از درستی شمارش خود دوباره آن‌ها را بشمارید. در

این شرایط می‌توانید از روشی به نام "ضرب" استفاده کنید و با بیان عددی « $30 \times 30$ »، نتیجه ۹۰۰ را به شیوه‌ای سریع‌تر و مطمئن‌تر به دست آورید. پویایی‌شناسی سیستم یک روش مشابه به لحاظ ارائه همان نتایج سریع و قابل اطمینان در مقابل سایر روش‌های سنتی برای درک واقعیت است. از این رو، این روش ما را قادر می‌سازد تا با تحلیل پیچیدگی آشکار موجود در موضوعات اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و یا صرفاً مکانیکی سروکار داشته باشیم.

هدف اصلی این کتاب، خدمت به عنوان مرجعی برای فراگیرانی است که این موضوع را مطالعه می‌کنند و راهنمایی آن‌ها در گام‌های ابتدایی‌شان می‌باشد. در ابتدا، ما یک چشم‌انداز مختصر در رابطه با این روش‌شناسی و مفاهیم پایه آن ارائه می‌دهیم. پس از آن، انجام تمرین‌های پایه می‌تواند برای ایجاد سریع‌تر فرآیند یادگیری استفاده شود. تنها با پیروی از این مسیرها، مشخص خواهد شد که درک این روش چقدر آسان است. این کتاب قصد ندارد جایگزین وظیفه معلم شود. معلم سؤالات سختی را که مطرح می‌شود را حل خواهد کرد. پیوست کتاب، حاوی سؤالات متداولی است که حول این موضوع تدوین شده‌اند و به دنبال آن پاسخ‌های دقیقی آمده است که به خوانندگان کمک می‌کند تا درک بهتری از این روش داشته باشند.

تمرینات کاربردی به منظور ارائه برشی از مثال‌های اساسی در مورد آنچه برای دانستن لازم است، آورده شده است. آن‌ها برای ارائه موضوعات تحقیقاتی فعلی یا راهنمای پروژه‌ها در هر حوزه خاصی عرضه نمی‌شوند. خوانندگان علاقمند به این کار باید نگاهی فراتر به مدل‌هایی داشته باشند که با رشته خودشان همخوانی دارند. برای تسهیل این کار، می‌توان برخی از منابع قوی موجود در مورد مدل‌ها را در اینترنت جستجو کرد.

پویایی‌شناسی سیستم را می‌توان برای مسایل روزمره به کار کرد. پاسخ این سؤال که «چه زمانی استفاده از پویایی‌شناسی سیستم مناسب است؟» این خواهد بود «هر زمانی که نوعی از بازخورد وجود دارد». چنین حقیقتی در زندگی (شرکت‌ها، موضوعات محیط‌زیستی و اجتماعی)، رایج است و شرح پدیده‌هایی است که تنها با شهود فردی حل نمی‌شود.

تمرین‌ها را می‌توان به روش‌های زیادی سازماندهی کرد. برای پیگیری آسان، موضوعات طبقه‌بندی شده‌اند، اول، علوم محیط‌زیستی، دوم مدیریت و مطالعات اجتماعی و در نهایت الگوهای سیستم‌های مکانیکی. نیازی به انجام همه تمرین‌ها برای کسب مهارت در این روش نیست. شما ممکن است

آن‌هایی را که بیشتر برایتان جالب است یا مهم‌تر است، انتخاب کنید. در این کتاب بر خلاف کتاب‌های دیگر که راه‌حل‌ها در صفحات آخر به چاپ می‌رسند، مشکلات و راه‌حل‌ها با یکدیگر آورده شده‌اند. این امر یادگیری را با انجام مدل‌های مختلف تسهیل می‌کند. طراحی مدل شبیه‌سازی یک کار دستی است. لازم است بدانید این روش چگونه عمل می‌کند. زمانی که پاسخ کسب شد، سازنده می‌تواند آزادانه در مورد ساختار تصمیم‌گیری کند و از قوانین عمومی پیروی نکند.

نگرانی در مورد این روش، آن است که تمام مطالعات شامل مدل‌های رایانه‌ای، دور از واقعیت است. کاربرد این روش به دست آوردن ساده‌ترین راه‌حل‌ها برای مسایل پیچیده است. در نتیجه، تولید مدل‌های شبیه‌سازی تنها چند بار قابل توجیه است. یادگیری نحوه تولید آن‌ها برای پرورش مفاهیم نظری بسیار مفید است و ممکن است در توضیح پاسخ‌های مناسب، مؤثرتر باشد. در نتیجه توصیه می‌شود که با کار کردن روی تمرینات آغاز نکنید، به خصوص به این دلیل که کاربرد این روش همیشه به ایجاد یک مدل رایانه‌ای منجر نمی‌شود. در نهایت، این کتاب به دنبال کار دقیق و منظمی است که به اجتناب از تردیدهای معمولی ضمنی در هر فرآیند یادگیری کمک می‌کند. با آگاهی در مورد مشکلات ناشی از یادگیری کتاب، ما تلاش کرده‌ایم که متن واضح و جذابی را ایجاد کنیم. با وجود تمام تلاش‌های صادقانه برای انجام آن چه قبلاً توضیح داده شد، این توصیه نهایی است که هر زمان که ممکن است یک معلم برای این موضوع پیدا کنید.

جان مارتین گارسیا

## پیشگفتار مترجمان

آموزش تفکر سیستمی به عنوان یک سبک تفکر، فرآیندی است که از دوران کودکی باید آغاز شود. اما هیچ‌گاه برای یادگیری این سبک تفکر دیر نیست. از آن جا که پویایی‌شناسی سیستم، به عنوان یک روش برای آموزش تفکر سیستمی، خاستگاه دانشگاهی دارد، همواره با ریاضیات و مدل‌سازی همراه بوده است که مسأله یادگیری آن را برای علاقمندان دشوار نموده است. بی‌شک کتاب حاضر یکی از کامل‌ترین منابع علمی برای یادگیری پویایی‌شناسی سیستم در کشور است. اثر حاضر، حاصل ترجمه دو کتاب مارتین گارسیا به عنوان یکی از شاخص‌ترین چهره‌های علمی در زمینه سیستم‌های پویاست. در واقع کتاب حاضر حاصل ترجمه تلفیقی دو کتاب Theory and Practical Exercises of System Dynamics که در سال ۲۰۱۸ منتشر شده و کتاب System Dynamics Modelling With Vensim که در سال ۲۰۲۰ منتشر شده می‌باشد و حاوی آخرین تحولات و پیشرفت‌های این نرم‌افزار است. به هر حال با توجه به همپوشانی‌های این دو کتاب، در نهایت تصمیم بر آن شد که مترجمان، مطالب هر دو کتاب را در قالب یک مجلد به خوانندگان محترم عرضه کنند. کتاب در پنج فصل تنظیم و تلاش شده تا علاوه بر مفاهیم بنیادی و اساسی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، نرم‌افزار ونسیم را به طور کامل شرح دهد. در قسمت پیوست نیز مطالبی در خصوص مفاهیم پایه سیستم برای خوانندگان کمتر آشنا ارائه شده است. وجه متمایز کتاب را در جامعیت آن می‌توان یافت که برای خوانندگان کمتر آشنا می‌تواند مبنایی برای شروع یادگیری این حوزه باشد و برای خوانندگان محترم با دانش قبلی مبنایی برای عمیق شدن در مفاهیم این حوزه به واسطه ارائه مثال‌های متعدد است. رویکرد گاسیا در تحلیل مسائل سیستمی طبق آنچه در قالب گام‌های عملیاتی در فصول چهارم و پنجم شرح آن داده شده است، بسیار کاربردی و در عین سادگی و شفافیت منجر به نتایج تحلیلی بسیار جامع و فراگیر از مجموعه سیستم‌های پیچیده می‌شود.

در کل کتاب حاضر با بیانی ساده در وهله اول مباحث مقدماتی و مبانی پویایی‌شناسی سیستم را شرح داده و در وهله دوم با مثال‌هایی متنوع و واقعی از کاربرد این روش‌شناسی همراه با آموزش نرم‌افزار پرکاربرد ونسیم را مورد توجه قرار داده است. این کتاب، منبعی است تا علاقمندان فارغ از

زمینه‌های تخصصی خود، بتوانند به یادگیری تفکر سیستمی از طریق روش پویایی‌شناسی سیستم پردازند و بر آن مسلط شوند تا از این تفکر و ابزار در زندگی حرفه‌ای و فردی خود بهره‌مند شوند. شایان ذکر است که ترجمه کتاب حاضر در قالب پروژه‌ای یکساله و به صورت گروهی توسط مترجمان کتاب صورت گرفته است و تلاش شده تا اعتبارسنجی تمام معادلات دیفرانسیل در این کتاب مورد توجه باشد. در وهله اول جا دارد از پرفسور گارسیا که مشوق ترجمه کتاب حاضر بودند و کمک‌های فراوانی را به مترجمان داشتند نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشیم. همچنین از مساعدت‌های فراوان مجموعه انتشارات تخصصی ادیبان روز و به طور خاص مدیر محترم مجموعه دوست گرامی جناب آقای دامون صلاحی تقدیر و تشکر داریم که زمینه نشر این اثر را فراهم کردند. در نهایت نظر به این قاعده که هیچ اثری خالی از اشتباه نیست و جا برای بهتر شدن همیشه وجود دارد دست خوانندگان گرامی را برای دریافت بازخوردها و نظرات اصلاحی به گرمی می‌فشاریم. لطفاً مسائل و نظرات را از طریق ایمیل [Alambaigi@ut.ac.ir](mailto:Alambaigi@ut.ac.ir) با مترجمان در میان بگذارید.

امیر علم بیگی

زمستان ۱۴۰۰

## تقدیر و تشکر مؤلف

بدون شک این کتاب را مدیون کسانی هستم که معلّم من بودند، به خصوص پری اسکورسا<sup>۱</sup> که به اهمیت این رشته به عنوان ابزار تجزیه و تحلیل همیشه تأکید داشت. همچنین خود را مدیون برخی از دوستان می دانم. به طور مشخص خوزه آلفانسو دلگادو<sup>۲</sup> که مرا به لزوم تدوین کتابی در این موضوع متقاعد کرد و تشویق کرد که تلاش لازم را برای تالیف کتاب اختصاص دهم. ثانیاً، این کتاب محصول سال‌ها تدریس است و بنابراین بیشترین تشکر من از تمام دانشجویانم است که با سؤالات مستمر خود باعث شده‌اند تا در مورد مفاهیم نظری تأمل کنم و مثال‌ها را واضح‌تر و ساده‌تر بیان کنم. خالی از لطف نیست نام کسانی که در این کتاب همکاری کرده‌اند را در این قسمت قید کنم:

ماریو گیدو پریز<sup>۳</sup> (مهندس شیمی، آرژانتین) نویسنده همکار مدل‌های رآکتور شیمیایی، مصرف سموم شیمیایی، عدد طلایی و اثر پروانه‌ای.

کلادیو ام. انریکه<sup>۴</sup> (دانشگاه ملی لیتورال، شهر سانتافه، آرژانتین) برای همکاری در مدل مطالعه حرکت‌های نوسانی.

گوستاوو آدولفو جوارز (دانشگاه ملی کاتامارکا، آرژانتین) برای همکاری در توسعه مدل همه‌گیری (اپیدمی).

خوزه ایگناسیو فرناندز مندز<sup>۵</sup> (دانشگاه ملی خودگردان مکزیک) و میکائیل فرنچمن (مشاور، آمریکا) در مدل صید میگو در کامپچه.

ژوزف ماریا بانیز<sup>۶</sup> (مهندس، اسپانیا) در مدل دریاچه‌های مصنوعی آنگکور.

محمد نمیکه<sup>۷</sup> (دکترای فیزیک، مراکش) در بخش تاریخچه و مبانی پایه.

---

1 Pere Escorsa

2 José Alfonso Delgado

3 Mario Guido Pérez

4 Claudio M. Enrique

5 José Ignacio Fernandez Mendez

6 Josep Maria Banyeres

7 Mohamed Nemiche

آنتونی لاکازا رویزا<sup>۱</sup> (هنرمند، اسپانیا) کسی که تجربیاتش را در نقاشی‌هایی که متن را نشان می‌دهد و آن را دلپذیرتر می‌کند، ارائه کرده است.

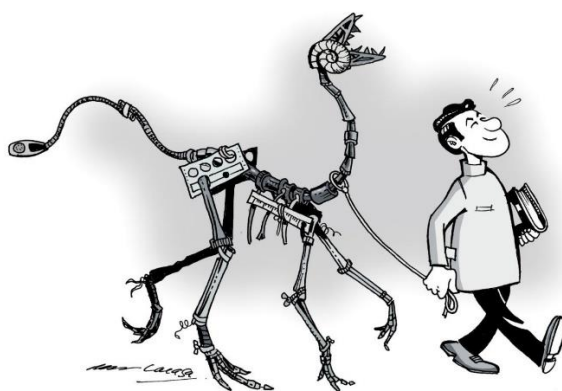
... و همه مترجمان نسخه اصلی کتاب، به ویژه بازبینی‌کننده، تری واکر<sup>۲</sup>.

در پایان صمیمانه از جان استرمن تشکر می‌کنم که با مهربانی پذیرفت مقدمه این کتاب را بنویسد.

---

1 Antoni Lacasa Ruiz

2 Terry Walker



## فهرست

صفحه	عنوان
۱۹.....	فصل اول: پویایی شناسی سیستم
۱۹	معرفی پویایی شناسی سیستم
۲۴	شناسایی مسأله
۲۵	تعریف سیستم
۲۶	مرزهای سیستم
۲۷	نمودار علی
۲۸	بازخورد
۳۰	عامل محدودکننده
۳۱	عوامل کلیدی
۳۴	طبقه بندی سیستم‌ها
۳۴	سیستم‌های پایدار و ناپایدار
۳۶	سیستم‌های بیش از حد پایدار
۳۸	سیستم‌های نوسانی
۳۸	سیستم‌های اس شکل یا دوهمالی
۳۹	ساختارهای عمومی
۳۹	مقاومت در برابر تغییر
۴۰	فرسایش اهداف

۴۳	اعتیاد
۴۴	انتقال مسئولیت به عامل بیرونی
۴۶	اثرات کوتاه مدت و بلندمدت
۴۷	مدل های جهان شمول
۵۱	کنترل پرسشنامه
۵۳	فصل دوم: ساخت و ایجاد مدل.....
۵۳	نمودارهای جریان
۵۵	شبیه سازی رایانه ای
۵۶	رفتار مدل
۵۸	تحلیل سیستم
۵۹	نقاط ضعف مدل ها
۶۰	پنج تجربه از مؤلف کتاب
۶۸	کنترل پرسشنامه
۶۹	فصل سوم: تمرین سیستم های پویا در محیط ونیسم.....
۶۹	حوزه محیط زیست
۶۹	رشد جمعیت
۷۶	مدل سازی بوم شناسی یک ذخیره گاه طبیعی
۸۹	اثرات کشاورزی فشرده
۹۷	صید میگو
۱۰۶	خرگوش ها و روباه ها
۱۰۹	مطالعه روی خوک ها
۱۲۱	مصرف سموم
۱۲۸	دریاچه های مصنوعی آنگکور
۱۳۸	شماره طلایی
۱۴۲	حوزه مدیریت
۱۴۲	تولید و انبار
۱۵۴	انتشار دی اکسید کربن (CO2)
۱۵۷	چگونه بیشتر و بهتر کار کنیم

۱۶۴	خطاها
۱۶۷	پویایی های پروژه
۱۷۸	شرکت های نوآور
۱۹۳	کنترل کیفیت
۱۹۹	تأثیر طرح کسب و کار
۲۰۳	حوزه اجتماعی
۲۰۳	پر کردن یک لیوان
۲۰۶	مطالعه یک فاجعه
۲۱۲	کارگر جوان بلندپرواز
۲۱۸	توسعه یک بیماری همه گیر
۲۲۵	پویایی های یک جفت ساعت
۲۲۷	حوزه مکانیک
۲۲۷	مخزن
۲۳۲	مطالعه حرکات نوسانی
۲۴۰	طراحی رآکتور شیمیایی
۲۴۵	اثر پروانه ای
۲۵۲	لامپ اسرارآمیز
۲۶۱	فصل چهارم: راهنمای ساخت مدل.....
۲۶۲	ایجاد یک نمودار حلقه علی
۲۶۵	ایجاد یک نمودار انباشت و جریان
۲۶۷	نگارش نتیجه گیری
۲۶۹	فصل پنجم: تمرین های پیشرفته (با استفاده از ونسیم پی. ال. ای. پلاس).....
۲۷۲	دریافت داده ها از یک صفحه گسترده اکسل
۲۷۸	ساخت بازی و آزمایشگاه یادگیری (با پی. ال. ای پلاس)
۲۸۸	مدل های تعاملی (با پی. ال. ای پلاس)
۳۰۶	کنترل های ورودی و خروجی (با پی. ال. ای پلاس)
۳۱۹	تحلیل حساسیت (با پی. ال. ای پلاس)

۳۳۷	نتیجه‌گیری نهایی
۳۳۸	تاریخچه و مفاهیم پایه
۳۴۵	تابع، جداول و تأخیرها
۳۵۵	پرسش‌های متداول
۳۶۲	دوره‌های آموزشی
۳۶۴	نرم افزار
۳۶۶	کتاب‌شناسی