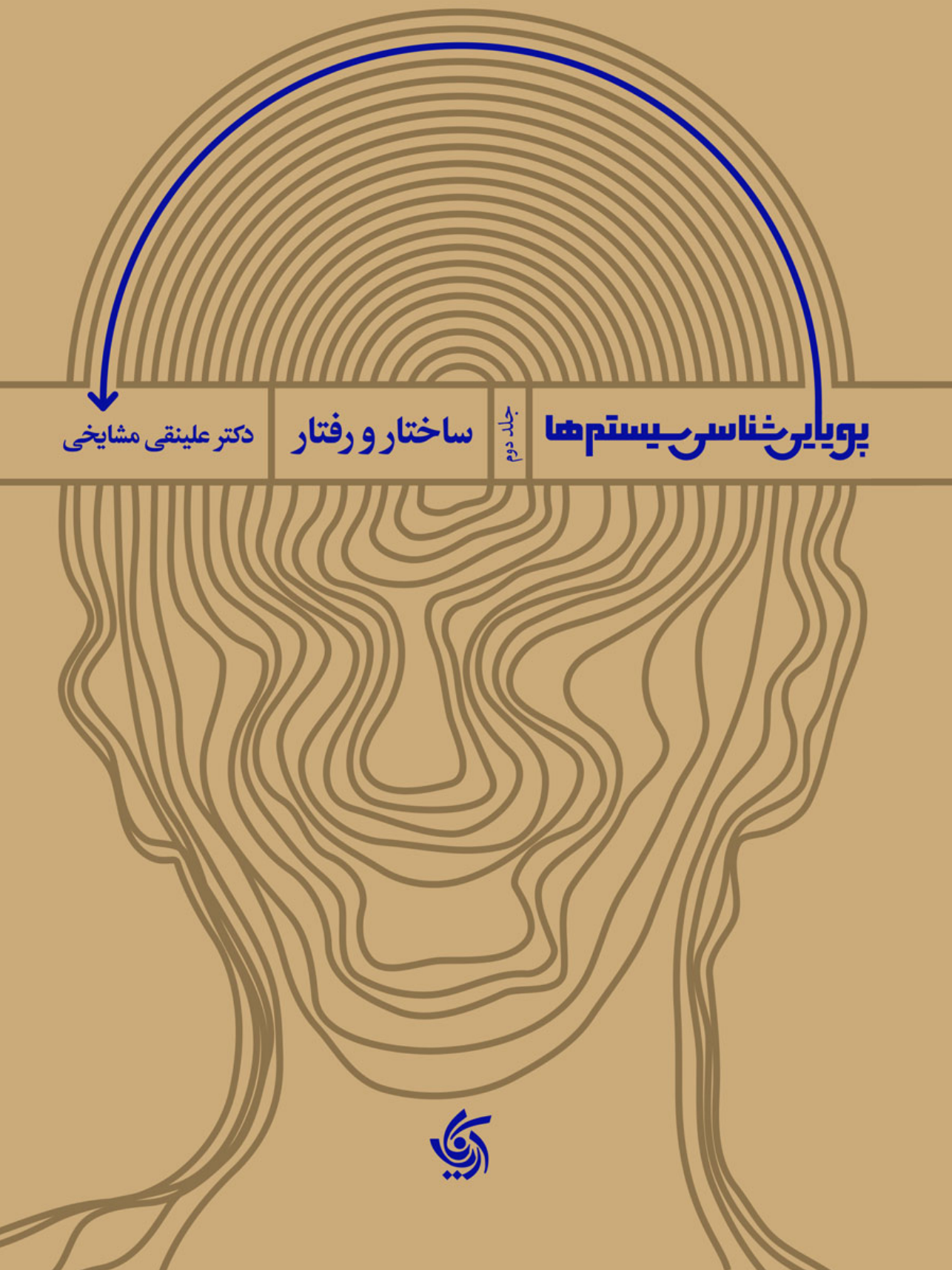
پویایی‌شناسی سیستم‌ها

جلد دوم

ساختار و رفتار

دکتر علینقی مشایخی

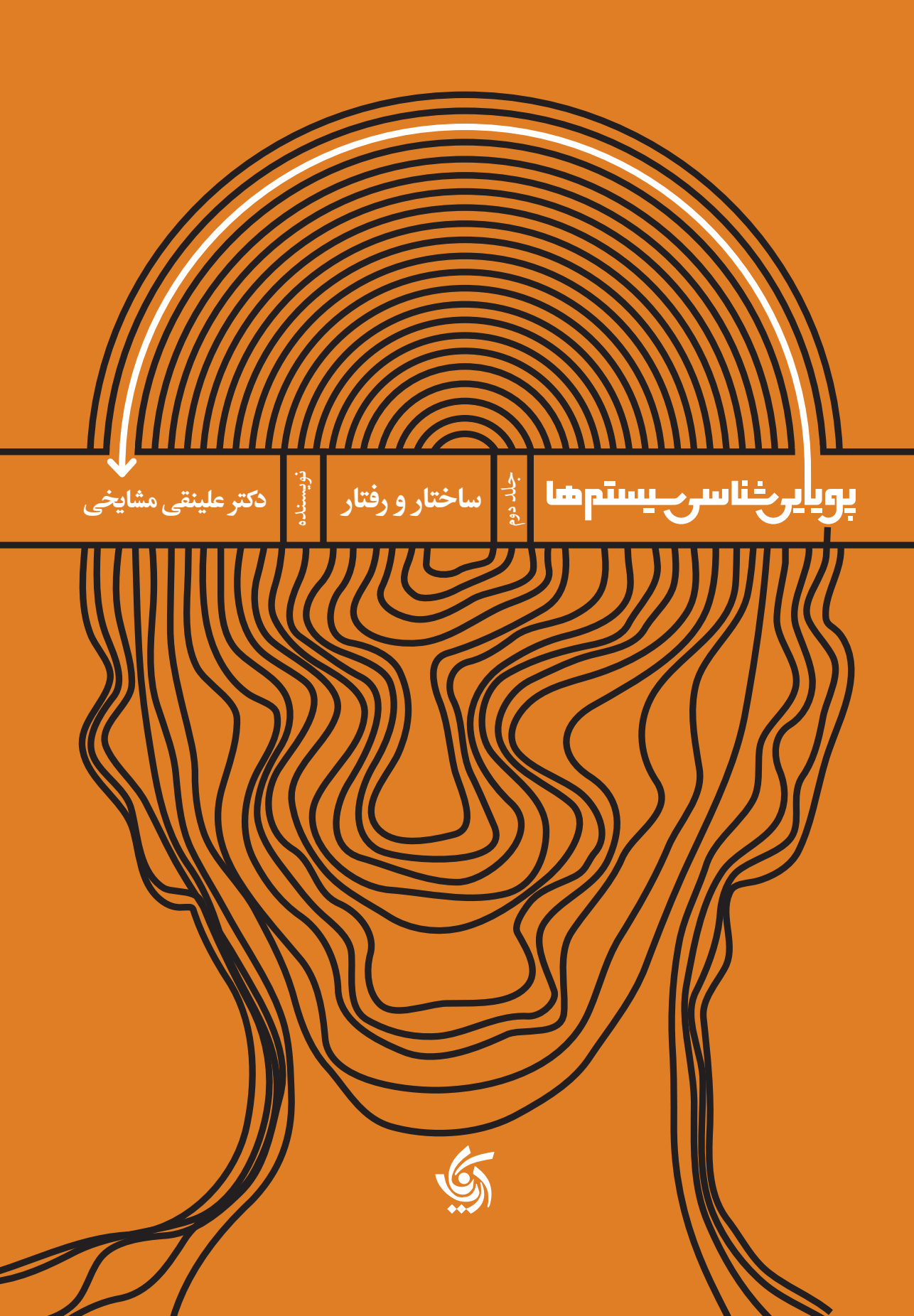


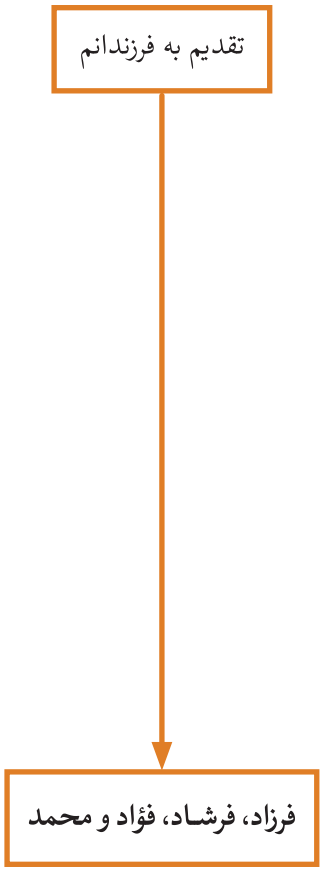
بسم الله

نویسنده: دکتر علینقی مشایخی
(استاد دانشکدهٔ مدیریت و اقتصاد دانشگاه صنعتی شریف)
طراح جلد: مجید زارع
صفحه‌آرا: داریوش گل‌سرخی و رامین مهری
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: واژه پرداز اندیشه
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
شابک: ۵-۳۲-۷۰۸۹-۶۲۲-۹۷۸
شابک دوره: ۲-۳۳-۷۰۸۹-۶۲۲-۹۷۸
نوبت چاپ: اول، زمستان ۱۴۰۲
ناشر: آریاناقلم
نشانی: خیابان سهروردی جنوبی، ملایری‌پور غربی، پلاک ۳۷، واحد ۲
تلفن: ۸۸۳۴۲۹۱۰
فروشگاه اینترنتی: www.AryanaGhalam.com

تمام حقوق چاپ و نشر این اثر برای **انتشارات آریاناقلم** محفوظ است.
تکثیر و انتشار تمام یا بخشی از این اثر به هر شکل بدون اجازهٔ کتبی ناشر ممنوع است.

سرشناسه: مشایخی، علینقی، ۱۳۲۷-
عنوان و نام پدیدآور: پویایی‌شناسی سیستم‌ها
علینقی مشایخی
مشخصات نشر: تهران: آریاناقلم، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری: ۳۰۴ صفحه.
شابک: ۵-۳۲-۷۰۸۹-۶۲۲-۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا
مندرجات: ج.۲. ساختار و رفتار.
موضوع: مدیریت صنعتی
موضوع: Industrial management
موضوع: نظام‌های اطلاعاتی مدیریت
موضوع: Management information systems
موضوع: نظریهٔ سیستم‌ها
موضوع: System Theory
رده‌بندی کنگره: ۱۳۹۷ ۸۷پ۵م۲/HD۳۰
رده‌بندی دیویی: ۶۵۸/۴۰۳۸۰۱۱
شمارهٔ کتاب‌شناسی ملی: ۹۳۷۵۴۵۷


پویایی‌شناسی سیستم‌ها
جلد دوم
ساختار و رفتار
نویسنده
دکتر علینقی مشایخی


تقدیم به فرزندانم
فرزاد، فرشـاد، فؤاد و محمد

فهرست

فصل نهم

ساختارهای سادهٔ مولد رفتار رشد نمایی و رفتار هدف جو ۱۵

۹-۱ مقدمه ۱۷

بخش اول: رشد نمایی ۱۷

۹-۲ ساده‌ترین ساختار ایجاد رشد نمایی ۱۸

۹-۳ مثال رشد جمعیت ۲۲

۹-۴ مثال مدل رشد اقتصادی ۲۷

۹-۵ ساختار ایجاد رشد نمایی با بیش از یک متغیر حالت ۳۳

۹-۶ بهرهٔ پس‌خوران ۳۷

بخش دوم: رفتار هدف‌جو ۴۲

۹-۷ ساده‌ترین ساختار ایجادکنندهٔ رفتار هدف‌جو ۴۴

۹-۸ زمان تنظیم متغیر ۴۸

۹-۹ کاربرد پس‌خوران منفی درجهٔ ۱ ۴۹

تمرین‌ها ۵۲

مراجع ۵۴

فصل دهم

رفتار S شکل ۵۵

۱۰-۱ مقدمه ۵۷

۱۰-۲ ساده‌ترین ساختار ایجادکنندهٔ رفتار S شکل ۵۸

۱۰-۳ مثال ۱: جمعیت آهوها در یک دشت محصور ۶۴

۱۰-۴ مثال ۲: رشد تقاضا برای یک کالای مصرفی جدید ۶۹

۱۰-۵ مثال ۳: شیوع آنفلوانزا در یک مدرسه ۷۲

تمرین‌ها ۷۸
مراجع ۸۰

فصل یازدهم
تأخیر **۸۱**
۱۱-۱ مقدمه ۸۳
۱۱-۲ تأخیر در جریان مواد در فرایندها ۸۳
۱۱-۳ رفتار تأخیر برای ورودی خطی ۸۷
۱۱-۴ رفتار تأخیر درجهٔ ۱ برای ورودی نوسانی ۹۰
۱۱-۵ تأخیر درجهٔ ۳ ۹۱
۱۱-۶ کاربرد تأخیر در مدل‌های پویا ۹۴
۱۱-۷ تأخیر در اطلاعات ۹۴
۱۱-۸ تأخیر درجهٔ ۱ در اطلاعات ۹۶
۱۱-۹ رفتار تأخیر اطلاعاتی درجهٔ ۱ برای ورودی خطی ۹۸
۱۱-۱۰ رفتار تأخیر اطلاعاتی درجهٔ ۱ برای ورودی نوسانی ۱۰۰
۱۱-۱۱ رفتار تأخیر اطلاعاتی درجهٔ ۱ برای ورودی تصادفی ۱۰۲
۱۱-۱۲ تأخیر اطلاعاتی درجهٔ ۳ ۱۰۴
۱۱-۱۳ زمان تأخیر متغیر ۱۰۸
۱۱-۱۴ جمع‌بندی ۱۱۰
تمرین‌ها ۱۱۲
مراجع ۱۱۸

فصل دوازدهم
رفتار رشد و افول **۱۱۹**
۱۲-۱ مقدمه ۱۲۱
۱۲-۲ ساختار سادهٔ ایجادکنندهٔ رشد و افول ۱۲۱
۱۲-۳ مثال ۱: رشد فروش کالای بادوام در یک بازار محدود ۱۲۲
۱۲-۴ مثال ۲: رشد و افول فروش با مشتریان نامحدود ۱۳۱

تمرین‌ها ۱۴۵
مراجع ۱۴۷

فصل سیزدهم
رفتار نوسانی **۱۴۹**
۱۳-۱ مقدمه ۱۵۱
۱۳-۲ ساختار سادهٔ ایجادکنندهٔ نوسان ۱۵۳
۱۳-۳ سیاست‌های مدیریتی در مدل انبار و نیروی کار ۱۵۸
۱۳-۴ ساختار سادهٔ ایجادکنندهٔ رفتار نوسانی فزاینده ۱۶۲
تمرین‌ها ۱۹۳
مراجع ۱۹۴

فصل چهاردهم
پارامترهای مدل **۱۹۵**
۱۴-۱ مقدمه ۱۹۷
۱۴-۲ ماهیت پارامترها ۱۹۷
۱۴-۳ برآورد مقادیر ثابت در مدل‌های پویا ۲۰۴
۱۴-۴ روش تعیین شکل و رسم توابع ۲۰۶
۱۴-۵ یک مثال برای تعیین تابع و رسم منحنی ۲۰۹
۱۴-۶ تبدیل منحنی با شیب مثبت و منفی به دو منحنی ۲۱۴
۱۴-۷ مطالعات بیشتر در زمینهٔ برآورد پارامترها ۲۱۸
مراجع ۲۲۲

فصل پانزدهم
مدل جمعیت **۲۲۳**
۱۵-۱ مقدمه ۲۲۵
۱۵-۲ مدل جمعیت ۲۲۵
۱۵-۳ کاربرد مدل جمعیت در سازمان‌ها ۲۳۳

۱۵-۴ کاربرد مدل جمعیت در دانشگاه‌ها ۲۳۹
تمرین‌ها ۲۴۴
مراجع ۲۴۸

فصل شانزدهم
پویایی وابستگی به مسیر ۲۴۹
۱۶-۱ مقدمه ۲۵۱
۱۶-۲ فرایند پولیا ۲۵۲
۱۶-۳ پویایی وابستگی به مسیر در رشد دانشگاه ۲۶۲
تمرین‌ها ۲۷۵
مراجع ۲۷۸

فصل هفدهم
اعتبارسنجی مدل ۲۷۹
۱۷-۱ مقدمه ۲۸۱
۱۷-۲ فرایند اعتبارسنجی ۲۸۲
۱۷-۳ هدف مدل ۲۸۵
۱۷-۴ اعتبارسنجی مدل ۲۸۷
۱۷-۵ جمع‌بندی ۳۰۱
تمرین‌ها ۳۰۲
مراجع ۳۰۳

پیشگفتار

جلد اول پویایی شناسی سیستم ها در سال ۱۳۹۷ چاپ شد و مورد استقبال خوبی قرار گرفت. در سال ۱۴۰۰ چاپ سوم کتاب مزبور منتشر شد. در جلد اول پویایی شناسی سیستم ها مبانی تفکر سیستمی ارائه شد. در آن کتاب، نگرش پویا در مقابل نگرش ایستا، مفهوم مدل و کاربرد آن، دیدگاه سیستمی، یک تئوری برای ساختار سیستم، مدل های تشریحی با نگرش سیستمی و روابط علت ومعلولی، الگوهای ساده و رایج در ایجاد برخی پدیده های پویا و نمودارهای جریان و معادلات ریاضی در مدل های پویا معرفی شدند و مورد بحث قرار گرفتند. در کتاب مزبور به عنوان نمونه از نگرش سیستمی و مدل های پویا برای تحلیل تعامل عرضه و تقاضا در بازار استفاده شد. جلد اول پویایی شناسی سیستم ها پایه ای برای مطالب بیشتر در حوزهٔ پویایی شناسی فراهم ساخت.

اکنون با توجه به علاقهٔ دانشجویان و کارشناسان، مدیران و استادان به دسترسی به مطالب بیشتر در زمینهٔ پویایی شناسی سیستم ها، جلد دوم کتاب پویایی شناسی سیستم ها در اختیار علاقه مندان قرار می گیرد. جلد دوم بیشتر به ساختارهای سیستمی ساده ای که ایجادکنندهٔ رفتارهای پویای رایج هستند می پردازد. ساختارهای سیستمی ایجادکنندهٔ رفتارهای پویای رایج که در زمینه های مختلف طبیعی، اقتصادی، اجتماعی و حتی روان شناسی رواج دارد در این کتاب مورد بررسی قرار می گیرد. ساختارهای مزبور، ساختارهایی کلی است که در حوزه های مختلف با انتخاب مفاهیم و متغیرهای مناسب آن حوزه می تواند کاربرد داشته باشد و رفتار پویای مورد نظر در آن حوزه را تحلیل کند.

اولین فصل کتاب به دنبال آخرین فصل جلد اول، که فصل ۸ بود، فصل ۹ نام گذاری شده است. فصل ۹ ساختار ایجادکنندهٔ رفتارهای رشد نمایی و هدف جو را معرفی می کند. در رفتارهای نمایی وقتی متغیری رشد (کاهش) می کند با افزایش (کاهش) مقدار آن شیب افزایش (کاهش) آن نیز بیشتر می شود. در رفتارهای هدف جو، متغیر به طرف یک مقدار هدف حرکت می کند و هرچه به هدف نزدیک تر می شود شیب تغییرش کمتر می شود. فصل ۱۰ ساختار مربوط به رفتار S شکل یا منحنی لجستیک را بررسی می کند. در رفتار S شکل یک متغیر ابتدا به صورت نمایی رشد می کند و بعد از عبور از یک نقطهٔ عطف رفتار به صورت هدف جو درمی آید و به سمت یک هدف یا مقدار تعادلی میل می کند.

در فصل ۱۱ کتاب ساختارهای ایجادکنندهٔ تأخیرها معرفی می شود. تأخیرهای موجود در جریان مواد و تأخیرهای موجود در انتقال و پذیرش اطلاعات جدید در بسیاری از سیستم های

اقتصادی و اجتماعی مطرح‌اند. در فصل ۱۲ رفتار رشد بیش از حد تعادل و سقوط یا بازگشت به وضع تعادل (overshoot) بحث می‌شود. رفتار رشد بیش از حد تعادل در موقعیت‌های مختلف نظیر رشد بیش از حد ظرفیت تولیدی یک کالای جدید، رشد و افول محبوبیت یک سیاست‌مدار و یا رشد فروش بیش از ظرفیت تحویل کالا اتفاق می‌افتد.

فصل ۱۳ کتاب رفتار نوسانی و ساختار ایجادکنندهٔ آن را مورد بررسی قرار می‌دهد. رفتار نوسانی در پدیده‌های مختلف فیزیکی، مثل نوسان یک جرم آویزان از فنر، پدیده‌های اقتصادی مثل نوسان قیمت پیاز و سیب‌زمینی، در محبوبیت یک حزب در مقایسه با سایر احزاب و بسیاری موارد دیگر مشاهده می‌شود. ساختار سادهٔ ایجادکنندهٔ رفتار نوسانی و سیاست‌هایی که می‌تواند نوسان را فزاینده و یا کاهنده کند نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

در فصل ۱۴ کتاب روش‌های تعیین مقادیر عددی پارامترها و توابع مورد استفاده در مدل‌های پویا مورد بحث قرار می‌گیرد. طبعاً هر مدل پویا شامل تعدادی پارامتر، یا مقادیر ثابت، و توابع غیرخطی است. برخی پارامترها یا توابع به سیاست‌هایی که در سیستم اعمال می‌شوند بستگی دارد که به آنها پارامترهای سیاستی می‌گویند. برخی دیگر از پارامترها و توابع وابسته به ویژگی‌های ساختار مدل و یا رفتار عواملی است که خارج از حوزهٔ اختیار مدیران سیستم می‌باشد که باید با روش‌های مناسب تخمین زده شوند.

در فصل ۱۵ مدل جمعیت به‌عنوان مثالی از کاربرد پویایی‌شناسی معرفی می‌شود. در مدل جمعیت تغییر ساختار جمعیت در اثر تغییر نرخ زادوولد و پیامدهای تغییر ساختار جمعیت بحث می‌شود. همچنین در آن فصل کاربرد مدل جمعیت در حوزه‌های دیگر مانند پرسنل سازمان‌ها و استادان دانشگاه‌ها بررسی می‌شود. در فصل ۱۶ پدیدهٔ وابستگی به مسیر و مثال‌هایی از کاربرد آن معرفی می‌شود. بسیاری از پدیده‌های دنیای واقع در اثر وقایع تصادفی که یک مسیر را به‌طور اولیه شکل می‌دهند به وجود می‌آیند و به یک حالت پایدار می‌رسند. رانندگی از سمت راست، ترتیب حروف روی صفحات کلید ماشین‌های تایپ و فرهنگ در یک جامعه نمونه‌هایی از پدیده‌هایی هستند که به‌صورت وابستگی به مسیر شکل نسبتاً پایدار خود را پیدا کرده‌اند و تغییر وضعیت آنها بسیار مشکل است.

فصل ۱۷ کتاب در مورد اعتبارسنجی مدل‌های پویاست. هیچ مدلی عین دنیای واقع نیست. کسی واقعیت دنیای بیرون را به‌طور کامل نمی‌شناسد. همهٔ مدل‌ها سعی دارند بدل ساده‌شده، قابل قبول و مفیدی از دنیای واقع ارائه دهند. اعتبار مدل‌ها امری نسبی است. مدلی معتبرتر است که به فهم دنیای بیرون و کنترل و مدیریت دنیای بیرون بیشتر کمک کند.

البته برای اعتبارسنجی مدل‌های پویا و افزایش اطمینان از اعتبار مدل ملاک‌ها و آزمون‌هایی وجود دارد که در فصل ۱۷ معرفی می‌شوند.

امیدوارم جلد ۲ کتاب پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای علاقه‌مندان به تفکر سیستمی و پویایی‌شناسی پدیده‌های اجتماعی و اقتصادی که شامل تحلیل و درک ساختارهای ایجادکنندهٔ تغییرات در سازمان‌ها، شهرها و کشور می‌شوند مفید واقع شود.

در پایان از کسانی که در طی سالیان گذشته در تدریس درس پویایی‌شناسی سیستم‌ها به من کمک کردند تا مطالب این کتاب آماده شود تشکر می‌کنم. در پیشگفتار جلد اول اسامی بسیاری از آنها را ذکر کردم. لازم است در اینجا از آقای مهندس محمدرضا قلی‌زاده که پیش‌نویس کتاب را با دقت و کیفیت خوبی ویرایش کردند و نیز خانم الهام علی‌محمدیان که متن کتاب را با سرعت و دقت تایپ نمودند تشکر کنم. همچنین از انتشارات آریاناقلم و مدیرعامل محترم آن سرکار خانم سمیه محمدی که زحمت چاپ و انتشار کتاب را کشیدند سپاسگزاری می‌کنم.

علینقی مشایخی
استاد دانشکدهٔ مدیریت و اقتصاد دانشگاه صنعتی شریف

ساختارهای سادهٔ مولد رفتار رشد نمایی و رفتار هدف‌جو

۹

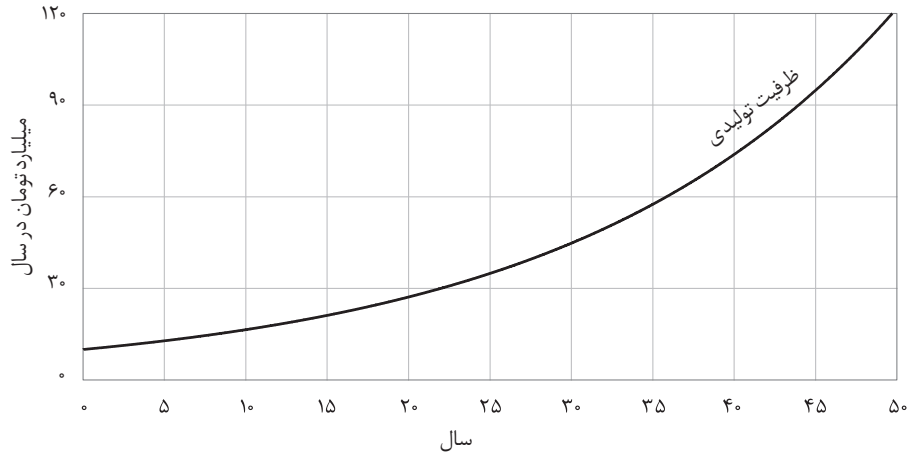
۹-۱ مقدمه

جلد اول کتاب پویایی‌شناسی سیستم‌ها به مبانی تفکر پویا و سیستمی پرداخت. در جلد اول کتاب مباحث مختلفی ارائه شد ازجمله نگاه پویا به‌جای نگاه ایستا به دنیا، فهم دنیا براساس مدل، تعامل بین اجزای دنیای واقع در چارچوب و محدودهٔ یک نظام به‌عنوان مبنای ایجاد پویایی، تعامل بین اجزای یک نظام به‌صورت پس‌خوران، وجود متغیرهای حالت در دنیای واقع که شرایط دنیا را در یک مقطع زمانی مشخص می‌کند (که خود انباشت جریان‌هایی هستند که در طی زمان به آن متغیرها وارد و یا از آنها خارج می‌شوند)، کنترل جریان‌های ورودی و خروجی به متغیرهای حالت براساس قوانین فیزیکی و یا قانونمندی تصمیم‌گیری‌های انسانی و بر مبنای شرایط سیستم و بالاخره ایجاد رفتارهای پویا براساس ساختارهای ناشی از تعامل بین اجزای یک سیستم، نمودارهای علت‌ومعلولی و نمودارهای جریان برای معرفی مدل‌های پویا که براساس اصول و مبانی تفکر سیستمی ساخته می‌شوند. با استفاده از روابط علت‌ومعلولی، الگوهای پویایی ساده و رایجی برای تعدادی از پدیده‌های رایج در دنیای واقع با نام کهن‌الگوها ارائه شد. همچنین در جلد اول کتاب نوشتن معادلات ریاضی مدل پویا و یک نرم‌افزار کامپیوتری برای شبیه‌سازی مدل‌های ریاضی معرفی شد. علاوه‌برآن، به‌عنوان نمونه، برای تحلیل تعامل عرضه و تقاضا در بازار کالا از یک مدل ساده تا مدلی که فرضیات آن واقع‌گرایانه‌تر بود توسعه داده شد و در هر مرحله رفتار هر مدل براساس ساختار آن مدل تحلیل شد.

جلد دوم کتاب ساختارهای سادهٔ ایجادکنندهٔ رفتارهای پویای رایج را معرفی می‌کند. در این فصل، ساختار ایجادکنندهٔ رشد نمایی و رفتار هدف‌جو معرفی می‌شود و کاربرد این ساختار در برخی از پدیده‌های دنیای واقع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بخش اول: رشد نمایی

یکی از پدیده‌های پویا در دنیای واقع رشد نمایی یک متغیر در یک دورهٔ زمانی خاص است. در رشد نمایی با افزایش مقدار متغیر شیب افزایش آن نیز زیاد می‌شود. فروش یک شرکت و درآمد ملی در اقتصاد نمونه‌هایی از پدیده‌های پویا هستند که در دوره‌هایی به‌طور نمایی رشد می‌کنند. شکل ۹-۱ رشد نمایی ظرفیت تولید را به‌عنوان یک متغیر در یک اقتصاد فرضی در طول زمان نشان می‌دهد. ظرفیت تولیدی از مقدار اولیهٔ ۱۰ میلیارد تومان در سال شروع می‌شود و با رشد نمایی در سال ۵۰ به ۱۲۰ میلیارد تومان در سال می‌رسد. در شکل ۹-۱، هرچقدر ظرفیت تولیدی بیشتر می‌شود، شیب افزایش آن، یا مقداری که در یک سال افزایش می‌یابد، هم بیشتر



شکل ۹-۱ رشد نمایی ظرفیت تولید

می‌شود. به‌عنوان مثال در ۲۵ سال اول، از زمان صفر تا سال ۲۵، متغیر مورد نظر از ۱۰ میلیارد تومان در سال به حدود ۳۵ میلیارد تومان در سال رسیده است به‌طوری‌که در هر سال به‌طور متوسط ۱ میلیارد تومان بیشتر شده است. ولی در ۲۵ سال بعد، بین سال‌های ۲۵ تا ۵۰، از مقدار ۳۵ میلیارد تومان در سال به ۱۲۰ میلیارد تومان در سال افزایش یافته است که متوسط افزایش سالانه ۳٫۴ میلیارد تومان می‌باشد.

۹-۲ ساده‌ترین ساختار ایجاد رشد نمایی

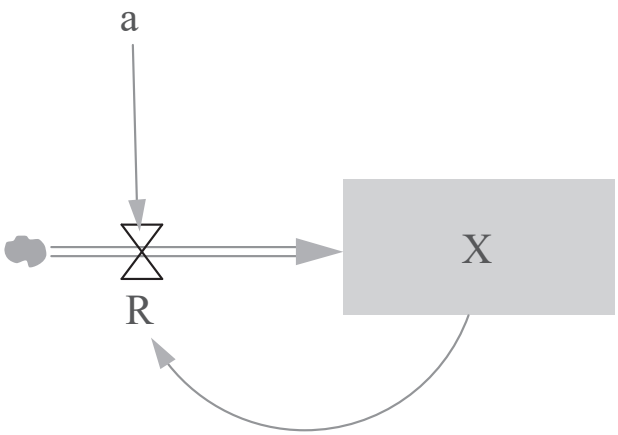
ساده‌ترین ساختار ایجاد رشد نمایی یک پس‌خوران مثبت با یک متغیر حالت است مطابق آنچه در شکل ۹-۲ نشان داده شده است. پس‌خوران با یک متغیر حالت را پس‌خوران درجهٔ ۱ می‌گویند، چون یک تجمع یا انتگرال‌گیری در آن وجود دارد؛ درواقع درجات یک سیستم معادل تعداد متغیرهای حالت آن سیستم است. تعداد متغیرهای حالت یک سیستم تعداد تجمع یا انتگرال‌گیری در آن سیستم را نشان می‌دهد.

معادلات این ساختار در نرم‌افزار vensim به شکل زیر است:

X=INTEG(R,10)

R=a*X

a=0.05



شکل ۹-۲ نمودار جریان ساختار سادهٔ ایجادکنندهٔ رشد نمایی

براساس این معادلات متغیر X با نرخ ۵٪ در سال رشد می‌کند.[۱]

همان‌طوری که در شکل ۹-۳-الف ملاحظه می‌شود، در ساختار سادهٔ رشد نمایی رابطهٔ بین متغیر نرخ و متغیر حالت خطی است. هرچقدر X زیاد می‌شود، مقدار R یا شیب افزایش X نیز بیشتر می‌شود.

افزایش شیب منحنی X در طی زمان در شکل ۹-۳-ب نشان داده شده است.

رابطهٔ R با X برای ایجاد یک رشد نمایی که در آن با افزایش مقدار متغیر حالت شیب افزایش آن نیز زیاد شود می‌تواند غیرخطی هم باشد. فقط کافی است که با افزایش متغیر حالت مقدار متغیر نرخ نیز زیاد شود. البته هرچقدر افزایش مقدار نرخ در ازای افزایش مقدار متغیر حالت بیشتر باشد، رشد نمایی متغیر حالت نیز بیشتر می‌شود. به‌عنوان مثال رابطهٔ R با X می‌تواند به‌صورت $R = a*X^2$ و یا $R = a*\sqrt{X}$ باشد. درآن‌صورت تغییرات X در شکل ۹-۴ نشان داده شده است. همان‌طوری که در شکل ۹-۴ نشان داده شده است، در هر سه حالت رشد

---

۱. معادلات این مدل در قالب معادلات دیفرانسیل به شکل زیر است:

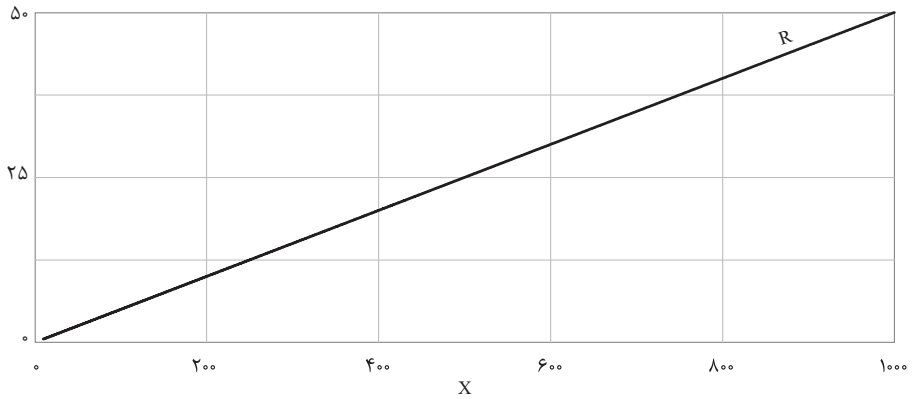
(1) R=a.X

چون مقدار X در واحد زمان با نرخ R تغییر می‌کند، مشتق X نسبت به زمان مساوی R است.

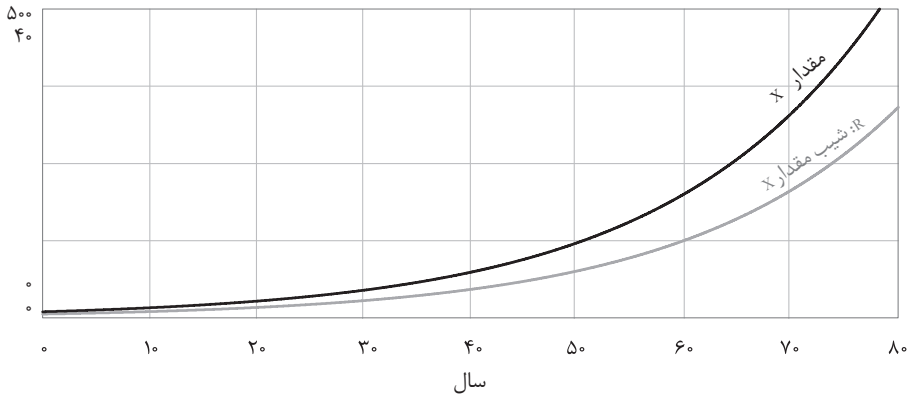
(2) dX/dt=R

معادلات ۱ و ۲ یک دستگاه معادلهٔ دیفرانسیل درجهٔ ۱ است که حل ریاضی آن ساده است و معادلهٔ X برحسب زمان به دست می‌آید.
با جایگزینی مقدار R از معادلهٔ ۱ در معادلهٔ ۲ و حل معادلهٔ دیفرانسیل درجهٔ اول معادلهٔ X برحسب زمان به‌صورت معادلهٔ ۳ به دست می‌آید:

(3) dX/dt=a.X => dX/X=a.dt => ln(X/X0)=a.(t-t0) => X(t)=X0*e^a*(t-t0)



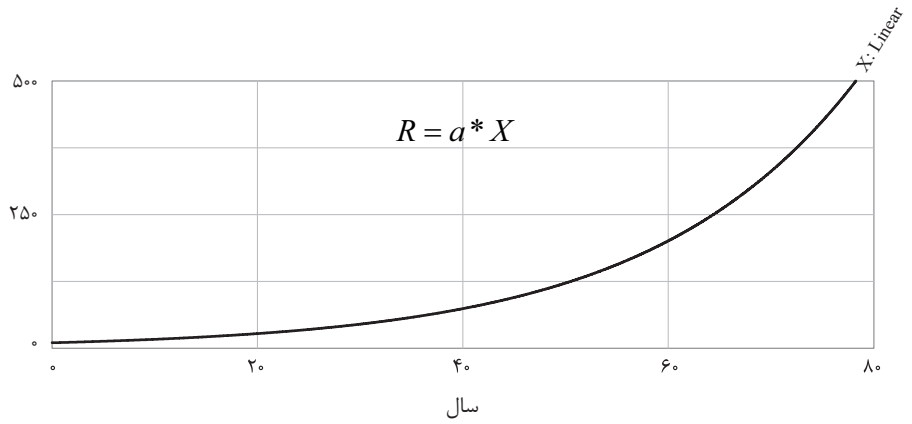
شکل ۹-۳-الف رابطهٔ بین متغیر نرخ و حالت در پس‌خوران مثبت درجهٔ ۱

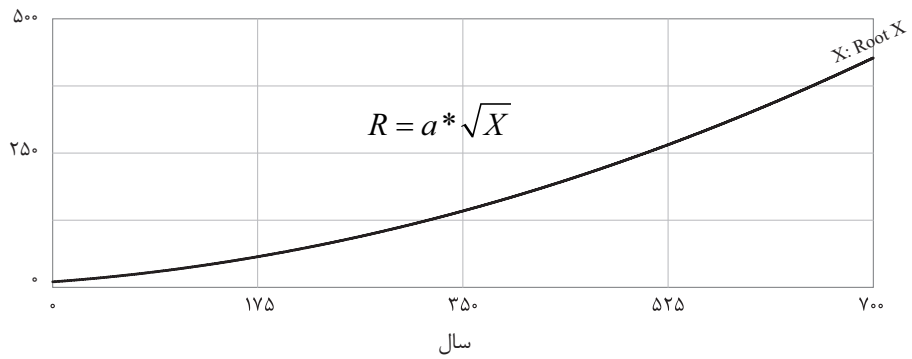


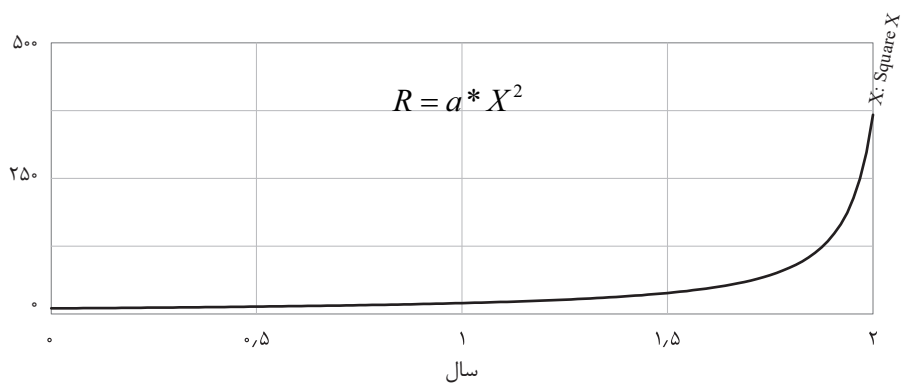
شکل ۹-۳-ب افزایش نمایی متغیرهای نرخ و حالت در پس‌خوران مثبت درجهٔ ۱

متغیر X نمایی است، ولی وقتی رابطهٔ بین R و X خطی باشد در مدت ۷۰ سال به حدود ۴۰۰ می‌رسد، وقتی R متناسب با توان دوم X باشد فقط دو سال طول می‌کشد تا X به حدود ۴۰۰ برسد و وقتی R متناسب با ریشهٔ دوم X باشد نزدیک ۷۰۰ سال طول می‌کشد تا X به ۴۰۰ برسد. تفاوت سه حالت مختلف در سرعت رشد X است.

یکی از ویژگی‌های رشد نمایی آن است که زمان دوبرابر شدن آن ثابت است. در معادلهٔ ۳ در پانوشت صفحهٔ قبل اگر نسبت $X(t) / X0$ را مساوی ۲ قرار دهیم و زمان ۲ برابر شدن را TD بنامیم نتیجه می‌شود:







شکل ۹-۴ نرخ رشد X برای سه حالت رابطهٔ R و X

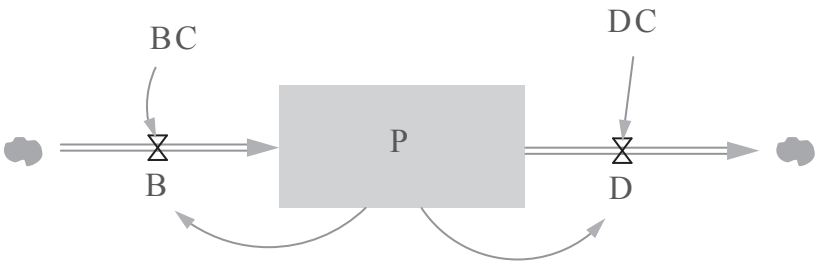
$$(4)\ \ln\left(\frac{X(t)}{X0}\right) = \ln(2) = 0.693 = a*TD \Rightarrow TD = 0.693 / a$$

به‌عنوان مثال اگر درصد رشد سالانهٔ جمعیت (a) معادل ۳ درصد در سال باشد، زمان دوبرابر شدن جمعیت معادل ۲۳٫۱ سال می‌شود:

$$TD = \frac{0.693}{0.03} = 23.1$$

۹-۳ مثال رشد جمعیت

همان‌طوری که در شکل ۹-۵ مشاهده می‌شود دو نرخ عمده‌ای که جمعیت یک کشور را تغییر می‌دهند نرخ‌های تولد و مرگ‌ومیرند.



شکل ۹-۵ نمودار جریان مدل جمعیت با در نظر گرفتن تولد و مرگ‌ومیر

معادلات تغییر جمعیت به‌صورت زیر است:

B=(BC/100)*P

BC=5

D=(DC/100)*P

DC=2

P=INTEG(B-D,35)

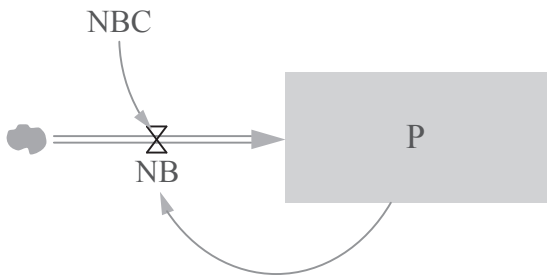
FINAL TIME=1457

INITIAL TIME=1357

SAVEPER=TIME STEP

TIME STEP=0.125

اگر تفاوت نرخ تولد و مرگ‌ومیر را خالص زادوولد (NB) بنامیم نمودار مدل به‌صورت شکل ۹-۶ رسم می‌شود:



شکل ۹-۶ نمودار جریان مدل جمعیت با در نظر گرفتن تولد خالص

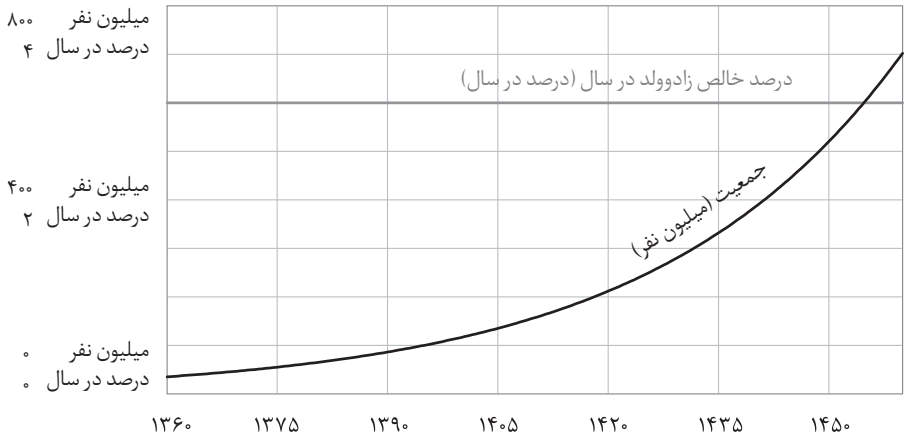
معادلات مدل بالا به‌صورت زیر است:

NB=(NBC/100)*P

NBC=3

P=INTEG(NB,35)

وقتی ضریب خالص زادوولد معادل ۳ درصد در سال و مقدار اولیهٔ جمعیت در سال ۱۳۵۷ معادل ۳۵ میلیون نفر باشد، با شبیه‌سازی سیستم تغییرات جمعیت از سال ۱۳۶۰ به‌صورت شکل ۹-۷ به دست می‌آید.



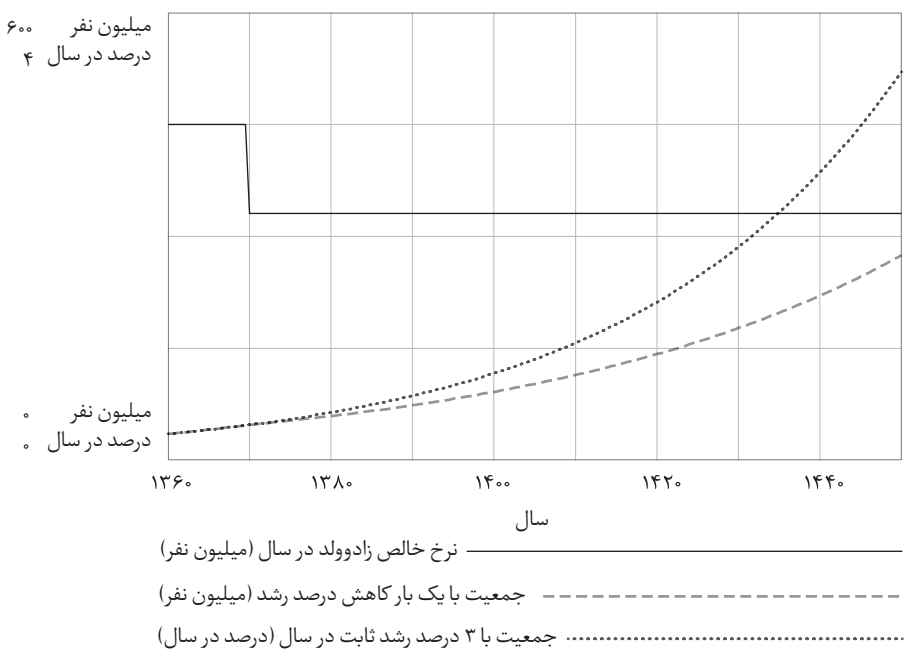
شکل ۹-۷ رفتار مدل رشد جمعیت با ۳ درصد تولد خالص در سال

اگر جمعیت کشور از سال ۱۳۵۷ با نرخ ۳ درصد در سال رشد می‌کرد، در سال ۱۳۹۵ جمعیت به حدود ۱۰۰ میلیون و در سال ۱۴۰۰ به حدود ۱۱۶٫۱ میلیون نفر می‌رسید. همچنین، با چنین نرخ رشدی، در سال ۱۴۶۰ جمعیت به حدود ۷۰۲ میلیون نفر می‌رسید. البته همان‌طوری که در فصل ۶ مطرح شد هر رشد نمایی مادی با محدودیت مواجه خواهد شد. رشد جمعیت با نرخ ۳ درصد در سال در کشور با محدودیت اقتصادی و اجتماعی مواجه می‌شود. و نرخ رشد کاهش پیدا می‌کند، همان‌طوری که نرخ رشد جمعیت از دهۀ ۱۳۶۰ و به‌خصوص در دهه‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ کاهش یافت.

چنانچه فرض کنیم از سال ۱۳۷۰ به بعد نرخ خالص تولد از ۳ درصد به ۲٫۲ درصد در سال کاهش پیدا کند، این تغییر را می‌توان با معادلۀ زیر در مدل اعمال کرد:

NBC=3-STEP(0.8,1370)

با استفاده از معادلۀ مزبور و شبیه‌سازی مدل، رفتار جمعیت به شکل ۹-۸ نسبت به حالت قبل تغییر می‌کند.



شکل ۹-۸ رفتار مدل جمعیت با ۳ درصد تولد خالص در سال و کاهش تولد خالص به ۲٫۲ درصد در سال از سال ۱۳۷۰

با کاهش ۰٫۸ درصد از خالص نرخ رشد، جمعیت در پایان دههٔ ۱۴۶۰ از جمعیت ۷۰۲ میلیون نفر، به ۳۴۱٫۹ میلیون نفر یا کمتر از نصف مقدار قبلی می‌رسد.

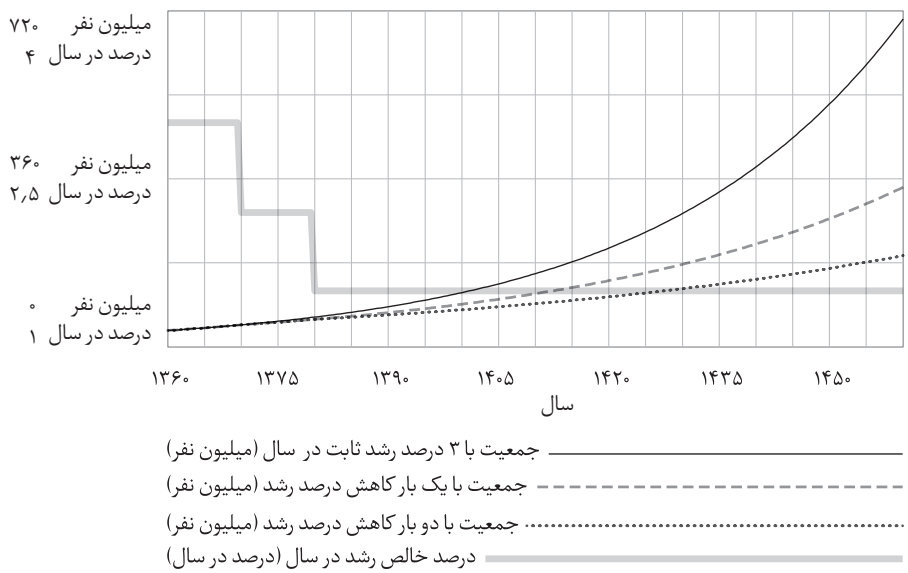
البته در ایران نرخ خالص تولد در دههٔ ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ کاهش یافت. فرض می‌کنیم از ابتدای دههٔ ۱۳۸۰ نرخ خالص تولد از ۲٫۲ درصد در سال به ۱٫۵ درصد در سال کاهش پیدا کند یا به‌عبارت‌دیگر خالص نرخ تولد از ۳ درصد در سال در ۱۳۶۰، به ۲٫۲ درصد در سال در آغاز ۱۳۷۰ و به ۱٫۵ درصد در سال از آغاز دههٔ ۱۳۸۰ کاهش یابد. تغییرات مزبور با معادلهٔ زیر در مدل ایجاد می‌شود:

NBC=3-STEP(0.8,1370)-STEP(0.7,1380)

نتیجهٔ شبیه‌سازی مدل با تغییر جدید در معادلهٔ NBC در شکل ۹-۹ نشان داده شده است. در این شکل با کاهش مجدد خالص نرخ تولد در سال ۱۳۸۰، جمعیت در سال ۱۴۶۰ به ۱۹۵٫۳۶ میلیون نفر می‌رسد که کمتر از ۲۸٪ مقدار جمعیت ۷۰۲ میلیون نفر برای حالت اول است.

بالاخره اگر نرخ خالص زادوولد در آغاز ۱۳۹۰ به ۱ درصد در سال کاهش یابد، معادلهٔ NBC به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

NBC=3-STEP(0.8,1370)-STEP(0.7,1380)-STEP(0.5,1390)

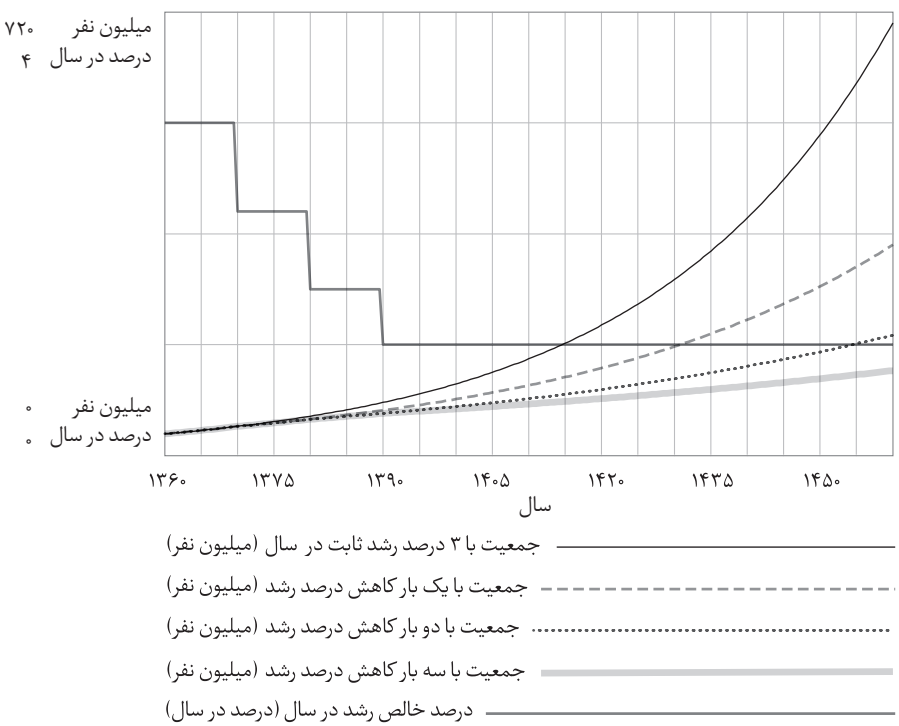


شکل ۹-۹ رفتار مدل جمعیت با دو بار کاهش در نرخ تولد خالص در سال در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۸۰ به ۱٫۵ درصد در سال

با شبیه‌سازی مدل با استفاده از معادلهٔ مزبور، رفتار سیستم در شکل ۹-۱۰ نشان داده شده است. با کاهش نرخ خالص زادوولد به سطح ۱ درصد از سال ۱۳۹۰ به بعد تعداد جمعیت کشور در سال ۱۴۶۰ به‌جای ۷۰۲ میلیون نفر به ۱۳۷٫۷ میلیون نفر می‌رسد.

در شبیه‌سازی‌های بالا دو هدف دنبال می‌شد. یکی نشان دادن این بود که کاهش خالص نرخ تولد در بلندمدت اثرات بزرگی بر تعداد جمعیت کشور دارد، به‌طوری‌که با کاهش پله‌ای نرخ خالص زادوولد در سه مرحله، جمعیت سال ۱۴۶۰ کشور به‌جای ۷۰۲ میلیون نفر به ۱۳۷٫۷ میلیون نفر کاهش می‌یابد.

هدف دوم از شبیه‌سازی‌ها نشان دادن چگونگی تغییر معادلهٔ مدل برای اعمال فرضیات جدید و استفاده از شبیه‌سازی برای نشان دادن نتیجهٔ فرضیات جدید بود. پویایی جمعیت با جزئیات بیشتر در قسمت‌های بعدی کتاب که به مدل‌های پیچیده‌تری می‌پردازد بررسی خواهد شد.

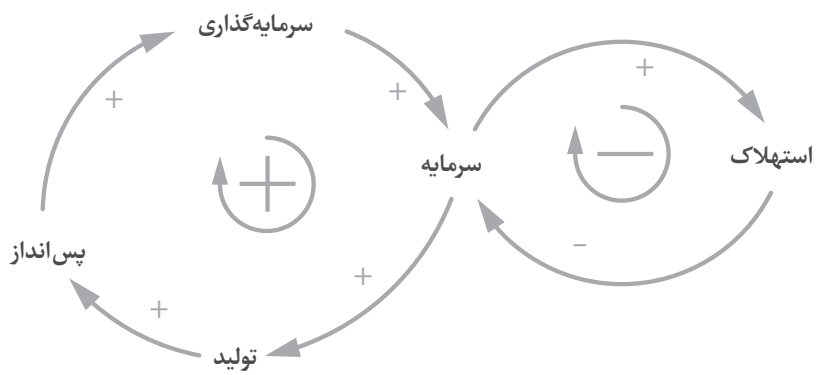


شکل ۹-۱۰ رفتار مدل جمعیت با سه بار کاهش در تولد خالص در سال در سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ به ۱ درصد در سال

۹-۴ مثال مدل رشد اقتصادی

مدل رشد اقتصادی هارود-دمر (Harrod-Damar) اولین مدل ریاضی رشد اقتصادی بود که در اول دههٔ ۱۹۴۰ مطرح شد. در این مدل سرمایه به‌عنوان تنها عامل تولید در نظر گرفته می‌شود. میزان تولید متناسب با سرمایه است. یک ضریب ثابت که نسبت سرمایه به تولید است رابطهٔ خطی بین تولید و سرمایه را تعیین می‌کند. بخشی از تولید پس‌انداز می‌شود. ضریب پس‌انداز از تولید ملی به‌عنوان یک عدد ثابت فرض می‌شود. تمام پس‌انداز سرمایه‌گذاری می‌شود و سرمایه‌گذاری سرمایه را افزایش می‌دهد. افزایش سرمایه موجب افزایش تولید می‌شود و یک پس‌خوران مثبت برای رشد اقتصاد شکل می‌گیرد.

شکل ۹-۱۱ توضیحات بالا را به‌صورت روابط علت‌ومعلولی نشان می‌دهد. در کنار پس‌خوران مثبت مزبور البته یک پس‌خوران منفی ناشی از استهلاک سرمایه هم وجود دارد: سرمایه که بیشتر می‌شود استهلاک سرمایه نیز زیاد می‌شود و استهلاک از سرمایه کم می‌کند.



شکل ۹-۱۱ روابط علت‌ومعلولی مدل هارود-دمر

شکل ۹-۱۲ نمودار جریان مدل را نشان می‌دهد. در نمودار، جریان سرمایه (K) با سرمایه‌گذاری (I) اضافه و با استهلاک (D) کم می‌شود. برای محاسبهٔ استهلاک، عمر سرمایه (L) در نظر گرفته شده است. تولید (Y) توسط سرمایه (K) و نسبت سرمایه به تولید (COR) تعیین می‌شود. پس‌انداز (S) را میزان تولید (Y) و ضریب پس‌انداز (SC) تعیین می‌کند. سرمایه‌گذاری (I) را مقدار پس‌انداز (S) مشخص می‌کند.

ادامه دارد...

برای آشنایی بیشتر با کتاب پویایی‌شناسی سیستم‌ها یا سفارش
نسخهٔ کامل این کتاب به وبسایت انتشارات آریاناقلم مراجعه کنید.

www.AryanaGhalam.com

در جلد اول کتاب پویایی‌شناسی سیستم‌ها مبانی تفکر سیستمی ارائه شد. در آن کتاب موضوعاتی ازجمله نگرش پویا در مقابل نگرش ایستا، مفهوم مدل و کاربرد آن و دیدگاه سیستمی، مورد بحث قرار گرفتند.

در جلد دوم کتاب ساختارهای سیستمی ساده‌ای که ایجادکنندهٔ رفتارها در زمینه‌های مختلف طبیعی، اقتصادی، اجتماعی و حتی روان‌شناسی است مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختارهایی کلی که در حوزه‌های مختلف با انتخاب مفاهیم و متغیرهای مناسب آن حوزه می‌تواند کاربرد داشته باشد و رفتار پویای مورد نظر در آن حوزه را تحلیل کند.

این کتاب برای علاقه‌مندان به تفکر سیستمی و پویایی‌شناسی پدیده‌های اجتماعی و اقتصادی که شامل تحلیل و درک ساختارهای ایجادکنندهٔ تغییرات در سازمان‌ها، شهرها و کشور می‌شوند مفید است.

انتشارات آریاناقلم

9 786227 089325