

# آشنایی با مدل‌سازی و کنترل کیفی

## پرویز جبه‌دار مارالانی

استاد گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

## ساسان بختیاری

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۷/۱/۱۶، تاریخ تصویب ۷۸/۱۲/۲۱)

## چکیده

روش‌هایی که تاکنون برای مدل‌سازی، تحلیل و کنترل سیستم‌ها به کار می‌رفته‌اند عموماً مبتنی بر تعیین معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و طراحی براساس یک سری روش‌ها و الگوریتم‌های ریاضی بوده‌اند. مطالعات نشان می‌دهند که انسان می‌تواند بدون درگیر شدن در محاسبات پیچیده و بی‌نیاز از مدل‌های دقیق ریاضی، پیچیده‌ترین سیستم‌ها را به راحتی، لیکن با کمی تقریب، تحلیل یا کنترل کند. تلاش در پیاده‌سازی روشی نظیر روش استدلال انسان در سیستم‌های ساخته دست بشر زمینه‌ساز معرفی سیستم‌های کنترل خبره و هوش مصنوعی بوده است. در این مقاله کنترل کیفی به عنوان یک روش جدید جهت رسیدن به این هدف معرفی می‌شود. نحوه استدلال کیفی، کاربردها و مزایای این روش مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین کنترل فازی به عنوان یک روش متداول و پذیرفته شده در هوش مصنوعی با کنترل کیفی مقایسه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** استدلال کیفی، استدلال علی، کنترل کیفی، مدل‌سازی کیفی، هوش مصنوعی.

## مقدمه

آشکار می‌سازد این است که انسان برای استدلال، نیاز به کلیه جزئیات مدل و مقادیر دقیق حالت سیستم ندارد. تاکنون روش‌های مختلفی برای نمایش و توصیف «انسانی» اطلاعات موجود از یک سیستم به کار رفته‌اند. استفاده از نمادها و کلمات، بازه‌های اعداد و منطق فازی مثالهایی از این قبیل هستند. ولی هیچ یک از این روش‌ها کاملاً پاسخگوی نیازها نبوده‌اند [۱۸]. لزوم ساده‌سازی، استفاده از اطلاعات غیردقیق و تشکیل مدل‌هایی که براساس این اطلاعات رفتارهای سیستم را نتیجه دهند منجر به معرفی یک روش جدید به نام «مدل‌سازی کیفی»<sup>۱</sup> شد.

اولین بار فورباس<sup>۲</sup> [۱۸] در سال ۱۹۸۴ در مقاله خود این نکته را مطرح کرد که نتیجه فرآیندهای فیزیکی را می‌توان بدون تحلیل ریاضی و تنها با تحلیل کیفی پیش بینی کرد. وی چنین فیزیکی را فیزیک ساده<sup>۳</sup> نامید که تنها بر اطلاعات کلی از ارتباطات اجزای فرآیند متکی بود. دکلر<sup>۴</sup> [۱۵] نیز در همان موقع نظریه فیزیک کیفی و نحوه فرموله کردن آن را بررسی می‌کرد. در سال ۱۹۸۶، کوپرز<sup>۵</sup> [۳۰] یک روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی کیفی را با هدف کاربرد در هوش مصنوعی و تحلیل الگوهای رفتاری و گفتاری معرفی کرد. وی در ادامه کار خود سعی در تکامل این روش برای انجام تحلیل‌های کیفی-عددی و کاربرد آنها در کنترل داشت [۹]. در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار یک روش مدل‌سازی کیفی

مدل‌ها و مسایلی که امروزه مهندسين با آنها روبرو هستند نسبت به گذشته بسیار پیچیده‌تر و گسترده‌تر شده‌اند. سیستم‌هایی که در عمل ظاهر می‌شوند عموماً دارای ابعاد بسیار بالایی هستند، شناسایی و تعیین مدل آنها بسیار پرهزینه و مشکل است. در بعضی موارد نمی‌توان حتی مدل دقیقی را از یک فرآیند به دست آورد. سیستم‌های غیرخطی، به دلیل عملکرد برتری که نسبت به سیستم‌های خطی دارند، روز به روز مورد توجه بیشتر قرار می‌گیرند. همچنین در صنعت امروز مسایلی مانند ایمنی، حفظ محیط زیست، کیفیت تولید و سودآوری به تدریج اهمیت پیدا می‌کنند [۱۳]. مدل‌سازی ریاضی چنین مفاهیمی اگر غیرممکن نباشد، کار ساده‌ای هم نخواهد بود. با چنین توضیحاتی کاملاً مشخص است که روش‌های کلاسیک و ریاضی روز به روز کارایی خود را از دست می‌دهند.

بررسی شیوه رفتار انسان در مواجهه با پدیده‌های فیزیکی دنیای اطرافش نشان می‌دهد که انسان بدون درگیر شدن در محاسبات و یا مدل‌سازیهای ریاضی و دقیق می‌تواند با پیچیده‌ترین مسایل روبرو شده و اهداف خود را عملی سازد. انسان تنها با مشاهده یک پدیده فیزیکی می‌تواند مکانیزم تقریبی هدایت کننده آن را در ذهن خود تصویر کند و حتی رفتار آینده و یا گذشته آن را با استفاده از مدل ذهنی خود تعیین کند. آنچه که خود را در استدلال انسان

بین اجزا و متغیرهای سیستم به نحو روشن تر و مشخص تری تعریف شود. به عنوان مثال در اکثر موارد رابطه بین دو متغیر  $X$  و  $Y$  در یک سیستم از یک تابع صعودی یا نزولی یکنوا پیروی می‌کند. با وجود واضح و روشن بودن وجود این رابطه بین دو متغیر، تعیین تابع ریاضی ارتباط دهنده دو متغیر کار بسیار مشکلی است. کوپرز [۳۱، ۳۰]، به عنوان راه حل مناسب برای مدلسازی کیفی، نمادهای  $M^+$  و  $M^-$  را معرفی می‌کند که به ترتیب نماینده یک رابطه ریاضی صعودی یا نزولی بین متغیرهای، بدون تعریف شکل ریاضی آن، می‌باشند. مثلاً اگر ارتفاع مایع درون مخزنی را با  $H$  و فشار وارد بر کف مخزن را با  $P$  نشان دهیم، رابطه بین آنها بدون توجه به شکل مخزن به صورت  $P = M^+(H)$  خواهد بود. هر شخصی بدون داشتن اطلاعات وسیع از فیزیک می‌داند که با افزایش ارتفاع مایع، فشار وارد بر کف مخزن نیز افزایش می‌یابد و این همان نتیجه‌ای است که از توصیف کیفی رابطه بین دو متغیر حاصل می‌گردد. برای آن که بتوان هر ارتباط کیفی بین متغیرها را با نمادهای مناسب نمایش داد، کوپرز مجموعه خود را با تعریف نمادهای ADD برای جمع، MULT برای ضرب، MINUS برای تغییر علامت و DERIV برای نمایش عمل مشتق‌گیری کامل کرد و مدل‌های حاصل را معادلات دیفرانسیل کیفی (Qualitative Differential Equations) و یا به اختصار QDE نامید.

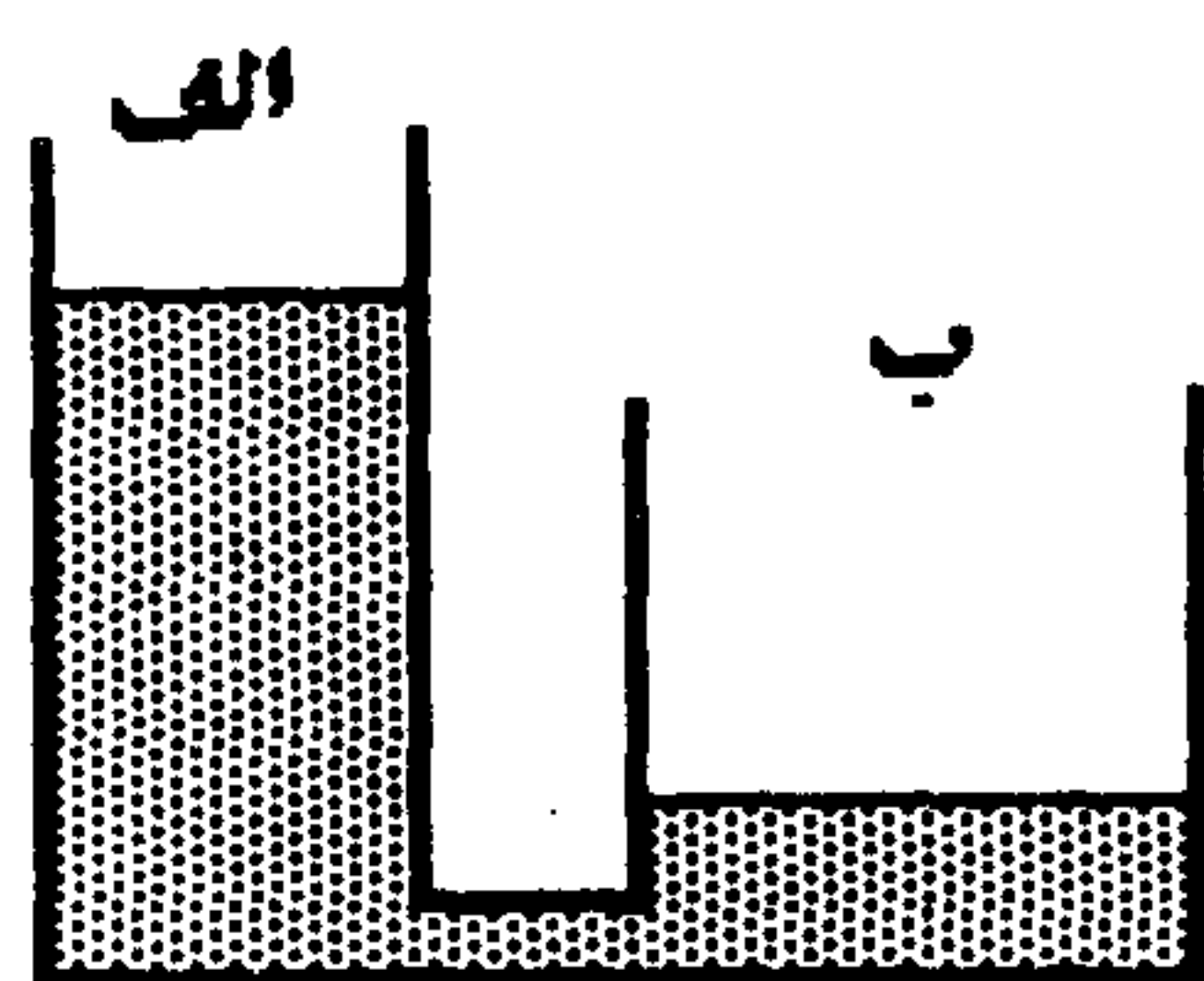
مسئله دیگری که در مدلسازی کیفی مورد توجه می‌باشد این است که تمام دامنه تغییرات یک متغیر حاوی اطلاعات مفید برای تعیین رفتار سیستم نمی‌باشد. برای مثال اگر همان مثال مخزن محتوی مایع را در نظر بگیریم ممکن است هدف استفاده کننده این باشد که ارتفاع مایع داخل مخزن نه «زیاد» باشد و نه «کم». در چنین وضعیتی نیازی به تعیین دقیق ارتفاع مایع نیست، بلکه اگر بتوان مرز زیاد و کم را تعریف کردن تنها بررسی وضعیت ارتفاع مایع نسبت به این دو مرز برای تصمیم‌گیری کفایت می‌کند. بدین ترتیب مادامی که ارتفاع مایع از مرزی عبور نکرده است، تغییر کیفی رخ نداده. در لحظه‌ای که ارتفاع از مرزی عبور کند، تغییر کیفی رخ می‌دهد و حالت کیفی متغیر (در اینجا ارتفاع مایع) تغییر می‌کند. روشن است که تصمیم‌گیری تنها براساس حالت کیفی متغیر انجام می‌شود؛ یعنی تا زمانی که حالت کیفی ثابت است، تصمیم نیز ثابت می‌ماند و در لحظه تغییر حالت کیفی، تصمیم نیز تغییر می‌کند. مقادیری از متغیر که مرزهای تغییرات کیفی را تعیین می‌کنند، در اصطلاح مدلسازی کیفی، مقادیر مشخصه<sup>۸</sup> نامیده می‌شوند. انتخاب مقادیر مشخصه برای کاربردها و منظوره‌های مختلف تفاوت می‌کند. برخی نکات مفید در انتخاب مقادیر مشخصه در مقاله

توسط لونزه<sup>۱</sup> [۳۸، ۳۵] معرفی گردید که به کمک آن می‌شد کنترل کیفی مناسب را برای پایداری سیستم تعیین کرد. لونزه قابلیت روش خود را با پیاده سازی آن بر مدل آونگ وارونه<sup>۲</sup> و مدل‌های غیرخطی نشان داد [۳۶، ۳۵]. وی همچنین نتایجی در مورد تعیین پایداری با مدل کیفی دارد [۳۷]. به موازات این فعالیتها، کارهایی نیز در مورد تعیین پایداری کیفی و کنترل‌پذیری کیفی ماتریسها [۴۰، ۲۸، ۲۷، ۲۶]، بررسی کیفی معادلات تفاضلی [۲۹]، تعیین رفتارهای کیفی سیستمها [۴۵، ۳۰]، شناسایی کیفی سیستمها [۱۱] و تعمیم قضیه جمع آثار به مدل‌های کیفی [۱۲] انجام شده است. در حال حاضر، روشهای کیفی در تحلیل و کنترل سیستمهای غیرخطی [۳۶، ۷]، سیستمهای با ابعاد وسیع<sup>۳</sup> [۴]، سیستمهای نامعین<sup>۴</sup> [۳۶، ۳۱، ۳]، سیستمهای بیولوژیکی [۴۲]، و عیب یابی سیستمها<sup>۵</sup> [۲۳، ۱۷، ۱۳] کاربرد پیدا کرده‌اند.

## مدلسازی کیفی

هدف عمده استدلال کیفی نتیجه‌گیری درباره رفتار سیستم با استفاده از حداقل اطلاعات است. یکی از روشهای ساده برای این کار «استدلال علی»<sup>۶</sup> می‌باشد. این روش استدلال توسط دکلر [۱۶] و ایوازاکی<sup>۷</sup> [۲۵] تکامل یافت و به عنوان اولین ابزار برای مدلسازیهای کیفی به کار گرفته شد. همان گونه که از نام آن مشخص است، در این روش مدلسازی، مکانیزمهای داخلی سیستم به صورت روابط علت-معلول مدل می‌شوند و نتیجه نهایی یک مدل رفتاری از سیستم است که نحوه انتشار و تأثیر تغییرات در ورودی و یا اغتشاشات را در متغیرهای سیستم تعریف و تعیین می‌کند. روابط علی به صورت  $X \rightarrow Y$  نمایش داده می‌شوند که در آن  $X$  علت تغییرات در  $Y$  است [۲۵]. به عنوان مثال فرض کنید ظرف در بسته محتوی آب را حرارت می‌دهیم. اگر  $U$ ،  $T$  و  $P$  به ترتیب نماینده شعله آتش، دمای آب و فشار بخار آب در ظرف باشند، می‌توان رابطه علی بین آنها را به شکل  $U \rightarrow T \rightarrow P$  نوشت. معنای آن این است که روشن بودن شعله باعث افزایش دمای آب و متقابلاً باعث افزایش بخار آب در ظرف می‌شود. با چنین مدلی می‌توان علت هر تغییر را در متغیرهای خروجی سیستم ریشه یابی کرد و به همین دلیل مدل‌های علی در عیب یابی سیستمها کاربرد زیادی یافته است [۲۵].

مدل‌های علی با وجود سادگی بیان، اطلاعات بسیار کمی در مورد نحوه کار سیستم دربردارند. تحلیل سیستم و پیش بینی رفتارهای آن توسط این مدلها به آسانی مقدور نیست. در روشهایی که در حال حاضر برای مدلسازی کیفی به کار می‌روند سعی شده است که روابط



شکل ۱: دو مخزن آب متصل به هم.

یا پرهزینه‌ای است. با توجه به این که اطلاعات شخص خبره<sup>۲</sup> و یا دانش نسبتاً سطحی از مکانیزم کار سیستم برای مدل‌سازی کیفی سیستم کفایت می‌کند، این روش می‌تواند راه حل مناسبی برای رویارویی با چنین مسائلی باشد.

کنترل کیفی یک کنترل زمان گسسته با زمان نمونه برداری یکنواخت است [۳۶،۳۵]: ورودیهای کنترل از یک مجموعه متناهی از مقادیر مجاز ورودی تعیین می‌گردند. تصمیم‌گیری برای کنترل براساس اندازه‌گیری و تعیین خطای کیفی متغیر تحت کنترل و همچنین رابطه بین متغیر ورودی و متغیر تحت کنترل انجام می‌پذیرد. وجود یک رابطه  $M^+$  یا  $M^-$  بین دو متغیر می‌تواند نوع ورودی را برای هدایت متغیر تحت کنترل به سمت مقدار مطلوب تعیین کند. فرض کنید  $X = M^+(U)$ . اگر مقدار مطلوب  $X$  صفر و مقدار اندازه‌گیری شده آن مقداری مثبت باشد، آنگاه یک بررسی ساده نشان می‌دهد که ورودی مناسب یک ورودی منفی می‌باشد [۳۹،۳]. با بررسی روابط موجود بین متغیرها از ورودی به خروجی و تعیین ورودیهای مناسب برای هر حالت کیفی می‌توان یک جدول کنترل برای حالت‌های مختلف ممکن در سیستم به دست آورد. کارایی این کنترل در تنظیم سطح مایع در مخازن متصل به هم نشان داده شده است [۳۹]. به علاوه اطلاعات شخص خبره نیز می‌تواند در تعیین کنترل مناسب مفید باشد. البته مطالعات نشان داده است که کنترلی که صرفاً از اطلاعات مدل کیفی برای تصمیم‌گیری استفاده کند عملکرد خوبی در سیستم‌های عملی نخواهد داشت و بهبود عملکرد کنترل کیفی نیازمند لحاظ کردن مقداری از اطلاعات عددی رفتار سیستم است [۳۹].

روش مطرح شده با تمام سادگی و مزایایی که دارد، دارای معایبی نیز هست. مواردی که کاربرد روش با مشکل روبرو می‌شود جایی است که مثلاً مدل سیستم دارای متغیرهای فراوانی باشد که با هم در تداخل هستند و یا این که رابطه بین متغیرها به صورت یکنوا افزایشی یا کاهشی نباشد. در چنین مواردی تعیین کنترل مناسب می‌تواند کار ساده‌ای نباشد و یا در تعیین کنترل به حالت‌های مبهم بسیاری برمی‌خوریم که نمی‌توان تعیین کرد که کنترل مناسب کدام

[۳۰] مطرح شده‌اند.

کوپرز نشان داده است که مجموعه روابط کیفی بین متغیرهای یک سیستم و مجموعه مقادیر مشخصه هر یک از متغیرها برای تعیین رفتارهای ممکن در سیستم کفایت می‌کنند [۳۱،۳۰]. الگوریتم QSIM پیشنهادی توسط کوپرز به عنوان ورودی، مقادیر کیفی متغیرها و علامت مشتق آنها را به عنوان حداقل اطلاعات موجود از حالت سیستم دریافت می‌کند، کلیه حالت‌های کیفی ممکن بعدی را پیش بینی می‌کند و در نهایت با حذف حالت‌هایی که در روابط بین متغیرهای سیستم صدق نمی‌کنند رفتارهای ممکن بعدی را نتیجه می‌دهد [۳۰]. به عنوان نمونه همان مخزن محتوی مایع را در نظر بگیرید و فرض کنید ارتفاع مایع در مخزن کم است و سعی داریم با افزودن مایع ارتفاع آن را به مرز زیاد برسانیم. دنباله رفتارهای کیفی متغیرهای ارتفاع مایع و فشار وارد بر کف مخزن می‌تواند به شکل زیر باشد:

$H: (0, \uparrow) \rightarrow (\uparrow, \text{متوسط}) \rightarrow (\uparrow, \text{کم})$

$P: (0, \uparrow) \rightarrow (\uparrow, \text{متوسط}) \rightarrow (\uparrow, \text{کم})$

که در آن  $\uparrow$  نمایش افزایش مقدار و  $0$  نمایش ثابت بودن مقدار است. مشکلی که در اینجا خود را نمایان می‌سازد این است که تحلیل‌های کیفی معمولاً یک مجموعه رفتار را به عنوان رفتارهای ممکن سیستم نتیجه می‌دهند. علت این امر ساده‌سازی و در دست نبودن جزئیات دقیق از مقادیر متغیرها و مدل سیستم است [۳۸،۳۰]. مثلاً دو مخزن متصل به هم شکل (۱) را در نظر بگیرید. کوپرز در مقاله خود [۳۰] با ارائه مدل QDE این سیستم و تحلیل آن به روش کیفی نشان داده است که تحلیل کیفی آن سه رفتار ممکن را نتیجه می‌دهد: ۱- ارتفاع آب در دو مخزن یکسان می‌شود. ۲- مخزن ب از سر می‌رود. ۳- مخزن ب کاملاً لبریز می‌شود ولی از سر نمی‌رود. علت آن است که مدل کیفی سیستم اطلاعاتی از شکل و وضعیت دو مخزن نسبت به هم ندارد. در اصطلاح تحلیل کیفی به رفتارهای اضافی تولید شده رفتارهای غیرواقعی<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۳۸،۳۰]. در بعضی حالت‌های خاص با استفاده از معادله انرژی [۱۹] و یا علامت مشتق‌های مرتبه دوم و سوم متغیرها [۳۲] و یا فیلترهای رفتاری [۴۸،۳۴] می‌توان برخی از رفتارهای اضافی را تشخیص داد و حذف کرد. ولی در حالت کلی روشی برای این کار وجود ندارد.

## کنترل کیفی

در بسیاری از کاربردهای عملی تعیین مدل سیستم و یا اندازه‌گیری متغیرهای سیستم با دقت زیاد کار مشکل و

کیفی به مدل سیستم حساس نیست، در عمل مقاومت بسیار زیادی در برابر تغییرات مدل سیستم و یا اغتشاشات از خود نشان می‌دهد [۶،۱]. سیاست کنترل کیفی، نظیر کنترل فازی، تجسم منطقی است که یک انسان محتملاً برای کنترل سیستم در پیش می‌گرفته است.

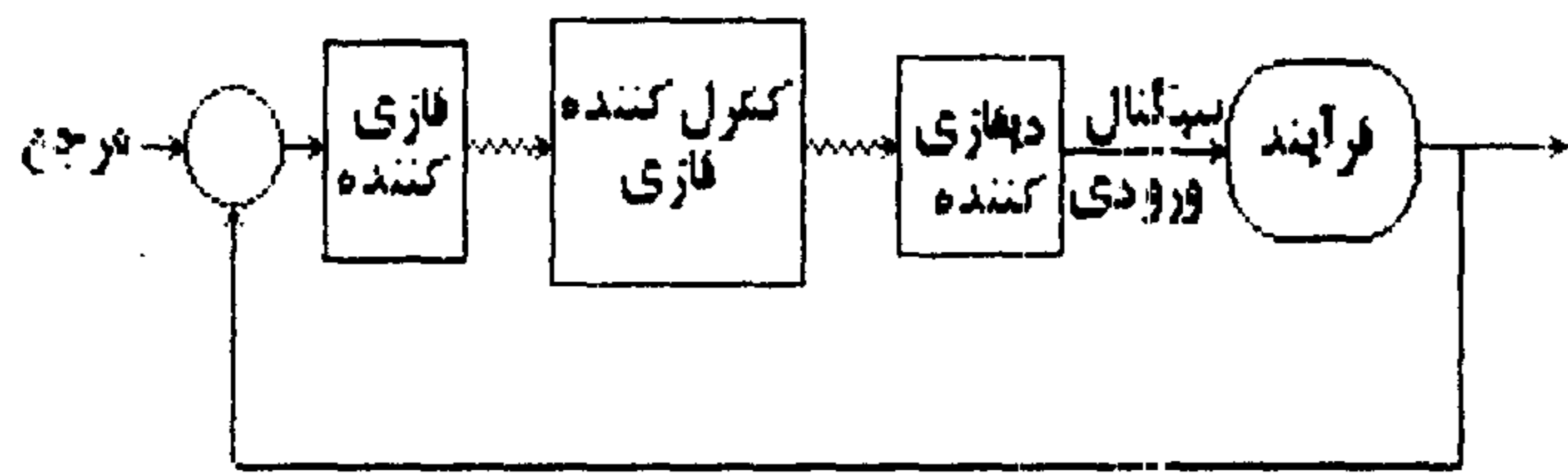
بدیهی است که هر ساده‌سازی با پذیرفتن مقداری خطا همراه است. به علت آن که کنترل‌های کیفی به صورت ناپیوسته از یک مقدار به مقدار دیگر تغییر می‌یابند، شکل پاسخها معمولاً هموار نیست. همچنین به علت آن که در فضای حالت، یک مجموعه از نقاط هم ارز یک حالت کیفی در نظر گرفته می‌شوند، پایدارسازی مجانبی با کنترل کیفی مشکل است. هدف کنترل‌کننده‌های کیفی هدایت حالت سیستم به یک حالت کیفی، متشکل از یک مجموعه نقاط، است و حالت سیستم پس از ورود به حالت کیفی هدف می‌تواند هر یک از حالت‌های عددی متعلق به آن فضا را اختیار کند و تغییر کیفی هم رخ ندهد. البته با انتخاب مناسب اندازه حالت کیفی می‌توان خطای حالت دائمی را محدود و کنترل کرد. باید توجه داشت که در بسیاری از کاربردهای عملی تا مقدار معینی خطای حالت دائمی قابل پذیرفتن است و مشکلی ایجاد نمی‌کند. بنابراین کنترل کیفی برای چنین کاربردهایی مناسب‌تر است.

### کنترل کیفی در مقایسه با کنترل فازی

مدلسازی و کنترل کیفی و فازی هر دو هدف مشابهی را دنبال می‌کنند و آن مقابله با پیچیدگیهای تحلیل و کنترل سیستمهای فیزیکی است [۴۳]. اختلاف اصلی کنترل فازی و کنترل کیفی در نحوه بهره‌گیری از اطلاعات موجود از دینامیک سیستم است. در کنترل فازی قوانین کنترل تنها براساس تجربیات شخص آشنا به سیستم و با صرف نظر از کلیه اطلاعات موجود از دینامیک سیستم حاصل می‌شود. البته این عدم نیاز به مدل سیستم در برخی موارد امتیاز کنترل فازی محسوب می‌گردد. اما همین ویژگی دامنه کاربرد کنترل فازی را به سیستمهایی محدود می‌کند که درباره آنها تجربه کافی کسب شده باشد، در غیر این صورت طراحی کنترل فازی تبدیل به یک روش سعی و خطا می‌شود [۴۶،۳۶]. به علاوه طرح مسأله عدم نیاز به دینامیک سیستم برای تعیین کنترل مناسب نیز مطلبی است که در خور تأمل می‌باشد. به طور مثال در کنترل فازی ادعا می‌شود که انسان بدون نیاز به مدل یک خودرو می‌تواند آن را هدایت کند [۵۰]. ولی تحقیقات و بررسیهای دیگر [۱۸،۱۵] نشان می‌دهند که انسان تا هنگامی که شناخت کافی از نحوه ارتباط و ابزارهای اصلی هدایت خودرو نظیر

است. به این علت، کنترل مطرح شده تاکنون در سیستمهایی نظیر تنظیم سطح مایع در مخازن پیاده سازی شده است که در آنها تعیین کنترل کاری ساده است و جالت مبهمی رخ نمی‌دهد. همچنین در مدل‌های کیفی مطرح شده در اینجا اطلاعاتی درباره مدت زمانی که فرآیند در هر حالت کیفی باقی می‌ماند وجود ندارد. لونزه [۳۸،۳۶،۳۵] شیوه دیگری را برای مدلسازی کیفی سیستم پیشنهاد داد تا اطلاعات عددی لازم برای تعیین کنترل به طور همزمان در مدل منظور شده باشد. وی به این مسأله توجه کرد که تعیین مرزهای تغییر کیفی برای هر متغیر باعث تقسیم بندی فضای حالت سیستم به مکعبهای  $\Pi$  بعدی می‌شود که هر یک بیانگر یک حالت کیفی سیستم است. بدین ترتیب وی مدل سیستم را با احتمال رفتن از هر یک از حالت‌های کیفی به حالت‌های دیگر تحت کنترل‌های مختلف بیان کرد. با اعمال این روش به ازای هر یک از مقادیر ورودی یک ماتریس انتقال حالت به دست می‌آید که درایه  $ij$  آن احتمال رفتن از حالت کیفی  $j$ ام به حالت کیفی  $i$ ام را بیان می‌کند. شباهت این مدل به زنجیر مارکوف کنترل شده [۳۳] این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان از خواص و تئوریهای موجود برای زنجیرهای مارکوف کنترل شده در تحلیل و تصمیم‌گیری براساس مدل کیفی حاصل استفاده کرد. تعیین متوسط زمان رسیدن به حالت کیفی مطلوب [۴۷] و حل یک مسأله بهینه سازی برای این زمان روشی است که در مقالات [۷،۵] به عنوان یک روش کارآمد برای پایدارسازی سیستمهای توصیف شده با مدل کیفی پیشنهاد شده است. در مواردی که احتمال‌های عددی رفتن از حالتی به حالت‌های دیگر در سیستم مشخص نیست و یا اهمیتی ندارد می‌توان از گرافها نیز برای نمایش مدل کیفی سیستم استفاده کرد. در این گونه مدلها هر گره نمایش یک حالت کیفی و هر شاخه نمایش وجود احتمال انتقال بین دو حالت کیفی است. در چنین مواردی استفاده از خواص گراف می‌تواند در تحلیل و طراحی سیستم کمک بسیاری بکند. در حال حاضر روشهای تعیین پایداری، کنترل پذیری و پایدارسازی نیز براساس نظریه گراف وجود دارند [۴۹،۴۴،۴۲،۳۶،۲۰]. بدیهی است که این روشها به علت دربرداشتن اطلاعات کمتر نسبت به مدل‌های احتمالی با محدودیت و تقریب بیشتری روبرو هستند

همان طور که در آغاز این بخش مطرح شد، اولین و بزرگترین مزیت مدلسازی و کنترل کیفی این است که انسان را درگیر تعیین مدل دقیق و پیچیدگیهای محاسبه و طراحی کنترل کننده نمی‌کند. کنترل مناسب عموماً براساس تجربه شخص خبره و یا پیاده‌سازی الگوریتمهای ساده نتیجه می‌شود. به علاوه به دلیل آن که کنترل



شکل ۳: نمودار بلوکی یک سیستم حلقه بسته با کنترل کننده فازی.

همین دلیل شکل بساخته‌های حاصل از کنترل کیفی، به ویژه در نزدیکی مرزهای نواحی کیفی، ناهموار است. در کنترل فازی عموماً سیگنال کنترل شکل پیوسته‌تری دارد و پاسخ سیستم هم نسبت به کنترل کیفی معمولاً هموارتر است [۲].

البته کنترل کیفی و فازی می‌توانند به عنوان مکمل یکدیگر عمل کنند و بدین ترتیب برخی نقایص یکدیگر را بپوشانند. بدیهی‌ترین کاربرد استفاده از کنترل کیفی استفاده از آن در تعیین پایگاه قواعد<sup>۳</sup> فازی است. از آنجا که تعیین قواعد فازی، به ویژه برای کنترل کننده‌های فازی نوع Sugeno نیازمند داشتن اطلاعاتی از شکل کیفی کنترل مناسب است، کنترل کیفی می‌تواند به عنوان تعیین کننده پایگاه قواعد مناسب به کار رود [۸،۲]. بدین ترتیب نیازی به سعی و خطا و صرف انرژی و وقت زیاد برای تعیین قواعد کنترل فازی نخواهد بود.

در ترکیبی دیگر برای حل نارساییهای مدل کیفی کوپرز، مقادیر کیفی متغیرها و جهت تغییرات آنها با مجموعه‌های فازی نمایش داده شده‌اند. بدین ترتیب اطلاعات عددی دقیقتری از متغیرهای سیستم در دست است و این اطلاعات به حذف رفتارهای غیرواقعی و همچنین پیش بینی مدت زمانی که فرآیند در یک حالت کیفی معین باقی می‌ماند کمک می‌کنند [۴۳].

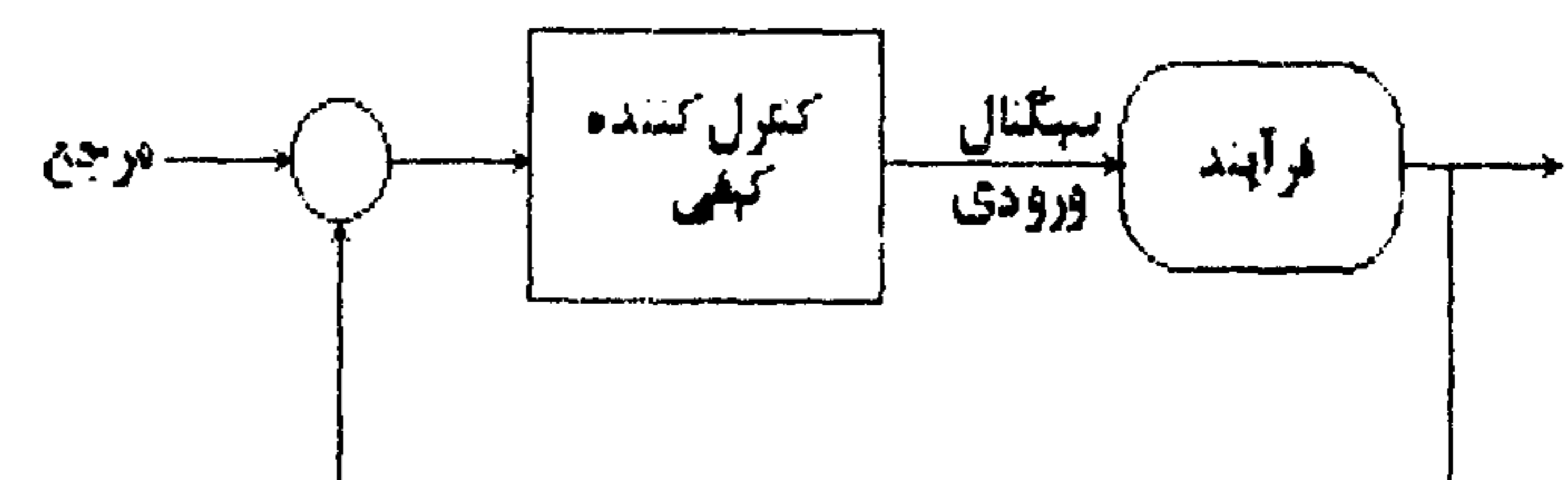
### دیگر کاربردهای مدلسازی کیفی

چنان که در ابتدای این مقاله هم بیان شد مدلسازی کیفی روشی مفید برای تحلیل سیستمهای غیرخطی و سیستمهای ابعاد وسیع است. تحلیل ریاضی چنین فرآیندهایی عموماً مستلزم حجم عملیات ریاضی بسیار زیادی است و گاه روش مناسبی برای تحلیل وجود ندارد. همچنین در بسیاری از مواقع هدف از تحلیل سیستم تعیین رفتار کلی آن نظیر پایداری، تعادل، نوسان، بستر جذب<sup>۴</sup> و... است. همه این مفاهیم در حالت کلی رفتار کیفی سیستم را بیان می‌کنند. بر این اساس نتیجه می‌شود که این خواص را می‌توان با استفاده از مدل‌های کیفی و بدون نیاز به مدل‌های ریاضی تعیین و بررسی کرد [۴۵]. تاکنون بررسیهایی در این زمینه

فرمان: دنده، ترمز، کلاچ و غیره، نداشته باشد قادر به هدایت مناسب خودرو نخواهد بود. در حقیقت هر انسان پیش از آغاز به یادگیری رانندگی ابتدا نحوه ارتباط اجزای مختلف هدایت خودرو را می‌آموزد و بدین ترتیب یک مدل نه چندان دقیق از خودرو در ذهن خود تشکیل می‌دهد، سپس نحوه هدایت خودرو را می‌آموزد. این مطلب در مورد بیشتر سیستمها صادق است. بنابراین داشتن یک تصویر کلی از مدل سیستم می‌تواند کمک بسیار بزرگی به تعیین کنترل مطلوب و حتی تعیین بهینه‌ترین کنترل از میان کنترل‌های موجود بکند. این ویژگی در کنترل کیفی در نظر گرفته شده است. به همین دلیل کنترل کیفی تنها وابسته به اطلاعات تجربی نیست و طراحی آن نیز به روش سعی و خطا انجام نمی‌گیرد. الگوریتم‌های موجود با داشتن مدل کیفی، کنترل کیفی مناسب را دقیقاً مشخص می‌کنند و بدین ترتیب عملکرد در محدوده دقت به کار رفته برای مدلسازی سیستم تضمین می‌شود.

تفاوت دیگر این دو روش در ساختار کنترل کننده‌های آنها است. در شکل (۲) نمودار بلوکی یک سیستم حلقه بسته را با کنترل کننده کیفی و در شکل (۳) نمودار بلوکی یک سیستم حلقه بسته را با کنترل کننده فازی ملاحظه می‌کنید. مقایسه دو شکل (۲) و (۳) به روشنی نشان می‌دهد که در کنترل کننده کیفی نیازی به دو بلوک معادل با «فازی کننده»<sup>۱</sup> و «دیفازی کننده»<sup>۲</sup> نیست. در حقیقت کنترل کیفی برخلاف کنترل فازی مستقیماً از اطلاعات خروجی سیستم استفاده می‌کند و کنترلی تولید می‌کند که مستقیماً قابل اعمال به ورودی سیستم است. به علاوه در بسیاری موارد تنها تعیین این که خروجی سیستم در کدام حالت کیفی واقع است برای کنترل کیفی کفایت می‌کند. در چنین مواردی نیاز به اندازه‌گیری دقیق خروجی سیستم نیست. این در حالی است که کنترل فازی همواره به اطلاعات دقیق خروجی سیستم نیاز دارد. این ویژگی کنترل کیفی می‌تواند به کاهش هزینه و پیچیدگی سنسورها کمک کند [۳۶].

تفاوت دیگر کنترل فازی و کیفی در شکل کنترل‌های آنها و پاسخ سیستم است. کنترل کیفی یک کنترل سوئیچ کننده است و به



شکل ۲: نمودار بلوکی یک سیستم حلقه بسته با کنترل کننده کیفی.

سلولهای مساوی تقسیم می‌شود و عملکرد سیستم در تمام نقاط متعلق به هر سلول یکسان و معادل عملکرد در مرکز آن سلول فرض می‌شود. در چنین حالتی می‌توان با استفاده از الگوریتمهای مناسب کنترل بهینه را تعیین کرد و کنترل یافته شده تقریبی از کنترل خطی یا غیرخطی بهینه می‌باشد [۴۱، ۲۴]. با داشتن کنترل مرجعی نظیر کنترل کیفی یا کنترل نگاشت سلولی و با استفاده از الگوریتمهای شناسایی می‌توان نزدیکترین کنترل فازی، خطی، یا غیرخطی را به کنترل مرجع پیدا کرد [۴۶، ۸]. با این وصف می‌توان کنترل کیفی را در درجه اول یک طرح اولیه و کلی از کنترل مناسب تصور کرد و از روی آن کنترل مناسب را ساخت.

به علاوه مدلسازی و کنترل کیفی همچنین می‌تواند در هوش مصنوعی [۳۰]، تحلیل سیستمهای اقتصادی [۱۸]، تحلیل سیستمهای بیولوژیکی [۴۲] و هر جای دیگر که بسته به ماهیت موضوع مدلسازی ریاضی کارآیی مطلوب را ندارد کاربرد داشته باشد.

در کنار این کاربردها، روشهای کیفی در حل پاره‌ای از مسایل ریاضی نیز کاربرد داشته‌اند. تعیین پایداری ماتریسهای که تنها علامت و یا حدود تغییرات درایه‌های آنها معلوم است یکی از مسایلی است که از راه حل‌های کیفی قابل تعیین است [۲۷، ۲۶]. بررسی کنترل پذیری زوج ماتریسهای با همین ویژگیها نیز در دسته مسایل حل شده با روشهای کیفی می‌باشد [۴۰، ۲۸]. وجود پایداری و کنترل پذیری در این ماتریسها را اصطلاحاً پایداری و کنترل پذیری کیفی می‌نامند. تحلیل معادلات تفاضلی که ضرایب آنها در یک بازه تغییر می‌کند نیز جزو مسایلی است که به روشهای کیفی بررسی شده‌اند [۲۹].

### نتیجه گیری

مدلسازی و کنترل کیفی به عنوان یک روش جدید و قدرتمند توانسته است بر بسیاری از محدودیتها و مشکلات روشهای ریاضی و یا حتی روشهای هوشمند غلبه کند. این روش در مقایسه با روشهای هوشمند با مشابه سازی نحوه استدلال انسان می‌تواند مدل و رفتارهای سیستمها را با قوانین ساده‌ای ارتباط دهد و یا صحت قوانین موجود را با مشاهدات انجام شده از سیستم بررسی کند. به همین دلیل دهه گذشته شاهد شکوفایی قابل توجهی در زمینه استدلال و مدلسازی کیفی بوده است که در نتیجه آن مدلسازی و کنترل کیفی امروزه به عنوان یکی از شاخه‌های کنترل در کنار دیگر تئوریهای موجود نظیر کنترل فازی، کنترل تطبیقی، کنترل فرآیندهای اتفاقی و... مورد توجه محققین و

انجام گرفته است و روشهای گوناگونی برای این کار پیشنهاد شده‌اند [۴۵، ۳۰، ۱۵، ۱۰].

در برخی موارد هدف از تحلیل سیستم یافتن پاسخ برای پرسشهایی نظیر این پرسش است که «به چه علت چنین پدیده‌ای مشاهده می‌شود؟ یا چگونه چنین تغییری حاصل شده است؟». به عنوان نمونه در یک سیستم حرارتی مشاهده می‌شود که دما زیادتر از حد معمول است و پرسیده می‌شود «کدام متغیرها بر دما تأثیر دارند و کدام یک عامل افزایش دما بوده است؟» [۱۳]. پاسخ به این پرسشها معادل با ریشه یابی علل پدیده‌ها و منشأ بروز مشکلات یا تغییرات وارد شونده به سیستم است. یافتن پاسخ به این پرسشها به دو روش انجام می‌گیرد. روش اول روشی است که Objective نامیده می‌شود و سعی می‌کند با تکیه بر مدل‌های ریاضی و محاسبات ریشه پدیده‌ها را شناسایی کند [۲۳]. به علت آن که معمولاً بیان پدیده‌ها و مشکلات بروز کننده در یک سیستم به شکل ریاضی کار مشکلی است، روش دومی برای روبرو شدن با این مسایل وجود دارد که روش Subjective نامیده می‌شود. در این روش سعی می‌شود با روشی نظیر روش انسان به ریشه‌یابی مسایل و مشکلات پرداخت و راه حل نیز به همان گونه تعیین گردد. مدلسازیهای کیفی و علی روشهایی بوده‌اند که در سالهای اخیر به عنوان روشهای عیب یابی انسانی اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. به دلیل آن که در این مدلها نحوه تأثیر هر متغیر بر متغیرهای دیگر کاملاً مشخص است، با مشاهده رفتار غیرعادی در یک متغیر می‌توان بلافاصله متغیرهای تأثیر کننده بر آن را شناسایی کرد و با بررسی سابقه آنها علت را مشخص و رفع کرد [۱۳]. این مدلها علاوه بر علت یابی در پیش بینی رفتارهای آینده سیستم نیز کاربرد دارند و می‌توانند مشکلات را پیش از وقوع تشخیص داده، با اتخاذ تدابیر مناسب از وقوع آنها جلوگیری کنند [۱۷، ۱۳]. این روش تاکنون در چند کاربرد عملی، از جمله نظارت بر کار برج تقطیر پالایشگاه، به کار رفته است [۲۲، ۲۱، ۱۳].

یکی از نکات قابل توجه در مورد کنترل کیفی این است که کنترل کیفی شکل کلی کنترل مناسب را برای رسیدن به هدف تعیین می‌کند. بدین ترتیب کنترل کیفی می‌تواند نمودی از کنترل‌های کلاسیک مناسب برای سیستم مورد نظر باشد. با تقریب زدن کنترل کیفی حاصل با کنترل‌های خطی یا غیرخطی می‌توان به راحتی و بدون درگیر شدن در روشهای طراحی عددی، کنترل کننده مناسب را یافت. مشابه این کار در روش طراحی کنترل کننده با نگاشتهای سلولی<sup>۱</sup> انجام می‌گیرد. در نگاشتهای سلولی، به روشی مشابه با مدلسازی کیفی، فضای حالت سیستم به تعداد بسیار زیادی

تئوری کنترل کیفی بتواند در آینده به یک ابزار نیرومند در تحلیل و طراحی سیستمهای غیرخطی بدل گردد. همچنین برای دستیابی به عملکرد بهتر، کنترل کیفی می تواند با کنترل کننده های کلاسیک یا فازی ترکیب شده، کنترل کننده مرکب تشکیل دهد. این ترکیب به ویژه در جاهایی کاربرد دارد که بخشهایی از سیستم دارای مدل های ریاضی مشخص و ساده هستند و توسط یک کنترل کننده کلاسیک اداره می شوند و بخشهای نامعین سیستم تحت فرمان یک کنترل کننده کیفی می باشند [۱۴].

مهندسين قرار گرفته است. امتيازات اضلی این روش نسبت به ديگر روشهای موجود برای تحلیل و طراحی سیستمهای کنترل عدم نیاز آن به شناسایی یک مدل دقیق از سیستم و مقاومت بسیار خوب آن در برابر تغییرات مدل و یا نامعین های سیستم است.

در حال حاضر عمده ترین کاربرد این تئوری در عیب یابی سیستمها، تحلیل مدل های نامعین و سیستمهای ابعاد وسیع است. ولی تواناییهای این روش در تحلیل سیستمهای غیرخطی و یا طراحی کنترل کننده های غیرخطی این راه را باز گذاشته است تا

## مراجع

- ۱ - رضازاده، ع. و جبه دارمارالانی، پ. "میزان مقاومت کنترل کیفی و کاربرد آن در کنترل هواپیمای F-4." مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه تهران، صص ۶۸۵-۶۷۸ (۱۳۷۵).
- ۲ - رضازاده، ع. و جبه دارمارالانی، پ. "تولید پایگاه قواعد کنترل کننده فازی و مقایسه کنترل کننده کیفی و کنترل کننده فازی در مثال عملی موتور DC." مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه تهران، صص ۸۷۱-۸۶۵ (۱۳۷۵).
- 3 - Abdulmajid, B. and Wynne, R. J. (1990). "An improved qualitative controller." *Proc. American Control Conf.*, PP. 1455-1460.
- 4 - Akiyoshi, M. and Nishida, S. (1997). "Toward generating causal explanation : qualitative simulation with association mechanism to quantitative information." *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 3, PP. 289-298.
- 5 - Bakhtiari, S. and Jabedar-Maralani, P. (1998). "Qualitative stabilization based on absorbing markov chains." *Proc. 6th Iranian Conf. Electrical Engineering*, Tehran, Iran, PP. I77-I82.
- 6 - Bakhtiari, S. and Jabedar-Maralani, P. (1998). "A robustness measure for qualitative controls." *Proc. 6th Iranian Conf. Electrical Engineering*, Tehran, Iran, PP. I47-I51.
- 7 - Bakhtiari, S. and Jabedar-Maralani, P. (1998). "A new method for qualitative stabilization of nonlinear systems." *Proc. 4th IFAC Nonlinear Control Systems Design Symposium*, Enschede, Netherlands, PP. 842-847.
- 8 - Bakhtiari, S. and Jabedar-Maralani, P. (1999). "Prototyping qualitative controllers for fuzzy-logic controller design." *Proc. 7th Iranian Conf. Electrical Engineering*, Tehran, Iran, PP. 53-59.
- 9 - Berleant, D. and Kuipers, B. J. (1997). "Qualitative and quantitative simulation : bridging the gap." *Artif. Intell.*, Vol. 95, No. 2, PP. 215-255.
- 10 - Bylander. (1988). "A critique of qualitative simulation from a consolidation viewpoint." *IEEE Trans. Sys., Man & Cybern.*, Vol. 18, PP. 252-263.
- 11 - Cem Say, A. C. and Kuru, S. (1996). "Qualitative system identification : deriving structure from behavior." *Artif. Intell.*, Vol. 83, PP. 75-141.
- 12 - Coiera, E. W. (1992). "Qualitative superposition." *Artif. Intell.*, Vol. 56, PP. 171-196.
- 13 - Corea, R., Tham, M. T. and Morris, A. J. (1992). "Qualitative modeling - an application to supervisory control of a distillation column." *Proc. IEEE Conf. Intelligent Control*, PP. 586-591.

- 14 - Danes, P., Trave-Massuyes, L. and Aguilar-Martin, J. (1993). "A generic method for computing the response of a numerically-known dynamic system to qualitative inputs." *Proc. IEEE Conf. Sys., Man & Cybern.*, PP. 187-192.
- 15 - de Kleer, J. and Brown, J. S. (1984). "A qualitative physics based on confluences." *Artif. Intell.*, Vol. 24, PP. 7-83.
- 16 - de Kleer, J. and Brown, J. S. (1986). "Theories of causal ordering." *Artif. Intell.*, Vol. 29, PP. 33-61.
- 17 - Feray-Beaumont, S. F., Tham, M. T. and Morris, A. J. (1991). "Towards distillation process supervision using qualitative model-based reasoning." *Proc. American Control Conf.*, PP. 791-796.
- 18 - Forbus, K. (1984). "Qualitative process theory." *Artif. Intell.*, Vol. 24, PP. 85-168.
- 19 - Fouche, P. and Kuipers, B. J. (1992). "Reasoning about energy in qualitative simulation." *IEEE Trans. Sys., Man & Cybern.*, Vol. 22, PP. 47-63.
- 20 - Gawthrop. (1995). "Bond graph based control." *Proc. IEEE Conf. Sys., Man & Cybern.*, PP. 3011-3016.
- 21 - Girand, Aubrum, Ghetie and Martini. (1995). "Application of a qualitative reasoning method to water treatment plant fault diagnosis." *Proc. IEEE Conf. Sys., Man & Cybern.*, Vol. 3, PP. 2211-2215.
- 22 - Grass, A. S., Gruber, P., Roos, M. and Tödli, J. (1995). "Qualitative model-based fault detection in air handling units." *IEEE Control System Magazine*, PP. 11-22.
- 23 - Homayoun Far, B. and Nakamichi, M. (1993). "Qualitative fault diagnosis in systems with nonintermittent concurrent faults: a subjective approach." *IEEE Trans. Sys. Man & Cybern.*, PP. 14-30.
- 24 - Hsu, C. S. (1987). *Cell-to-Cell Mapping*. Springer-Verlag.
- 25 - Iwasaki, Simon. (1994). "Causality and model abstraction." *Artif. Intell.*, Vol. 67, No. 1, PP. 143-194.
- 26 - Jeffries, C., Klee, V. and van den Driessche, P. (1977). "When is a matrix sign stable." *Canadian J. Math.*, Vol. 29, No. 2, PP. 315-326.
- 27 - Jeffries, C. and Johnson, C. R. (1988). "Some sign patterns that preclude matrix stability." *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, Vol. 9, No. 1, PP. 19-25.
- 28 - Johnson, C. R., Mehrmann, V. and Olesky, D. D. (1993). "Sign controllability of a nonnegative matrix and a positive vector." *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, Vol. 14, No. 2, PP. 398-407.
- 29 - Kiang, M. Y., Hinkkanen, A. and Winston, A. B. (1997). "Reasoning in qualitatively defined systems using interval-based difference equations." *IEEE Trans. Sys., Man & Cybern.*, Vol. 25, PP. 1110-1120.
- 30 - Kuipers, B. J. (1986). "Qualitative simulation." *Artif. Intell.*, Vol. 29, PP. 289-338.
- 31 - Kuipers, B. J. (1989). "Qualitative reasoning : modeling and simulation with incomplete knowledge." *Automatica*, Vol. 25, PP. 571-585.
- 32- Kuipers, B. J., Chiu, C., Dalle Molle, D. T. and Throop, D. R. (1991). "Higher-order derivative constraints in qualitative simulation." *Artif. Intell.*, Vol. 51, PP. 343-379.
- 33 - Kumar, P. R. and Varaiya, P. (1986). *Stochastic systems : estimation, identification, and adaptive control*. Prentice-Hall.
- 34 - Lee, W. W. and Kuipers, B. J. (1988). "Non-intersection of trajectories in qualitative phase space : a global constraint for qualitative simulation." *Proc. 7th Nat. Conf. Artif. Intell.*, PP. 286-290.



- 35 - Lunze, J. (1992). "Qualitative modelling of continuous-variable systems by means of nondeterministic automata." *Int. Sys. Eng.*, Vol. 1, PP. 22-30.
- 36 - Lunze, J. (1993). "Stabilization of nonlinear systems by qualitative feedback controllers." *Int. J. Control*, PP. 1-25.
- 37 - Lunze, J. (1993). "On the stability of qualitative models." *Systems & Control Letters*, No. 21, PP. 137-142.
- 38 - Lunze, J. (1994). "Qualitative modelling of nonlinear dynamical systems with quantized state measurements." *Automatica*, Vol. 30, PP. 417-431.
- 39 - Luzeaux (1993). "Let's Learn to Control a System." *Proc. IEEE Conf. Sys., Man & Cybern.*, PP. 199-204.
- 40 - Olesky, D. D., Tsatsomeros, M. and van den Driessche, P. (1993). "Qualitative controllability and uncontrollability by a single entry." *SIAM J. Linear Algebra & Appl.*, Vol. 187, PP. 183-194.
- 41 - Papa, M., Tai, H. M. and Shenoi, S. (1997). "Cell mapping for controller design and evaluation." *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 17, No. 2, PP. 52-65.
- 42 - Puccia, C. J. and Levins, R. (1985). *Qualitative modeling of complex systems*. Harvard University Press.
- 43 - Qiang-Shen, Leitch, R. (1993). "Fuzzy qualitative simulation." *IEEE Trans. Sys., Man & Cybern.*, Vol. 23, PP. 1038-1061.
- 44 - Rosenberg, R. C. and Andry, A. N. (1979). "A controllability test for linear systems using a graphical technique." *Proc. IFAC Conf. Computer Aided Design of Control Systems*, PP. 143-147.
- 45 - Sacks, E. (1990). "A dynamic perspective on qualitative simulation." *Artif. Intell.*, Vol. 42, PP. 349-362.
- 46 - Smith, S. M. and Comer, J. M. (1990). "Self-tuning of a fuzzy logic controller using a cell state space algorithm." *Proc. IEEE Conf. Sys., Man & Cybern.*, PP. 445-450.
- 47 - Snell, J. L. and Kemeny, J. G. (1976). *Finite markov chains*. Springer Verlag.
- 48 - Struss, S. (1988). "Global filters for qualitative behaviors." *Proc. 7th Nat. Conf. Artif. Intell.*, PP. 275-279.
- 49 - Teel, A. R. (1995). "On graphs, conic relations and input-output stability of nonlinear feedback systems." *Proc. IEEE Conf. Decision & Control*, PP. 4245-4250.
- 50- Zimmermann, J. (1996). *Fuzzy set theory*. Kluwer Academic Pub.

### واژه نامه :

1 - Qualitative Modeling	مدلسازی کیفی
2 - Naive Physics	فیزیک ساده
3 - Inverted Pendulum	آونگ وارونه
4 - Large Scale Systems	سیستمهای با ابعاد وسیع
5 - Uncertain Systems	سیستمهای نامعین

6 - Fault Diagnosis	عیب یابی سیستمها
7 - Causal Reasoning	استدلال علی
8 - Landmarks	مقادیر مشخصه
9 - Spurious Behaviors	رفتارهای غیرواقعی
10 - Expert	شخص خبره
11 - Fuzzifier	فازی کننده
12 - Defuzzifire	دیفازی کننده
13 - Rule-base	پایگاه قواعد
14 - Basin of Attraction	بستر جذب
15 - Cell-Mapping Method	روش طراحی کنترل کننده با نگاشتهای سلولی