طراحی و ساخت پایلوت آزمایشگاهی چهارتانک

فرآیندهایی که در صنایع مختلف وجود دارند همگی غیرخطی بوده و در اکثر موارد چندمتغیره می‌باشند که دارای تداخل‌های بالایی بین کانال‌های مختلف ورودی و خروجی‌شان هستند. برای کنترل چنین فرایندهایی نیاز به بکارگیری روشهای خاصی است که عموما با پیچیدگی‌هایی همراه هستند. از طرف دیگر چنین فرایندهایی عموما از حساسیت‌های بالایی در کارکرد برخوردارند. در نتیجه نه منطقی است و نه امکان پذیر است که بدون اطمینان از کارآیی روشهای کنترلی مدنظر، آنها را بر روی این چنین فرایندهایی اجرا نمود. برای رفع این مشکل عموما تکنیکهای مد نظر بر روی دستگاه‌های آزمایشگاهی اجرا شده و در صورت مناسب و موفق بودن در مرحله بعد برروی پایلوتهای صنعتی و در نهایت بر روی کارخانه اصلی اجرا می‌شوند. دستگاه‌های آزمایشگاهی‌ای که به این منظور ساخته می‌شوند باید دارای ویژگی‌های عملکردی‌ای باشند که در گامهای بعد در پایلوت آزمایشگاهی و سپس در کارخانه اصلی دیده می‌شود اگرچه ممکن است از نظر فرایند مکانیکی و محصول تولیدی با این دو متفاوت باشد.

با توجه به چند متغیره بودن و تداخل بالایی که در فرایندهای صنعتی دیده می‌شود، طراحی و ساخت نمونه‌ای از یک دستگاه آزمایشگاهی چندمتغیره که دارای حالات مختلف تداخل و غیرخطی‌گری باشد تا بتوان الگوریتم‌های کنترلی مناسب را قبل از اعمال به فرآیندهای با مقیاس بزرگ در واحدهای عملیاتی در نمونه‌های آزمایشگاهی ارزیابی کرد مفید خواهد بود. دستگاه چهارتانک با هدف بررسی الگوریتم‌های مختلف کنترل و انتخاب مناسب‌ترین آنها برای کنترل فرایندهایی با ویژگیهای فوق پیشنهاد می‌شود.

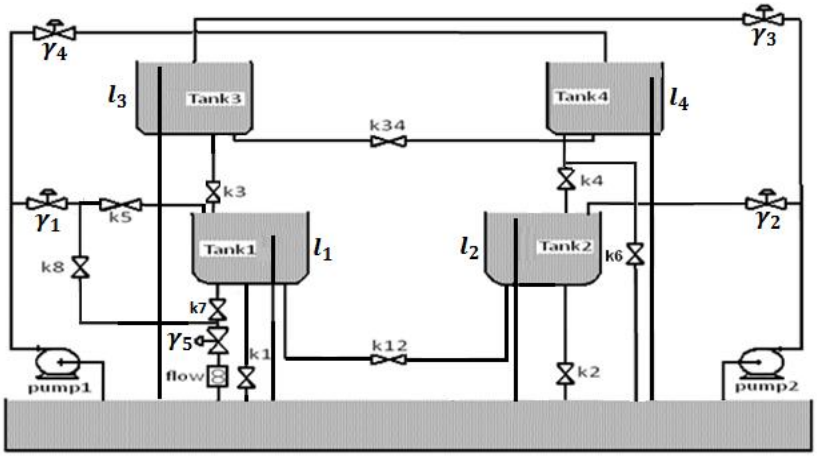
فرآیند چهارتانک اولین بار توسط Karl H. Johansson در سال ۱۹۹۸ پیشنهاد شده است [1]. فرآیند پیشنهادی توسط Johansson یک فرآیند آزمایشگاهی با چهار مخزن آب، دوتا در بالا و دو تا در پایین، با دو شیر کنترل و دو پمپ است که در آن هدف کنترل سطح تانک‌ها از طریق پمپ‌ها می‌باشد. ورودی‌های این فرآیند ولتاژ پمپ‌ها و خروجی‌های آن سطح آب دو تانک پایینی هستند. مدل خطی شده‌ی این فرآیند دارای صفر قابل تنظیم می‌باشد و امکان بررسی روش کنترلی چندمتغیره را در حالت‌های مینیمم فاز و غیرمینیمم فاز فراهم می‌کند. مقدار این صفر

توسط ضریب شیرهای کنترلی قابل تنظیم است. تنها توسعه‌هایی که از سال ۱۹۹۸ تا کنون در مورد این فرآیند صورت گرفته است این است که به جای دو شیر کنترل از چهار شیر در مسیر ورودی هر مخزن استفاده شده است [2] و در یک ساختار دیگر به جای اینکه از پمپ‌ها آب وارد مخزن‌های پایینی شود از هردو مخزن بالایی آب به دو مخزن پایین می‌ریزد [3] که تفاوت در میزان و نحوه ی تداخل بین مخزن‌ها می‌باشد.

در نمونه‌های قبلی فرآیند چهارتانک، ورودی کنترل‌کننده ولتاژ پمپ‌ها هستند و فرمان ورودی به پمپ‌ها اعمال شده و کنترل از طریق پمپ صورت می‌گیرد. در فرآیند چهارتانک جدید کنترل سطح با استفاده از شیر کنترل در مسیر ورودی آب انجام می‌شود، روشی که در صنایع اغلب از آن استفاده می‌شود. هدف کنترلی در این فرآیند، کنترل سطح هر چهار مخزن و همچنین کنترل فلوی خروجی یکی از مخازن پایینی است. با توجه به اهمیتی که کنترل دبی در کنار کنترل سطح در صنعت به خصوص صنایع نفت و پتروشیمی دارد کنترل فلو به سیستم اضافه می‌شود. پس برخلاف سیستم‌های قبلی که سیستم چندمتغیره‌ی ۲ × ۲ بودند، یک سیستم ۵ × ۵ طراحی کرده‌ایم که ورودی‌های کنترلی سیگنال‌های اعمالی به پنج شیر کنترل بوده و خروجی‌ها سطح چهار مخزن و فلوی خروجی از یکی از آنها می‌باشد. ساختار این دستگاه به این صورت است که دو مخزن در بالا و دو مخزن دیگر در پایین آنها قرار دارد و آب از طریق دو عدد پمپ از یک مخزن اصلی به این چهار مخزن پمپاژ می‌شود. فرآیند چهارتانک پیشنهاد شده امکان بررسی کنترل‌کننده‌های چندمتغیره در سیستم‌هایی با ابعاد بزرگ که در کنار پیچیدگی و غیرخطی‌گری دارای تداخل‌های زیادی بین کانال‌های مختلف ورودی و خروجی‌شان هستند را فرآهم می‌آورد. به این صورت که هر چهار مخزن از طریق لوله‌هایی به هم ارتباط دارند. همچنین نحوه‌ی پمپاژ آب به داخل مخزن‌ها از مخزن اصلی به این صورت است که هر پمپ به صورت ضربدری یک مخزن از بالا و یک مخزن از پایین را تغذیه می‌کند. آب مخزن بالایی در مخزن دیگر که مستقیما در زیر آن قرار دارد می‌ریزد. خروجی مخازن پایینی به مخزن اصلی ریخته می‌شود. در مسیر یکی از مخازن پایینی یک شیر کنترل و یک فلومتر قرار دارد که امکان کنترل فلوی خروجی آن را به کاربر می‌دهد. تانک‌های هم‌سطح از طریق لوله‌هایی به هم متصل شده‌اند که باعث انتقال آب بین آنها می‌شود. در تمامی لوله‌های رابط دستگاه از شیرهای دستی استفاده شده است که بتوان برای برای ایجاد شرایط مختلف آزمایشگاهی لوله مربوطه را حذف کرده و یا مقدار مقاومت مسیر را تغییر داد. پس با توجه به این

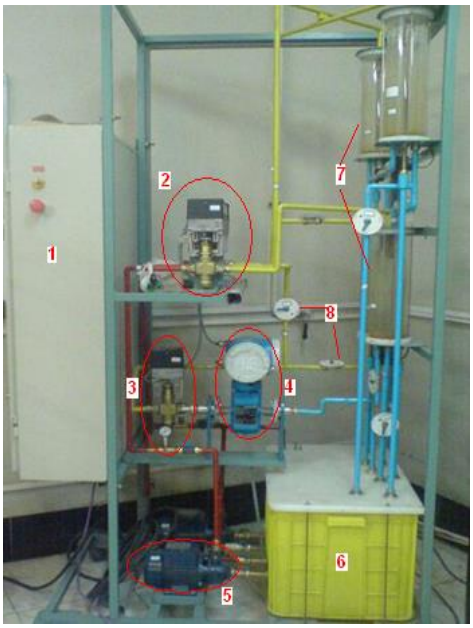
لوله‌کشی و نحوه‌ی پمپاژ آب به مخازن که هر دو تانک به صورت ضربدری از یک پمپ تغذیه می‌شوند بالاترین حالت تداخل را می‌توان بررسی کرد.

ساختار کلی دستگاه چهارتانک با تمامی اجزای مکانیکی آن در شکل ۱ آمده است. این دستگاه شامل ۴ مخزن ($tank_1, tank_2, tank_3, tank_4$) و ۴ سنسور سطح، دو پمپ، یک فلومتر، پنج شیرکنترل ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$)و ۱۰ شیر دستی ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_{12}, k_{34}$) می باشد. لوله های سرریز با قابلیت تغییر طول در داخل تانک‌ها با متغیرهای l_1, l_2, l_3, l_4 نشان داده شده‌اند.



شکل ۱- شماتیک دستگاه چهارتانک

نمای واقعی دستگاه با اجزای ذکر شده در بالا در شکل ۲ دیده می شود:

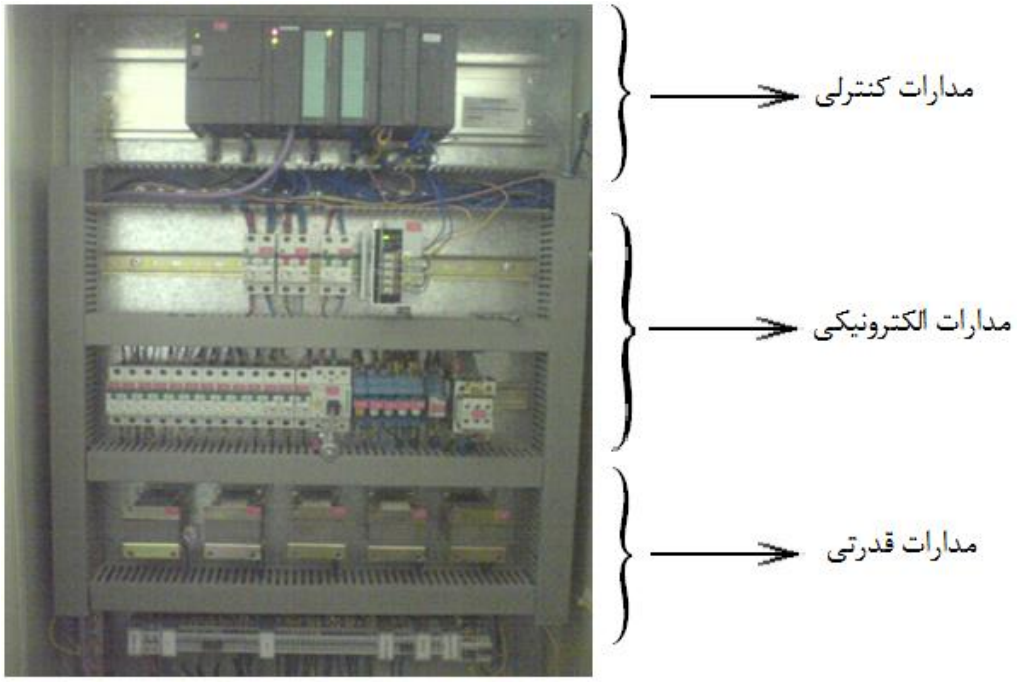


شکل ۲- نمای واقعی دستگاه چهارتانک

اجزای دستگاه به همان ترتیبی که در شکل شماره گذاری شده است در زیر آورده شده است.

۱. تابلوی برق
۲. شیرهای کنترل مسیر ورودی به مخزن ها
۳. شیر کنترل مسیر فلومتر
۴. فلومتر
۵. پمپ ها
۶. مخزن اصلی
۷. چهار مخزن کوچک به همراه لوله های سرریز قابل جابجایی در داخل آنها
۸. شیرهای دستی

اجزای داخلی تابلو برق در شکل ۳ دیده می شود. تابلو برق را می توان به سه قسمت مدارات قدرتی که شامل ترانس‌ها می باشد، مدارات الکترونیکی که شامل رله‌ها و فیوزها هستند و مدارات کنترلی که مربوط به PLC و اجزای واسط (Interface) می باشند تقسیم کرد .



شکل ۳ – تابلو برق دستگاه

در شکل های زیر اجزای دستگاه به تفکیک توضیح داده می‌شود:

نمایی از دستگاه شامل دو تانک (مخزن) پایینی و مسیرهای ورودی وخروجی آنها و شیرهای دستی مربوطه و لوله‌های سرریز داخل هر تانک

دو تانک بالایی و
مسیرهای ورودی
وخروجی آنها و شیرهای
دستی مربوطه

شیرهای کنترل

پمپ ها

فلومتر و شیر کنترل
مربوطه

مخزن اصلی آب

نمایی از چهار تانک و
مسیرهای ارتباطی بین
آنها و شیرهای دستی
ارتباط دهنده تانک ها و
خروجی آنها

چهار شیر کنترل و چهار
تانک و مسیرهای
ارتباطی بین آنها

فلومتر در مسیر خروجی
مخزن شماره یک به
همراه شیر کنترل مربوط
به آن، مخزن اصلی آب
و دو پمپ تغذیه به
همراه شیرهای فشارشکن
در مسیر خروجی پمپ‌ها

این فرآیند می‌تواند برای تست کنترل‌کننده‌های مختلف در زمینه‌ی کنترل فرآیندهای چندمتغیره مورد استفاده قرار گیرد. از جمله کنترل‌کننده PID و کنترل پیش‌بین روی این فرآیند پیاده‌سازی شده است.

در یکی از مواردی که کنترل کننده چندمتغیره روی این دستگاه تست شده است تنظیمات دستگاه به این صورت است که در آن شیرهای دستی $k_{12}, k_{34}, k_6, k_8, k_9$ کاملا بسته می باشد و آب از طریق پمپ ها از مخزن اصلی به مخزن های ۱ تا ۴ پمپاژ می شود. شیرهای k_1, k_2 فلوی خروجی از مخزن های ۱ و۲ را تعیین می کنند و شیرهای k_3, k_4 فلوی خروجی از مخزن های ۳ و ۴ و همچنین فلوی ورودی به مخزن های ۱ و۲ که به صورت غیرمستقیم از طریق شیرهای کنترلی γ_3, γ_4 قابل کنترل است و با توجه به اینکه پمپ ها به صورت ضربدری آب را در مخزن‌ها پمپاژ می کنند تداخل کامل بین هر چهار مخزن ایجاد می شود با این نحوه تنظیم شیرهای دستی یک سیستم چندمتغیره 4×4 داریم که هدف کنترل سطح سیال داخل مخزن ها می باشد. اگر شیر دستی k_8 نیز باز باشد کنترل فلو هم وارد مسئله شده و سیستم را در حالت 5×5 خواهیم داشت.

علاوه بر حالت کاری ذکر شده در بالا، با توجه به ترکیب حالات مختلف شیرهای دستی نسبت به همدیگر می توان در ۱۵ حالت مختلف به صورت سیستم یک تانک، دو تانک، سه تانک و چهارتانک، فرآیند را در حالات مینیمم فاز و غیرمینیمم فاز درنظر گرفته و الگوریتم های کنترلی مختلفی را روی آن تست کرد. همچنین با اضافه کردن کنترل فلوی تانک یک با استفاده از فلومتر نشان داده شده در ساختار فرآیند چهارتانک می توان هر کدام از حالات قبلی را که کنترل سطح مطرح بود با کنترل فلو نیز همراه ساخت. از طرفی با توجه به اینکه لوله‌های سرریز که با l_i در شکل (۱) نشان داده شد، در این فرآیند طوری طراحی شده‌اند که قابلیت تغییر طول دارند در نتیجه با انتخاب طول‌های مختلف برای آنها می توان روشهای کنترل هایبرید را نیز در کنترل سطح و کنترل فلو بررسی کرد. همانطور که دیده می‌شود طراحی فرآیند به‌گونه‌ای است که امکان بررسی حالات مختلف ترکیب سیستم در حوزه کنترل فرآیند وجود دارد.

مراجع:

1. K. H. Johansson, Jose L. R. Nunes, “A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero”, Proceeding of the American Control Conferences, Philadelphia, Pennsylvania, June 1998.
2. E. P. Gatzke, E.S. Meadows, Ch. Wang, F. J. Doyle, “Model Based Control of a Four-Tank System”, computers and chemical engineering, 24, pp. 1503-1509, 2000
3. S. H. Said, F. Msahli, “A Set of Observers Design to a Quadruple Tank Process”, 17th IEEE International Conference on Control Applications, Texas, USA, 2008