

# تشخیص خطا و عیب‌شناسی در برج تقطیر بر اساس مدل تنسی - ایستمن با روش T2 هتلینگ

سید محمد امین خاتمی، هومن فتوره‌چی\*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

احسان معانی

دانشکده علوم مهندسی، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

**چکیده:** کنترل برج تقطیر به دلیل اهمیت بالای این واحد، یکی از دغدغه‌های اصلی در طراحی فرآیندهای شیمیایی است. به دلایل مختلف عملیاتی ممکن است در برج‌های تقطیر خطا رخ دهد که عملکرد فرآیند با اختلال جدی مواجه سازد یا منجر به بروز حوادث ناگوار شود. در این پژوهش کوشش شده است با یکی از مدل‌های معتبر موجود برای برج تقطیر عریان‌ساز فرآیند تنسی ایستمن در نرم‌افزار متلب، خطاهای محتمل در کارکرد برج مربوط به این فرآیند، توسط آزمون آماری مجذور تی هتلینگ شناسایی شود و پس از تشخیص آن با روش پیشنهادی عیب‌شناسی می‌توان برای این مساله نوع خطا را تشخیص داد. روش ارائه شده می‌تواند خطاهای احتمالی در مدل را با دقت بالا و در مدت زمان کوتاه (حداکثر ۰/۱ ساعت) تشخیص دهد.

**واژگان کلیدی:** مساله تنسی ایستمن - تشخیص خطا - برج تقطیر - مجذور تی هتلینگ

**KEYWORDS:** Tennessee-Eastman Process, Fault detection, Distillation tower, Hotelling's T-squared

## مقدمه

تشخیص خطا، استفاده از داده‌های خود سامانه مورد بررسی و داده‌های تاریخی آن است. این دسته از روش‌ها که به روش‌های داده محور<sup>۱</sup> معروف هستند، چنان که از نامشان پیداست برای تشخیص خطا نیازی به استفاده از مدل ریاضی سامانه مورد مطالعه ندارند. روش‌های داده محور مقبولیت و استفاده‌ی روز افزونی دارند. دلیل این گسترش کاربرد عدم نیاز به مدل‌سازی ریاضی سامانه‌های پیچیده و تکیه بر داده‌های آماری آن است [۱]. این پژوهش‌ها را نیز می‌توان به دو گروه کلی تقسیم کرد. در گروه اول پژوهش‌گر

یکی از موضوعاتی که در مهندسی و کنترل فرآیندها مطرح است، شناسایی خطا در فرآیند یا سامانه است. عدم شناسایی به موقع خطا در هر سامانه‌ای می‌تواند منجر به خرابی آن واحد و در نهایت کل فرآیند شود و ممکن است صدمات جبران‌ناپذیری ایجاد کند. در ابتدا باید متوجه شد که آیا خطا در سامانه رخ داده است یا خیر و اگر پاسخ مثبت است علت و منشأ آن چیست. نزدیک به دو دهه است که روش‌های تشخیص خطا و عیب‌شناسی مختلفی در حوزه نظارت بر فرآیند ارائه شده است. یکی از رویکردهای اصلی

\* عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: hfatoorehchi@ut.ac.ir

(۱) Data-driven

مدل‌سازی با استفاده از روش CIPCA است، گام دوم تشخیص خطا با استفاده از جدول WGLR است. گام سوم هم ایزوله کردن خطا با استفاده از WGLR است. نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی این پژوهش توانسته است خطاهای احتمالی را با خطای صفر تشخیص داده و کنترل کند.

در گروه دوم این پژوهش‌ها، از یک مدل یا فرآیند مشخص و پرکاربرد برای تشخیص خطا استفاده می‌شود. یکی از این فرآیندها مساله یا فرآیند تنسی ایستمن<sup>۱۵</sup> (TEP) است. استفاده از روش‌های داده‌محور برای این فرآیند به دو دلیل مناسب است. مهم‌ترین دلیل این است که معادلات ریاضی این فرآیند توسط طراحان آن اعلام نشده است. البته پژوهش‌هایی برای فرموله کردن آن انجام شده است که برای نمونه می‌توان به پژوهش ریکر و لی<sup>۱۶</sup> [۷] اشاره کرد. اما بدون داشتن معادلات ریاضی فرآیند نیز می‌توان از مدل‌های موجود برای تولید مقدار زیادی داده برای تشخیص خطا یا کنترل این فرآیند استفاده کرد و نیازی به استخراج معادلات ریاضی آن نیست. دلیل دوم ماهیت پیچیده‌ی این فرآیند است که استفاده از روش‌های مدل‌محور<sup>۱۷</sup> را برای تشخیص خطا در آن دشوار می‌کند. بنابراین پژوهش‌های داده‌محور متنوعی روی کل فرآیند آن یا واحدهای مختلف آن انجام شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. تیان و همکاران<sup>۱۸</sup> [۸] در سال ۲۰۱۲ با شبیه‌سازی پویای برج جریان‌ساز TEP یک الگوریتم برای شناسایی خطا ارائه کردند. در این پژوهش که یکی از منابع اصلی پژوهش حاضر نیز هست، از دو روش برای تشخیص خطا استفاده شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است. روش اول، روش مدل‌محور غیر خطی است. روش دوم، روش مدل‌محور دوگانه<sup>۱۹</sup> است که ترکیبی از روش غیر خطی و روش خطی مبنی بر الگوریتم LSQ<sup>۲۰</sup> است. که در آن خطا، با استفاده از آماره‌ی کیو<sup>۲۱</sup> شناسایی می‌شود. نتایج آنها نشان می‌داد که خطاها توسط هر دو روش به خوبی شناسایی شدند اما روش دوم عملکرد سریع‌تر و دقیق‌تری داشته

یک سامانه منحصر به فرد را انتخاب می‌کند و برای آن با استفاده از روش‌های موجود، روش تشخیص خطا ارائه می‌کند. برای مثال امین و همکارانش<sup>۱</sup> [۲] در سال ۲۰۱۹ در پژوهش خود با استفاده از DBN<sup>۲</sup> به شناسایی خطا و تحلیل آن در یک سیستم متشکل از یک برج تقطیر و یک مخزن پیوسته همزده گرمکن‌دار<sup>۳</sup> پرداختند، که با توجه به پیوسته و پویا بودن سامانه انتخاب شده، مدل به خوبی توانست خطاهای سیستم را تشخیص دهد. میراخورلی<sup>۴</sup> [۳] در سال ۲۰۱۹ در پژوهش خود از روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبانی<sup>۵</sup> برای تشخیص خطا در یک مدل پویای برج تقطیر بهره برد. این روش که از روش‌های یادگیری با نظارت<sup>۶</sup> محسوب می‌شود، بدون استفاده از معادلات ریاضی مدل مورد بررسی و با استفاده از داده‌های تاریخی بدون خطا می‌تواند خطاهای رخ داده را تشخیص دهد. لی و همکاران<sup>۷</sup> [۴] نیز در سال ۲۰۱۹ با ترکیب DEAs<sup>۸</sup> و برای دسته‌بندی اطلاعات و آموزش دادن به CNNs<sup>۹</sup> که نوعی از شبکه عصبی مصنوعی هستند و داده‌های یک برج تقطیر پروپان‌زدا مدلی برای شناسایی به موقع خطا ارائه کردند که در حالت بهینه می‌تواند دقت ۹۲/۲ درصد داشته باشد، در حالی که هیچ‌یک از این دو روش به تنهایی چنین دقتی نداشتند. تقوی و همکاران<sup>۱۰</sup> [۵] در سال ۲۰۲۰ برای تشخیص وقوع خطا در برج تقطیر از NARX<sup>۱۱</sup> استفاده کردند. برای این برج مورد مطالعه سه نوع خطای: گیر کردن شیر در جریان بازیافت و جوشاننده و وقوع طغیان در سینی‌های برج، در نظر گرفته شده است و از داده‌های تاریخی بدون خطای برج برای آموزش دادن شبکه استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند هر سه خطا را به خوبی شناسایی کند. حرکت و همکاران<sup>۱۲</sup> [۶] نیز در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی مشابه به تشخیص خطای حسگر در برج تقطیر پرداختند، با این تفاوت که آن‌ها از تکنیک یادگیری ماشین استفاده کردند. این تکنیک در واقع WGLR<sup>۱۳</sup> بر مبنای CIPCA<sup>۱۴</sup> است. این پژوهش از ۳ گام اصلی تشکیل شده است. گام اول

(۱) Amin et al

(۳) Complete kinetics model

(۵) Support vector machine classification

(۷) Li et al

(۹) Convolutional Neural Networks

(۱۱) Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input

(۱۳) Weighted Generalized Likelihood Ratio

(۱۵) Tennessee Eastman Problem

(۱۷) Model-Based

(۱۹) Two-tier model based

(۲۱) Q-statistic

(۲) Dynamic Bayesian Network

(۴) Mirakhorli

(۶) Supervised learning

(۸) Deep Auto-Encoders

(۱۰) Taqvi et al

(۱۲) Harkat et al

(۱۴) Complete-Information Principal Component Analysis

(۱۶) Ricker and Lee

(۱۸) Tian et al

(۲۰) Least Square Quadratic

فرآیند با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی<sup>۱۴</sup> به چندین بلوک داده تبدیل می‌شود، سپس از PCA برای هریک از این بلوک‌ها استفاده می‌شود و از روش مجذور تی هتلینگ برای پایش استفاده می‌شود. این روش پیشنهادی بهبود قابل توجهی در زمان تشخیص خطا نسبت به روش PCA تنها نشان داد. روش مجذور تی هتلینگ در تشخیص خطا در TEP نیز پرکاربرد بوده است. به عنوان مثال لو و همکاران<sup>۱۵</sup> [۱۱] در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی مشابه از PCCA-CSS<sup>۱۶</sup> برای تشخیص و ایزوله کردن خطا در TEP و فرآیند صنعتی تقطیر متانول استفاده کردند و آن را با روش LV<sup>۱۷</sup> مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها برتری قابل توجه روش اول را نشان داد.

با نظر به پژوهش‌های مرور شده، موضوع تشخیص خطا در TEP، همچنین برج تقطیر یکی از موضوعات جذاب برای پژوهشگران حوزه‌های مهندسی بوده است. با توجه به اهمیت این موضوع علاوه بر اینکه تا امروز روی برج تقطیر TEP به صورت مجزا پژوهش‌های بسیار محدودی انجام شده است. همچنین با مقایسه‌ی روش‌های موجود می‌توان نتیجه گرفت که روش مجذور تی هتلینگ یکی از روش‌های موثر برای تشخیص خطا در حوزه‌ی مذکور است که طبق آخرین اطلاعات نگارندگان پژوهش مشابهی توسط این روش انجام نشده است. بنابراین پژوهش حاضر بر تشخیص خطا در برج تقطیر تنسی ایستمن (TEP) با روش مجذور تی هتلینگ متمرکز خواهد بود.

#### تشریح مسئله

چنانچه پیش‌تر اشاره شد، استفاده از فرآیندها و مدل‌های معروف و پرکاربرد پژوهش‌های پیشین راهی ساده و مطمئن است. یکی از قدیمی‌ترین و معتبرترین فرآیندهای معیار را *داونز و ووگل*<sup>۱۸</sup> [۱۲] در سال ۱۹۹۳ ارائه کردند. در این مقاله یک فرآیند برای ارزیابی مدل‌های کنترلی ارائه شده است که نتیجه همکاری بخش صنعتی و دانشگاهی بوده است. به دلیل همین همکاری بین دانشگاه تنسی

است. در این قبیل پژوهش‌ها استفاده از روش‌ها و آزمون‌های آماری یکی از راه‌هایی است که علاوه بر داشتن سهولت و سرعت اجرا، دقت بالایی نیز دارند. یکی از این روش‌ها، روش مجذور تی هتلینگ<sup>۱</sup> است که از آن برای تشخیص خطا در پژوهش‌های مختلفی استفاده شده است. آماری مجذور تی هتلینگ برای اولین بار توسط ریاضیدان آمریکایی *هارولد هتلینگ*<sup>۲</sup> ارائه شد. او در ابتدا از این آزمون به عنوان تعمیم‌یافته آزمون تی استیودنت<sup>۳</sup> نام برد [۹]. مجذور تی هتلینگ در واقع یک توزیع احتمال چند متغیره<sup>۴</sup> است که ارتباط مستقیم با توزیع فیشر یا اف<sup>۵</sup> دارد. این روش یک آزمون فرض آماری برای مقایسه‌ی نمونه‌های چند متغیره است. به بیان دیگر، اگر حالت یا خروجی‌های هر سامانه یا فرآیندی را در هر لحظه با یک نمونه چند متغیره بیان کنیم می‌توان با مقایسه این نمونه با نمونه معیار همان سامانه یا فرآیند انحراف از حالت استاندارد یا وقوع خطا را تشخیص داد. از آنجایی که در هر فرآیند شیمیایی، متغیرهای متنوعی وجود دارد، این روش در تشخیص خطا در این حوزه کاربرد زیادی دارد. یکی از دیگر کاربردهای مهم این روش، استفاده به عنوان روش پایش در PCA<sup>۶</sup> است که به همراه SPE<sup>۷</sup> در مدل‌های مختلف PCA کاربرد فراوان دارند. *کیتانو و همکاران*<sup>۸</sup> [۱۰] در سال ۲۰۱۷ از روش KPCA-RBC<sup>۹</sup> اصلاح شده برای تشخیص خطا در فرآیند VAM<sup>۱۰</sup> به عنوان مطالعه موردی استفاده کردند. روش KPCA-RBC قدیمی فقط بر بزرگی مقدار خطا در سامانه متمرکز بود، اما روش جدید در کنار تمرکز بر این موضوع میزان کاهش شاخص تشخیص خطا<sup>۱۱</sup> در هر محور بر اثر اصلاح ساختار<sup>۱۲</sup> را نیز به حساب می‌آورد تا محدودیت‌های روش قدیمی را نداشته باشد. در بخش PCA این روش مجذور تی هتلینگ پایش روش را انجام می‌دهد. نتایج پژوهش برتری روش پیشنهادی جدید را نسبت به روش پیشین نشان دادند. *اسمیت و پاول*<sup>۱۳</sup> [۱۰] در سال ۲۰۱۹ از PCA برای تشخیص خطا در یک فرآیند شیمیایی استفاده کردند. در این پژوهش ابتدا داده‌های دریافتی از حسگرهای

(۱) T2 Hotelling

(۳) Student's t-test

(۵) Fisher or F distribution

(۷) Squared Prediction Error

(۹) Kernel Principal Component Analysis - Reconstruction-Based Contribution

(۱۰) vinyl acetate monomer

(۱۲) Reconstruction

(۱۴) Clustering

(۱۶) Probabilistic Principal Component Analysis with Continuous Spike-and-Slab

(۱۷) Latent Variable

(۲) Harold Hotelling

(۴) Multivariate probability distribution

(۶) Principal Component Analysis

(۸) Kitano et al

(۱۱) Fault detection index

(۱۳) Smith and Powell

(۱۵) Luo et al

(۱۸) Downs and Vogel

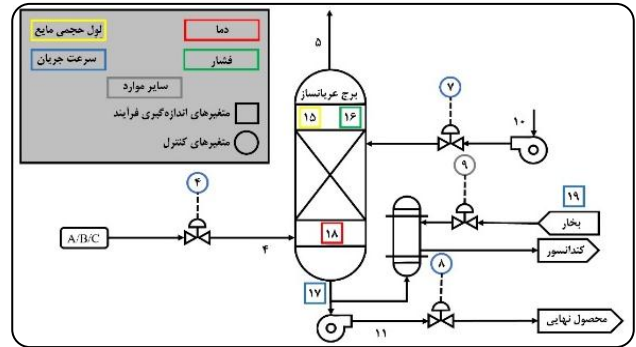
جدول ۱ - اغتشاشات یا خطاهای مربوط به برج عریان ساز در مدل تنسی ایستمن

نوع	نام متغیر	متغیر فرآیند
پلهای	IDV (1)	نسبت مواد A/C، با جزء ماده B ثابت (جریان ۴)
پلهای	IDV (2)	جزء ماده B، با نسبت مواد A/C ثابت (جریان ۴)
پلهای	IDV (7)	فت Head فشاری ماده C- کاهش دسترسی (جریان ۴)
تغییرات تصادفی	IDV (8)	ترکیب اجزای خوراک مواد A، B و C (جریان ۴)
تغییرات تصادفی	IDV (10)	دمای جریان خوراک ماده C (جریان ۴)

جدول ۲ - خروجی‌های مربوط به برج عریان ساز در مدل تنسی ایستمن

واحد	مقدار مبنا	نام متغیر	متغیر فرآیند
%	۵۰/۰۰۰	XMEAS (15)	لؤل حجمی برج عریان ساز
kPa Gauge	۳۱۰۲/۲	XMEAS (16)	فشار برج عریان ساز
m <sup>3</sup> /s	۰/۰۰۶۴	XMEAS (17)	جریان پایینی برج عریان ساز (جریان ۱۱)
°C	۶۵/۷۳۱	XMEAS (18)	دمای برج عریان ساز
Kg/s	۰/۰۶۴	XMEAS (19)	جریان بخار برج عریان ساز

آن برای اثبات فرض‌های آماری کافی است. برای این کار به دو نمونه از متغیرهای مختلف از برج تقطیر TEP نیاز داریم. برای تولید دو نمونه‌ی مورد استفاده در این روش، در این پژوهش دو فرآیند به صورت همزمان اجرا می‌شوند، یکی از فرآیندها داده‌های مربوط به شرایط معیار فرآیند را تامین می‌کند و فرآیند دوم همان فرآیند است که با یکی از خطاهای تعریف شده مربوط به برج تقطیر برای این فرآیند اجرا می‌شود. در واقع فرآیند اول نقش داده‌های تاریخی مربوط به فرآیند استاندارد را دارد که فرآیند در حالت‌های دیگر با آن مقایسه می‌شود. راه ساده‌تر این است که برای تشخیص خطا از مقادیر ثابت در بازه‌ی مشخص شده در مقاله مرجع برای هر متغیر استفاده کرد. اما برای نزدیک کردن شرایط تشخیص خطا به واقعیت، از خروجی‌های فرآیند در حالت بدون اغتشاش استفاده شده است. در این پژوهش کنترل‌کننده روی حالت معیار اعمال نشده است. لازم به ذکر است که فرآیند معیار در اینجا تنها وظیفه تامین داده‌های فرضی استاندارد را دارد و روش مورد استفاده مستقل از مقادیر استاندارد فرآیند عمل می‌کند. بنابراین در این مسئله در هر لحظه ما دو نمونه چند متغیره خواهیم داشت که یکی مربوط به



شکل ۱ - عریان ساز در مدل تنسی ایستمن

و شرکت ایستمن<sup>۱</sup>، نتیجه کار این پژوهش به فرآیند تنسی- ایستمن مشهور شد. این فرآیند به عنوان یک مرجع واحد برای مقایسه سیستم‌های کنترلی درآمده است که پژوهش‌های بسیاری برای سنجش عملکرد مدل‌های کنترلی روی آن انجام شده است. این فرآیند متشکل از ۴ واحد عملیاتی اصلی به شرح زیر است:

۱-راکتور دو فازی گرمازا

۲-واحد جداسازی<sup>۲</sup>

۳-برج عریان سازی<sup>۳</sup> همراه با جوشاننده

۴-کمپرسور بازیافت<sup>۴</sup>

مزیت استفاده از TEP این است که پژوهشگر می‌تواند زمان لازم برای مدل‌سازی مجدد سامانه یا فرآیند مورد نظر، را بر حوزه تخصصی مورد نظر خود یعنی تشخیص خطا صرف کند ضمن اینکه استفاده از این مدل‌ها امکان مقایسه عملکرد روش مورد استفاده پژوهشگر با روش‌های پیشین را فراهم می‌آورد.

همانطور که پیش تر اشاره شد در این پژوهش بر روی شناسایی خطاهای تاثیرگذار بر عملکرد برج عریان ساز از TEP تمرکز شده است و به سایر واحدهای این فرآیند نخواهیم پرداخت.

در TEP، برج عریان ساز، چند نوع خطا می‌تواند داشته باشد که در جدول ۱ آورده شده است. خروجی‌های مرتبط با برج تقطیر نیز در جدول ۲ آورده شده‌اند.

پس برج عریان ساز در مدل TEP، ۵ متغیر خطا و ۵ متغیر خروجی دارد. در این شرایط روشی که برای تشخیص خطا استفاده می‌شود نیز بایستی علاوه بر صحت و دقت قابل قبول، مستقل از مدل و معادلات ریاضی حاکم بر آن باشد. به همین منظور برای تشخیص خطا از روش آماری مجذور تی هتلینگ استفاده شده است که داده محور بوده و کاملاً مبتنی بر داده‌های خروجی است، به علاوه دقت

(۱) University of Tennessee and Eastman Chemical Company

(۳) Reboiled stripper

(۲) Flash separator

(۴) Recycle compressor

فرض شده‌اند. هدف تشخیص انحراف فرآیند یا نمونه از حالت استاندارد است که منجر به تشخیص خطا می‌شود. روش محاسبه مقادیر خروجی این روش برای حالت نمونه‌های مستقل در معادله‌های (۱) تا (۷) آورده شده است [۱۴].

$$n = nx + ny \quad (۱)$$

$$su = \frac{nx \times cov(x) + ny \times cov(y)}{n-2} \quad (۲)$$

$$d = mean(x) - mean(y) \quad (۳)$$

$$D2 = d \times (su)^{-1} \times d \quad (۴)$$

$$T2 = \left(\frac{nx \times ny}{n}\right) \times D \quad (۵)$$

$$F = T2 \times \frac{(n-p-1)}{((n-2) \times p)} \quad (۶)$$

$$pval = 1 - \int_0^F \frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{p}{2}\right) \times \Gamma\left(\frac{n-p-1}{2}\right)} \times \left(\frac{p}{n-p-1}\right)^{\frac{p}{2}} \times \frac{t^{\frac{p-2}{2}}}{\left(1 + \left(\frac{p}{n-p-1}\right) \times t\right)^{\frac{n-1}{2}}} dt \quad (۷)$$

در معادله (۷)، cov بیانگر کوواریانس و mean بیانگر میانگین ماتریس مربوطه است. دو نمونه x و y که هر یک به p متغیر و به ترتیب nx و ny نمونه از جامعه مورد مطالعه دارند، تشکیل دو ماتریس به ترتیب با تعداد nx و ny سطر و p ستون از نمونه را می‌دهند. حال برای تشخیص خطا دو فرض آماری خواهیم داشت:

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad (۸)$$

فرض صفر می‌گوید این دو جامعه که نمونه‌ها از آن‌ها گرفته شده است، میانگین‌های برابر دارند یا در سطح اطمینان مدنظر برای رد  $H_0$  دلیل کافی وجود ندارد، بنابراین می‌توان گفت دو جامعه احتمالاً برابر هستند و احتمالاً خطایی رخ نداده است.

$$H_1: \mu \neq \mu_0 \quad (۹)$$

فرض جایگزین می‌گوید دلیل کافی برای رد  $H_0$  وجود دارد، بنابراین می‌توان گفت این دو جامعه با یکدیگر برابر نیستند و با احتمال زیاد خطا رخ داده است. این احتمالات بستگی به مقدار معناداری آماری یا  $\alpha$  مورد نظر پژوهشگر دارد. این مقدار آستانه‌ی مورد نظر پژوهشگر را برای رد یا پذیرش فرض صفر مشخص می‌کند و هرچه این عدد پایین‌تر باشد احتمال پذیرش فرض صفر

فرآیند در حالت استاندارد و دیگری با اغتشاش است. هدف تشخیص انحراف فرآیند یا نمونه از حالت استاندارد است که منجر به تشخیص خطا و عیب‌یابی می‌شود. برای داشتن نمونه‌های چند متغیره، نیاز است داده‌های خروجی هر دو فرآیند در فواصل زمانی مشخصی ذخیره شوند و با تاخیر به بخش تشخیص خطا ارسال شوند. برای این منظور، از تاخیر ۵ ثانیه‌ای استفاده شده است. بنابراین پس از گذشت ۵ ثانیه، خروجی لحظه‌ای از فرآیند، در یک ماتریس ۵ در ۵ ذخیره می‌شود، که سطرهای آن تعداد متغیرها مورد بررسی برج تقطیر و ستون‌ها داده‌های خروجی برای ۵ بازه‌ی زمانی متوالی خواهد بود. این مقدار تاخیر هم داده‌های لازم برای انجام محاسبات آماری را فراهم می‌آورد، هم به قدر کافی سریع است که بتواند خطا را به خوبی و به سرعت تشخیص دهد. لازم به ذکر است مقدار این تاخیر ممکن است بسته به ماهیت مسئله تغییر کند. خروجی مورد نظر از این روش مقدار پی<sup>۱</sup> است که چنانچه از مقدار معناداری آماری<sup>۲</sup> کمتر شود، به معنی وقوع خطا در برج تقطیر است.

#### برنامه‌نویسی مساله TE

داونر و ووگل [۱۲] در پژوهش خود کد این مساله را به زبان فرترن<sup>۳</sup> نوشتند، پس از آن ریکر<sup>۴</sup> [۱۳] کد این مساله را به زبان سی<sup>۵</sup> تبدیل کردند و در پژوهش حاضر از برنامه تبدیل شده به زبان متلب<sup>۶</sup> استفاده شده است. این مدل دو سری ورودی دارد. یک سری از ورودی‌ها، متغیرهای قابل تنظیم فرآیند هستند. از آنجا که این متغیرها توسط کاربر تنظیم می‌شوند و ماهیت خطا ندارند، در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شده‌اند. سری دوم ورودی‌های این مدل اغتشاشات هستند. در این مدل مقدار اولیه‌ی همگی آنها صفر در نظر گرفته شده است. مقدار صفر به این معنی است که اغتشاش یا بار به فرآیند وارد نمی‌شود.

#### تشخیص خطا

چنان که اشاره شد آماره مجذور تی هتلینگ امکان مقایسه دو نمونه‌ای که هر یک چند مشخصه یا متغیر از جامعه مورد بررسی را دارند، فراهم می‌آورد. این نمونه‌ها می‌توانند وابسته یا مستقل باشند. با توجه به اینکه در این پژوهش فرض شده دو فرآیند کاملاً مستقل از هم در حال انجام هستند و در واقع یکی از فرآیندها گویی در گذشته انجام شده است، نمونه‌های گرفته شده مستقل یا غیر وابسته

(۱) P value

(۳) FORTRAN

(۵) C

(۲) Level of significance

(۴) Ricker N.L.

(۶) MATLAB

## نتیجه‌ها و بحث

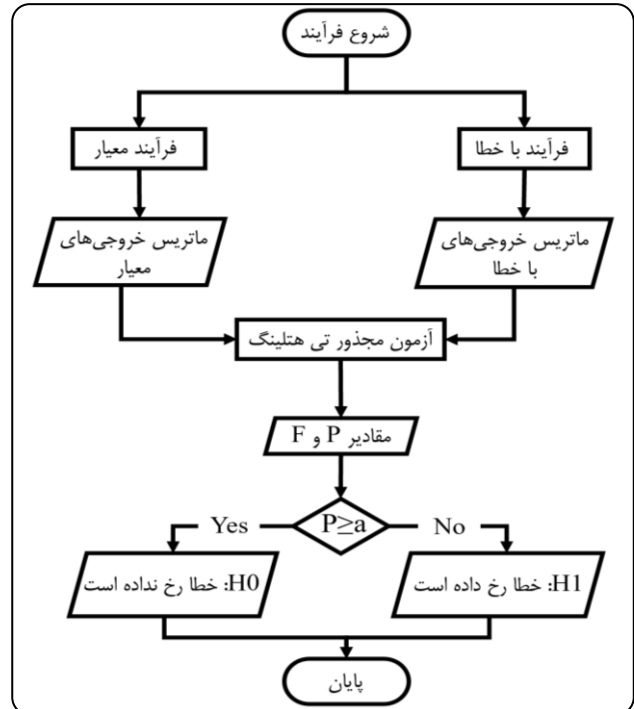
داونر و ووگل [۱۲] برای TEP حالت مبنایی در نظر گرفتند که خروجی آن را در شکل ۳ ارائه شده است. این حالت مبنا برای طبیعی‌تر و واقعی‌تر شدن شرایط تشخیص خطا به عنوان حالت مبنا در نظر گرفته شده است.

بدیهی است که در این شرایط، خروجی الگوریتم تشخیص خطا بایستی مقادیر ثابت را نشان بدهد. یعنی مقدار پی و عدد اف<sup>۳</sup> که در معادله‌های (۶) و (۷) به آن‌ها اشاره شد به ترتیب برابر با عدد ثابت یک و صفر باشند. چنانچه در رابطه فرض آماری معادله (۸) به آن اشاره شد این خروجی به این معنی است که این دو جامعه که نمونه‌ها از آن‌ها گرفته شده است، میانگین‌های برابر دارند یا در سطح اطمینان مدنظر برای رد  $H_0$  کافی وجود ندارد، بنابراین می‌توان گفت احتمالاً خطایی رخ نداده است.

اگر دوباره مدل را این‌بار با خطای ۱ یعنی تغییر پله‌ای نسبت مواد A/C، با جزء ماده B ثابت در جریان ۴ ورودی به برج، اجرا کنیم، خروجی‌ها از مدل برای متغیرهای برج تقطیر مطابق شکل ۴ خواهد بود. ثابت شدن ناگهانی مقادیر خروجی چنان که در شکل ۴ مشهود است، به علت خاموش شدن سامانه است که به دلیل وقوع خطا و عبور یکی از متغیرهای خاموشی مدل از حد عملکردی آن است. از آنجایی که در این مدل هیچ کنترل‌کننده‌ای اعمال نشده است و تنها بر تشخیص خطا تمرکز شده است همچنین به دلیل این که الگوریتم تشخیص خطا در این پژوهش خیلی سریعتر از آنکه مدل خاموش شود خطا را تشخیص می‌دهد، این اتفاق در روند پژوهش حاضر خللی وارد نمی‌کند. نمودارهای مربوط به تشخیص خطا در این حالت به صورت شکل ۵ خواهد بود.

با توجه به ماهیت مساله جهت اطمینان از حصول خطا، در این پژوهش  $\alpha=0.025$  در نظر گرفته شده است. در این شرایط، با گذشت مدت زمان ۰/۰۵۵۵۶ ساعت و مقدار ۰/۰۲۴۹۹۲ مقدار پی، خطا تشخیص داده می‌شود. به بیان دیگر چون مقدار مقدار پی از مقدار آستانه‌ای اطمینان در نظر گرفته شده برای فرآیند کمتر شده است، فرض جایگزین یا  $H_1$  پذیرفته می‌شود. این فرض می‌گوید دلیل کافی برای رد  $H_0$  وجود دارد، بنابراین با قطعیت می‌توان گفت این دو جامعه با یکدیگر برابر نیستند و خطایی رخ داده است.

به همین ترتیب برای خطای ۲ یعنی تغییر پله‌ای ماده‌ی B، با نسبت مواد A/C ثابت در جریان ۴ ورودی به برج، خروجی‌ها فرآیند به صورت شکل ۶ است.



شکل ۲ - الگوریتم تشخیص خطا به کمک مجذور تی هتلینگ

بالتر می‌رود، بنابراین اگر فرض صفر رد شود با اطمینان و احتمال بیشتری می‌توان در مورد نابرابری دو جامعه مورد مطالعه نظر داد که در پژوهش حاضر این اتفاق به معنی وقوع خطا در برج تقطیر است. با توجه به توضیحات فوق خروجی‌های این روش، توزیع فیشرف<sup>۱</sup> که منطبق بر مقادیر توزیع کای مربع است و از معادله (۶) به دست می‌آید و مقدار پی یا معناداری آماری<sup>۲</sup> که از معادله (۷) محاسبه می‌شود، هستند. برای رد و تایید فرض آماری، ساده‌ترین راه استفاده از مقدار پی است. به این صورت که اگر این مقدار از آستانه‌ی اطمینان در نظر گرفته شده برای فرآیند بیشتر یا مساوی شد، یعنی:

$$p \geq \alpha \quad (10)$$

شواهد کافی برای رد فرض  $H_0$  وجود ندارد و این فرض پذیرفته می‌شود. اما اگر این مقدار از آستانه اطمینان در نظر گرفته شده برای فرآیند کمتر شد، یعنی:

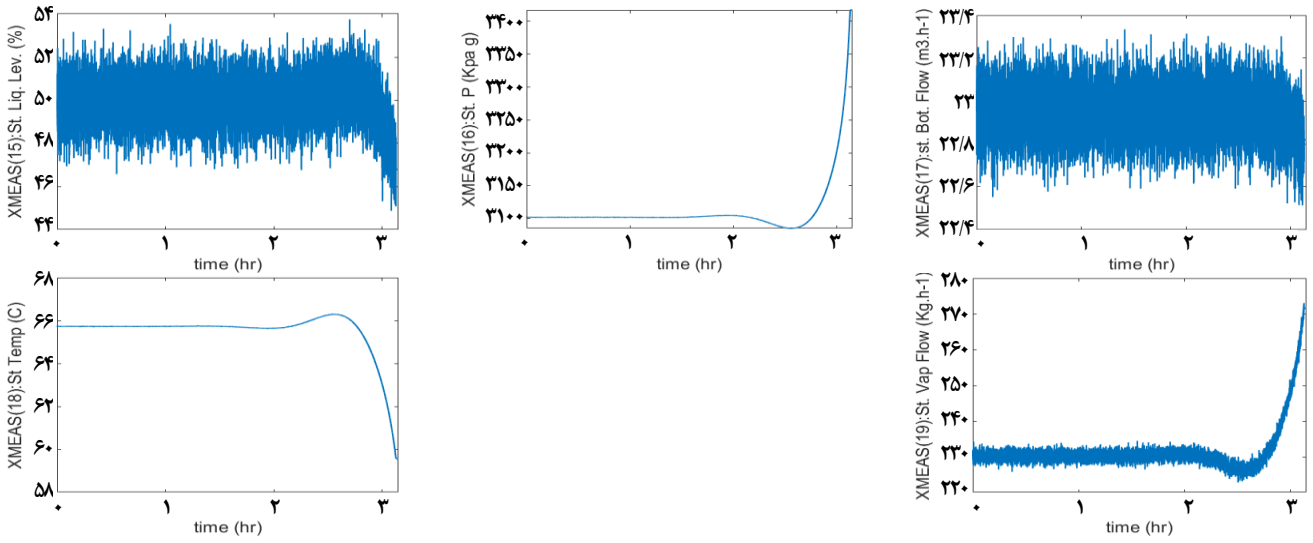
$$p < \alpha \quad (11)$$

فرض  $H_0$  رد می‌شود و  $H_1$  پذیرفته می‌شود، در نتیجه می‌توان گفت خطا در سیستم رخ داده است. شکل ۲ الگوریتم تشخیص خطا در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

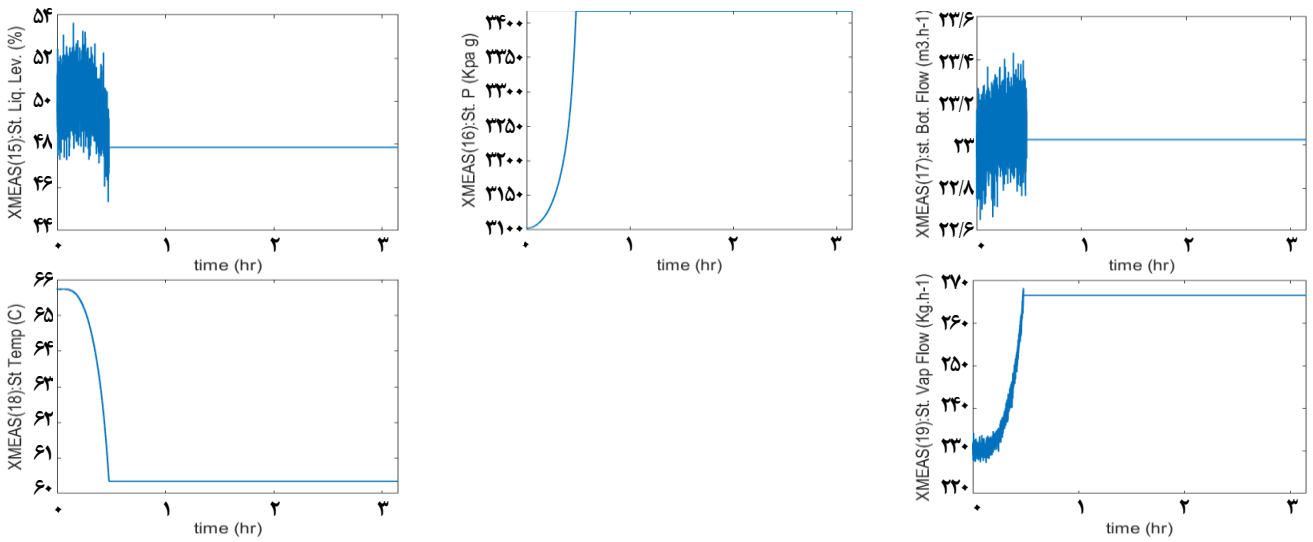
(۱) F or Fisher distribution

(۳) F number

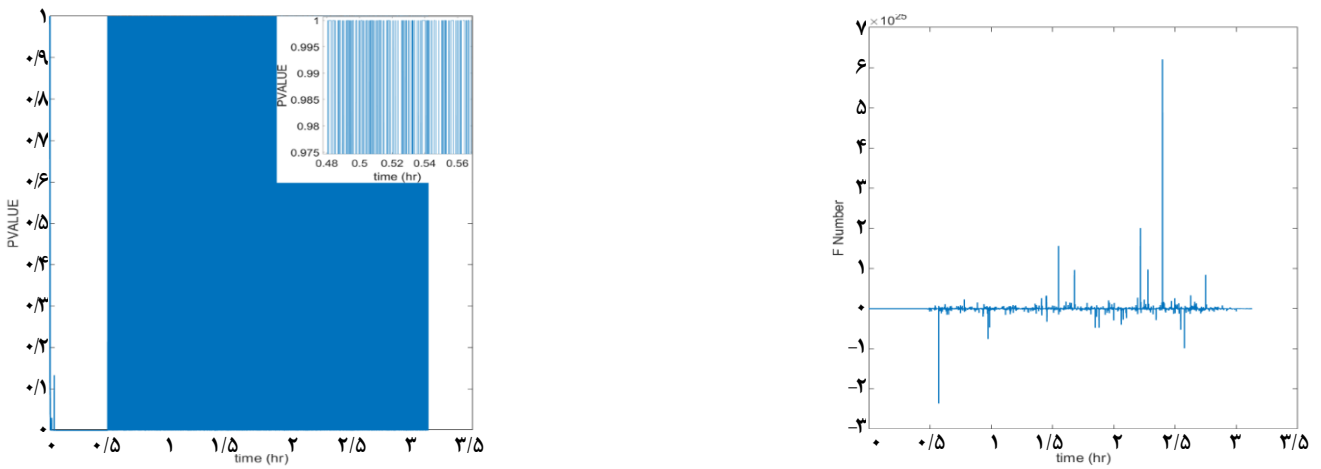
(۲) Statistical significance



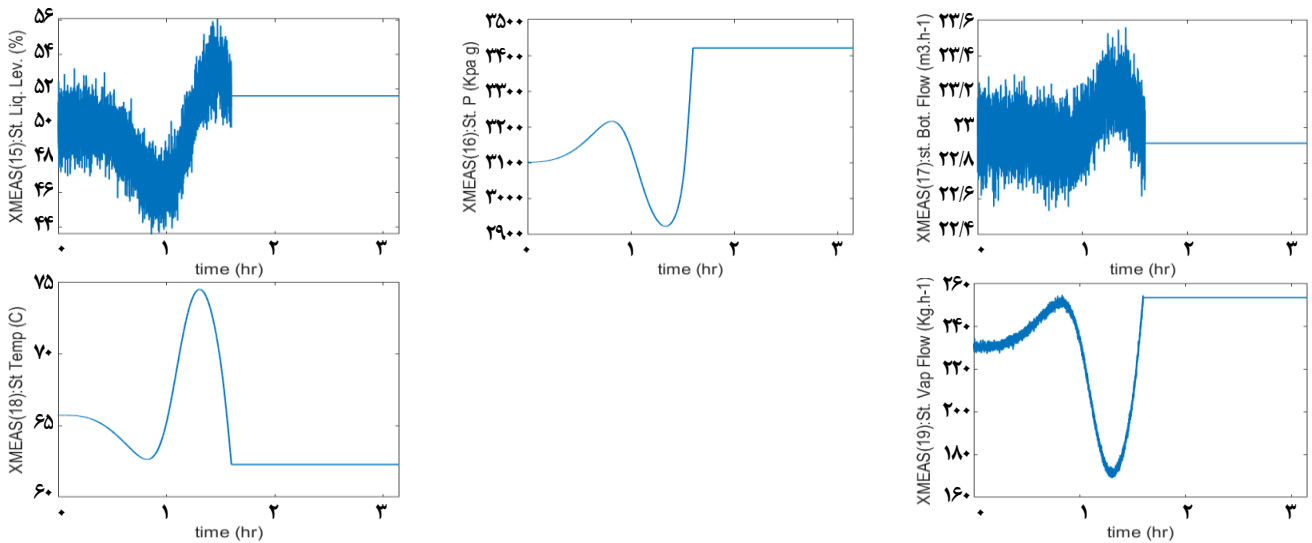
شکل ۳ - خروجی‌های برج عریان‌ساز برای حالت مینا و بدون خطا



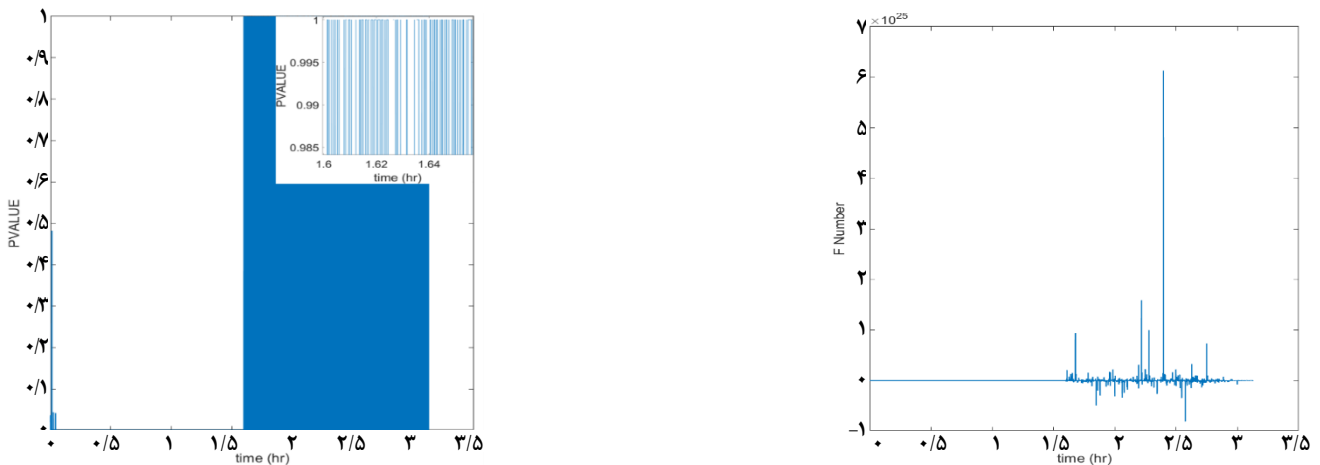
شکل ۴ - خروجی‌های برج عریان‌ساز با خطای ۱



شکل ۵ - خروجی‌های الگوریتم تشخیص خطا برای خطای ۱



شکل ۶ - خروجی‌های برج عریان‌ساز با خطای ۱



شکل ۷ - خروجی‌های الگوریتم تشخیص خطا برای خطای ۲

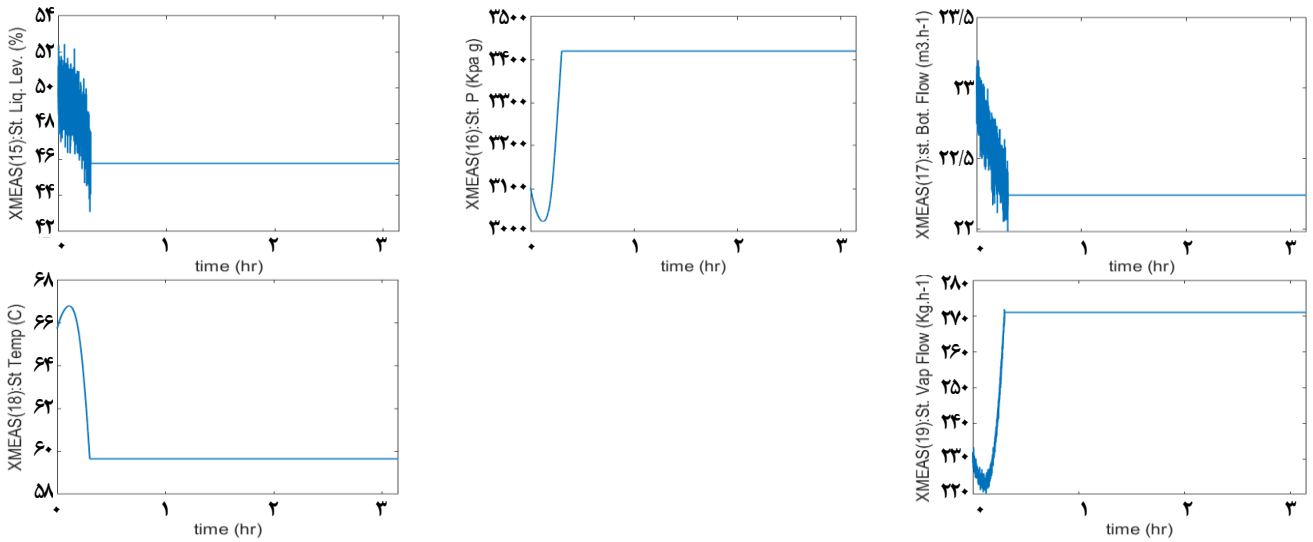
خطای ۸ مربوط به جزء مولی اجزای جریان ۴ است که مقداری تصادفی است، اما در برنامه تفاوتی با سایر خطاها ندارد و پس از تنظیم بر روی دریافت خطا یا اغتشاش، برنامه به این متغیر مقادیر تصادفی اختصاص می‌دهد.

شکل ۱۰، خروجی‌های برج را برای خطای ۸ نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ نیز نتایج مقادیر آماری مقدار پی و عدد اف مربوط به این خطا آمده است. با حضور خطای ۸، برنامه پس از گذشت زمان ۰/۱۰۵ ساعت از شروع فرآیند با مقدار  $0.22847$  مقدار پی، وقوع خطا را تشخیص می‌دهد. خطای ۱۰ هم تغییرات دمای خوراک C (جریان ۴) است که به صورت تصادفی تغییر می‌کند. شکل ۱۲، خروجی‌های برج را برای این خطا نشان می‌دهد. در ادامه در شکل‌های ۱۳ نتایج مقادیر آماری مربوط به خطای ۱۰ نمایش داده شده است.

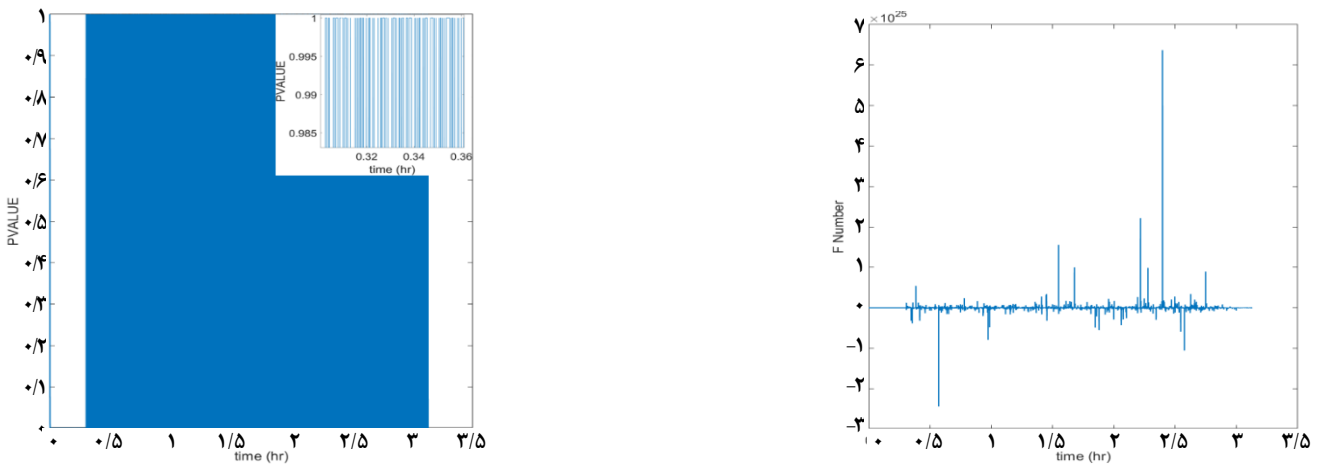
این خطا نیز چنان که در شکل ۶ مشخص است، منجر به نوسانات شدید در خروجی‌های برج می‌شود. شکل ۷ نیز نمودارهای مربوط به مقادیر عدد اف و مقدار پی را برای این خطا نمایش می‌دهد. در حضور خطای ۲، الگوریتم ارائه شده پس از گذشت زمان  $0.03056$  ساعت از شروع فرآیند با مقدار  $0.01663$  مقدار پی، وقوع خطا را تشخیص می‌دهد.

خطای ۷ به معنی افت Head فشاری ماده C یا کاهش دسترسی در جریان ۴ است، شکل ۸ خروجی‌های برج را برای این خطا نشان می‌دهد. شکل ۹ خروجی عدد اف و مقدار پی برای خطای ۷ نشان می‌دهد. در حضور خطای ۷، برنامه پس از گذشت زمان  $0.02778$  ساعت از شروع فرآیند با مقدار  $0.11536$  مقدار پی، وقوع خطا را تشخیص می‌دهد.

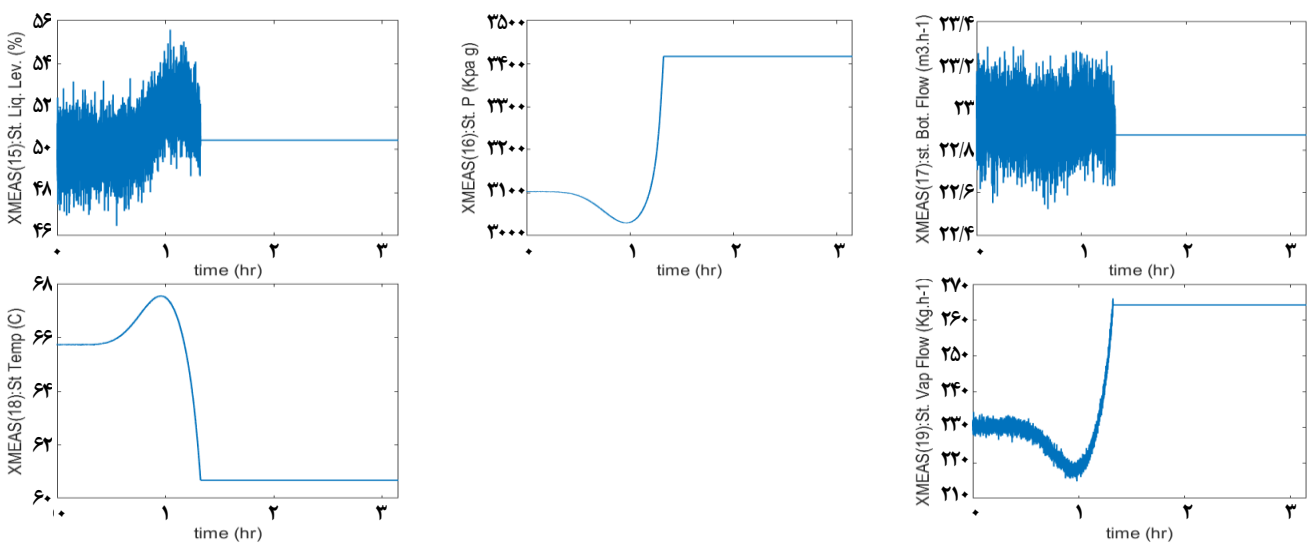




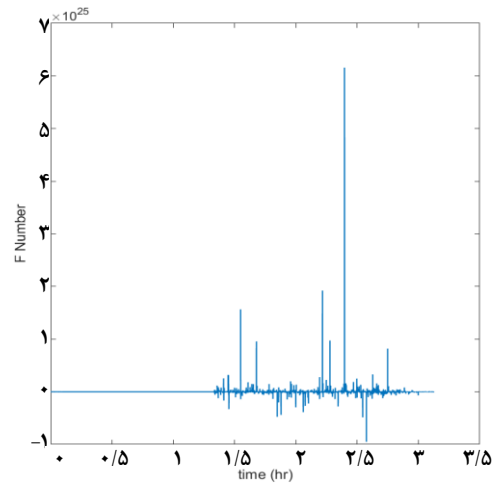
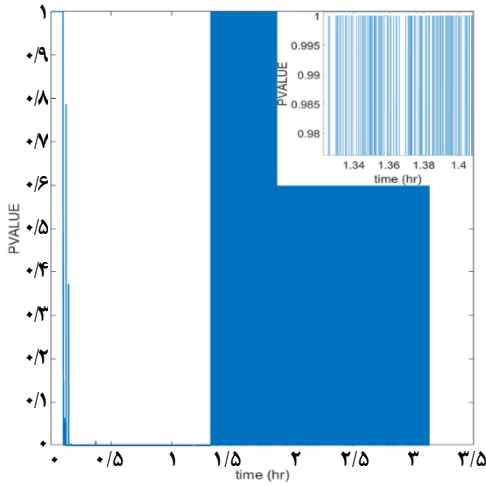
شکل ۸ - خروجی‌های برج عریان‌ساز با خطای ۷



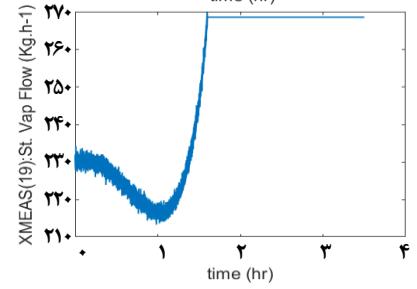
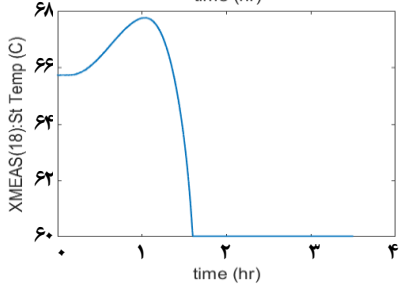
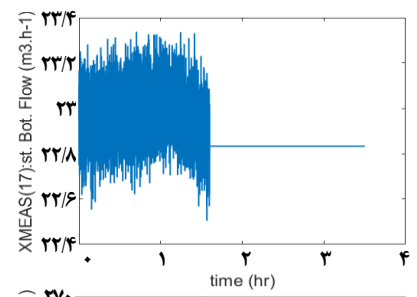
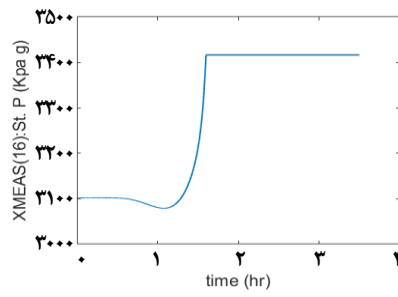
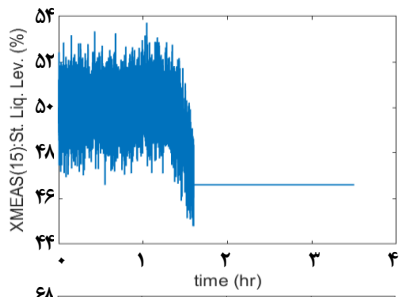
شکل ۹ - خروجی‌های الگوریتم تشخیص خطا برای خطای ۷



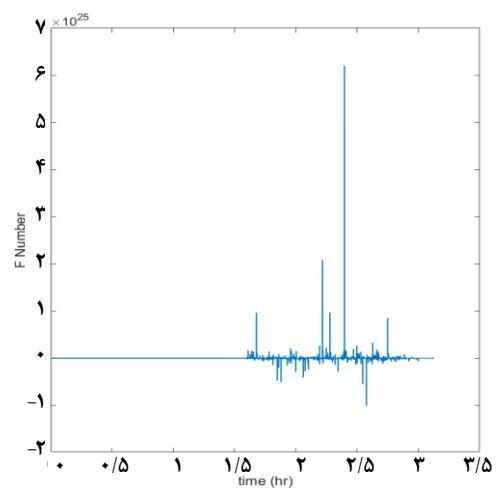
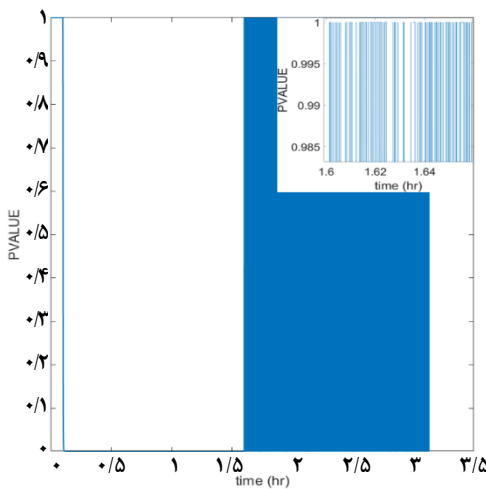
شکل ۱۰ - خروجی‌های برج عریان‌ساز با خطای ۸



شکل ۱۱ - خروجی های الگوریتم تشخیص خطا برای خطای ۸



شکل ۱۲ - خروجی های برج عریان ساز با خطای ۱۰



شکل ۱۳ - خروجی های الگوریتم تشخیص خطا برای خطای ۱۰

جدول ۳ - مقادیر زمان تشخیص وقوع خطا، عدد اف و مقدار پی برای خطاهای مختلف در عریان‌ساز TEP

رتبه زمانی		
خطای ۱	زمان (ثانیه)	۲۰
	مقدار P	۰/۰۲۴۹۹۲
	عدد F	۹/۳۶۶۱۸۱
خطای ۲	زمان (ثانیه)	۱۱
	مقدار P	۰/۰۰۱۶۶۳
	عدد F	۳۹۸/۳۳۳۱
خطای ۷	زمان (ثانیه)	۱۰
	مقدار P	۰/۰۱۱۵۳۶
	عدد F	۱۴۳/۶۷۵۲
خطای ۸	زمان (ثانیه)	۳۷۸
	مقدار P	۰/۰۲۲۸۴۷
	عدد F	۹۸/۵۲۷۵۹
خطای ۱۰	زمان (ثانیه)	۳۸۱
	مقدار P	۰/۰۲۱۹۹
	عدد F	۱۰۰/۶۶۷۹

جدول ۴ - مقایسه نتایج پژوهش با پژوهش تیان و همکاران [۸]

خطا	زمان تشخیص خطا در پژوهش حاضر-مجذور تی هتلینگ (ثانیه)	زمان تشخیص خطا در پژوهش تیان- مدل غیر خطی (ثانیه)	زمان تشخیص خطا در پژوهش تیان- مدل دوگانه (ثانیه)
خطای ۱۰	۳۸۱	۱۱۲۸	۲۸۳
خطای ۷	۱۰	۵۲۹	۲۶۶

این جدول موجود است در مقایسه‌ای که بین عملکرد دو روش ارائه شده در پژوهش تیان انجام شده است، مدل دو گانه از این پژوهش عملکرد به مراتب بهتری نسبت به مدل غیر خطی داشته است. روش مجذور تی هتلینگ اگر چه در شناسایی خطای ۱۰ عملکردی ضعیف‌تری نسبت به مدل دو گانه‌ی تیان و همکاران داشته است اما نسبت به عملکرد مدل غیر خطی به مراتب سریع‌تر داشته است. در تشخیص خطای ۷ نیز عملکرد روش مجذور تی هتلینگ نسبت به هر دو روش پژوهش ذکر شده برتری قابل توجهی دارد. همچنین اجرای روش مجذور تی هتلینگ در مقایسه با هر دو مدل تیان به ویژه مدل دوگانه که در واقع ترکیبی از مدل خطی و غیر خطی است، سهولت اجرای بیشتری دارد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از یکی از مدل‌های معتبر موجود در پژوهش‌های پیشین، برای تشخیص خطا در برج عریان‌ساز فرآیند تنسی ایستمن (TEP) استفاده شده است. TEP یکی از مسائل پرکاربرد در کنترل فرآیند است که تا کنون پژوهش‌های متنوعی روی آن انجام شده است. روش انتخاب شده در این پژوهش به خوبی وقوع دو نوع خطای پله‌ای و تصادفی را تشخیص داده است و در مدت زمانی حداکثر معادل ۳۸۱ ثانیه (۰/۱۰۵ ساعت) می‌تواند علت یا منشا وقوع خطا را شناسایی کند. مقایسه عملکرد این روش با پژوهش مشابه، بهبود سرعت تشخیص خطا را در کنار پیچیدگی کمتر و سهولت استفاده نشان می‌دهد. همچنین روش ارائه شده در این پژوهش به دلیل داشتن استقلال از مدل مورد مطالعه این قابلیت را دارد که برای سامانه‌های پژوهشی دیگر نیز مورد ارزیابی و استفاده قرار گیرد و برای این کار تنها به داده‌های تاریخی عملکرد بدون نقص آن سامانه نیاز دارد.

در صورت رخ دادن خطا ۱۰، برنامه پس از گذشت زمان ۰/۱۰۵۸۳۳ ساعت از شروع فرآیند با مقدار ۰/۰۲۱۹۹=مقدار پی، وقوع خطا را تشخیص می‌دهد. در این مرحله پس از تشخیص وقوع خطا باید تشخیص داده شود، کدامیک از خطاها رخ داده است. برای این منظور از داده‌های تاریخی مسئله استفاده می‌شود. هر یک از خطاهای یا اغتشاش‌های مسئله ماهیتی دارند که بسته به آن تاثیرشان در خروجی به سرعت یا با فاصله‌ی بیشتری نمایان می‌شود. به عنوان مثال خطای ۷ سریع‌ترین پاسخ را در خروجی‌ها دارد، بنابراین در صورت وقوع خطا می‌توان متوجه شد که سریع‌ترین پاسخ خطا در خروجی فرآیند مربوط به اغتشاش ۷ است. این بستگی به تاخیر زمانی و شرایط متغیر مساله ندارد اما به زمان وقوع خطا یا ورود اغتشاش به سامانه دارد. با فرض اینکه همه‌ی اغتشاشات در لحظه‌ی صفر وارد مدل شوند می‌توان با توجه به سرعت پاسخ در خروجی، خطاها را رتبه‌بندی کرد و با توجه به زمان تشخیص خطا در خروجی، تشخیص داد که کدام خطا رخ داده است. این رتبه‌بندی در جدول ۳ آمده است. با توجه به آنچه در مقدمه اشاره شد، یکی از پژوهش‌هایی که بیشترین شباهت را به پژوهش حاضر دارد، کار انجام شده توسط تیان و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۲ است. آن‌ها برای تشخیص خطا در شرایط مشابه از دو روش مدل محور غیر خطی و مدل محور دو گانه استفاده کردند. در جدول ۴ نتایج پژوهش حاضر با پژوهش تیان و همکاران جهت مقایسه آورده شده است. چنان که از اطلاعات

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

## مراجع

- [1] Precup R.-E., Radac M.-B., Roman R.-C., Petriuc E.M., [Model-Free Sliding Mode Control of Nonlinear Systems: Algorithms and Experiments](#), *Information Sciences*, **381**: 176-192 (2017).
- [2] Amin M.T., Khan F., Imtiaz S., [Fault Detection and Pathway Analysis Using a Dynamic Bayesian Network](#), *Chemical Engineering Science*, **195**: 777-790 (2019).
- [3] Mirakhorli E., [Fault Diagnosis in a Distillation Column Using a Support Vector Machine based Classifier](#), *International Journal of Smart Electrical Engineering*, **8(3)**: 105-116 (2019).
- [4] Li C., Zhao D., Mu S., Zhang W., Shi N., Li L., [Fault Diagnosis for Distillation Process based on CNN-DAE](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **27(3)**: 598-604 (2019).
- [5] Taqvi S.A., Tufa L.D., Zabiri H., Maulud A.S., Uddin F., [Fault Detection in Distillation Column Using NARX Neural Network](#), *Neural Computing and Applications*, **32(8)**: 3503-3519 (2020).
- [6] Harkat M.F., Mansouri M., Abodayeh K., Nounou M., Nounou H., [New Sensor Fault Detection and Isolation Strategy-based Interval-Valued Data](#), *Journal of Chemometrics*, **34(5)**: e3222 (2020).
- [7] Ricker N.L., Lee J., [Nonlinear Model Predictive Control of the Tennessee Eastman Challenge Process](#), *Computers & Chemical Engineering*, **19(9)**: 961-981 (1995).
- [8] Tian W., Guo Q., Sun S., [Dynamic Simulation based Fault Detection and Diagnosis for Distillation Column](#), *Korean Journal of Chemical Engineering*, **29(1)**: 9-17 (2012).
- [9] Hotelling H., [The Generalization of Student's Ratio](#), in *Breakthroughs in Statistics*, Springer. 54-65 (1992).
- [10] Kitano K., Kano M., Gopaluni B., [Fault Identification with Modified Reconstruction-based Contribution based on Kernel Principal Component Analysis](#), in *2017 11th Asian Control Conference (ASCC)*, IEEE, (2017).
- [11] Smith A.J., Powell K.M., [Fault Detection on Big Data: A Novel Algorithm for Clustering Big Data to Detect and Diagnose Faults](#), *IFAC-PapersOnLine*, **52(10)**: 328-333 (2019).
- [12] Luo L., Xie L., Su H., Mao F., [A Probabilistic Model with Spike-and-Slab Regularization for Inferential Fault Detection and Isolation of Industrial Processes](#), *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **123**: 65-78 (2021).
- [13] Downs J.J., Vogel E.F., [A Plant-Wide Industrial Process Control Problem](#), *Computers & chemical engineering*, **17(3)**: 245-255 (1993).
- [14] Ricker N.L., [Decentralized Control of the Tennessee Eastman Challenge Process](#), *Journal of process control*, **6(4)**: 205-221 (1996).
- [15] Kent J., Bibby J., Mardia K., "[Multivariate analysis](#)", Academic Press, Amsterdam, (1979).