

ارایه یک سیستم اتوماتیک برای مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات

فاطمه زاجکانیها، محمود رضا پیشوایی و داوود رشتچیان*⁺

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، صندوق پستی ۹۴۶۵-۱۱۳۶۵

چکیده: امروزه مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات، *HAZard and Operability Study*، به عنوان یک روش استاندارد مؤثر و گسترده‌ای در جهت تضمین ایمنی فرایندها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با بررسی سیستماتیک نمودارهای لوله‌کشی و ابزار دقیق واحد، هرگونه انحراف قابل تصور متغیرهای فرایندی از شرایط نرمال، دلایل و عواقب نامطلوب آنها را شناسایی می‌کند. مطالعه *HAZOP* روشی پرزحمت، وقتگیر و پرهزینه است. یک سیستم اتوماتیک میتواند هزینه‌ها و کوششهای لازم را کاهش داده، در وقت صرفه‌جویی کرده و مطالعه را دقیقتر و با جزئیات کاملتری انجام دهد. در راستای تحقق این هدف، سعی شده است یک سیستم اتوماتیک مطالعه مخاطره‌ها طراحی و ارایه شود. سیستم خبره ارایه شده تحت عنوان *HAZOPEN* شامل چهار بخش دانش ویژه فرایندی، دانش عمومی فرایندی، ماشین استنباط و واسط کاربر است. در این مقاله جنبه‌های مهم سیستم خبره *HAZOPEN* برای دو نمونه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم خبره *HAZOPEN* با ساختاری شیء‌گرا طراحی و در محیط نرم افزاری *۵-Builder C++* توسعه یافته است.

واژه‌های کلیدی: ایمنی فرایندها، مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات، سیستم خبره، اتوماسیون.

KEY WORDS: Process safety, HAZard and Operability study (HAZOP), Expert systems, Automation.

مقدمه

انسانی، نه تنها باعث تکرار حوادث، بلکه موجب افزایش خسارات ناشی از حوادث نیز شده است [۴ و ۵]. برخی مواقع این خسارت‌ها سنگین و جبران ناپذیرند. از جمله حوادث خسارت‌بار می‌توان به حادثه مصیبت‌بار بوپال^(۱) هند اشاره کرد که بیش از ۲۰۰۰۰ نفر کشته و زخمی به جا گذاشته است [۶].

نخستین قدم در ایجاد و حفظ ایمنی فرایندها، تعیین و شناسایی مخاطرات بالقوه‌ای است که واحدها را تهدید میکنند. در این راستا روشهای متفاوتی از قبیل بازنگری ایمنی^(۲)، تجزیه فهرست

امروزه ایمنی فرایندها، سلامت محیط کار و جنبه‌های زیست محیطی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و از امور اولویتدار صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی به شمار میرود تا پاسخگوی نگرانیها و توجهات عمومی به حوادث زیانبار باشد. از آنجایی که صنایع فرایندی به دلیل سروکار داشتن با مواد شیمیایی خطرزا و واحدهای عملیاتی تحت شرایط فشار و دمای بالا نظیر راکتورها و تانکهای ذخیره، به طور بالقوه در معرض حوادث مخرب قرار دارند، اهمیت این امور مشخص میشود [۳-۱]. رشد صنایع در کنار رشد جمعیت

*عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: rashedchian@sharif.edu

(۱) Bhopal

(۲) Safety Review

جدول ۱- کلمه‌های راهنما و مفهوم فیزیکی آنها، پارامترها و انحرافات.

Guide Word	Meaning	Parameter	Deviation
No	Negation intention	Flow	No Flow
Less	Quantitative decrease	Flow	Less Flow
More	Quantitative increase	Flow	More Flow
Low	Quantitative decrease	Level Temperature Pressure	Low Level Low Temperature Low Pressure
High	Quantitative increase	Level Temperature Pressure	High Level High Temperature High Pressure
As Well As	Qualitative Increase	Flow	Leak

راهنمای متداول واحدها و ترکیب منطقی آنها را نشان می‌دهد. - دلایل: گروه HAZOP پس از تعیین گره مورد نظر، انحرافات متناسب با آنها را به ترتیب اهمیت به کار برده، دلایل بالقوه انحرافات را تعیین کرده، گزارش میکنند. دلایل انحرافات را میتوان به سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: خطای انسانی، نقص تجهیزات و حوادث خارجی.

- عواقب: نقش مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات در واقع تعیین نتیجه‌ها و عواقب بالقوه انحرافات مورد بررسی است. این عواقب با توجه به محدودیت اطلاعات در دسترس و میزان تجربه و تخصص گروه، تشخیص داده می‌شوند. شکل ۱ فلوجارت روش HAZOP را نشان می‌دهد.

تفکر استفاده از سیستم‌های اتوماتیک HAZOP

جنبه‌های متفاوتی در ایجاد تفکر مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات سهیم بوده‌اند. برخی از این عوامل شامل نقاط ضعف روش مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات هستند و برخی نیز ویژگی‌های مثبت این روش را دربرمیگیرند. به‌طور کلی این عوامل عبارت‌اند از [۲ و ۳]:

- به منظور اجرای موفق روش، لازم است که گروهی متشکل از شش نفر یا تعداد بیشتری از متخصصین در زمینه‌های متفاوت مهندسی به طور سیستماتیک نمودارهای لوله‌کشی و ابزار دقیق فرایند را با توجه به شرایط فرایندی و عوامل انسانی بررسی کنند. این گروه باید موقعیت‌های متفاوت و ترکیب انحرافات متفاوتی که ممکن است در طی عملیات واحد رخ دهند

جامع^(۱)، تجزیه و تحلیل مقدماتی خطر^(۲)، تجزیه پرسش^(۳)، مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات^(۴) (HAZOP) و ... توسعه یافته‌اند [۷].

از میان روشهای متفاوت شناسایی مخاطرات، مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات به عنوان یک روش سیستماتیک و استاندارد مؤثر و گسترده‌ای در راستای تضمین ایمنی فرایندها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش افزون بر شناسایی خطرات بالقوه، میتواند مشکلات عملیاتی را نیز که باعث کاهش بازده فرایند میشوند، مشخص کند.

فن HAZOP، اوایل دهه ۱۹۷۰ در شرکت ICI^(۵) واقع در بریتانیا به کار برده شد. اساس مطالعه HAZOP بر پایه مخاطراتی است که به دلیل انحرافات متغیرهای فرایندی از شرایط عادی در واحد عملیاتی مورد ملاحظه ایجاد میشوند. در این روش نمودارهای لوله‌کشی و ابزار دقیق واحد به طور سیستماتیک توسط گروهی از متخصصین با تجربه در رشته‌های متفاوت مهندسی شامل فرایند، نگهداری، کنترل و ابزار دقیق بررسی شده، دلایل غیرعادی و عواقب نامطلوب تمامی انحرافات ممکن متغیرهای فرایندی واحد مورد مطالعه تعیین میشوند. گروه HAZOP برای استفاده از ساختار سیستماتیک این روش در جهت تعیین کلیه عملکردهای نادرست واحد از مفاهیم کاربردی مختص HAZOP بهره گرفته و الگوریتم ارائه شده را به کار می‌برند [۲]. مفاهیم کاربردی روش HAZOP عبارت‌اند از [۸ و ۹]:

- گره: قبل از شروع مطالعه، هر واحد فرایندی به طور متناسب به اندازه‌های کوچکتری تقسیم می‌شود که گره نام دارند. هر گره شامل خطوط فرایندی و تجهیزات به کار رفته است. - پارامترها: پارامترها در واقع همان متغیرهای فرایندی هستند که متناسب با گره مورد نظر به کار می‌روند. پارامترهایی که به‌طور معمول برای همه گره‌ها به کار می‌روند عبارت‌اند از: جریان، فشار و دما. پارامترهای دیگری نیز از قبیل سطح، ترکیب مواد شیمیایی با توجه به گره مورد نظر و تجهیزات به کار رفته، ممکن است لازم باشند.

- کلمه‌های راهنما: شامل کلماتی از قبیل No، Less و More هستند که تغییرهای کمی پارامترها را نشان می‌دهند.

- انحراف: از ترکیب یک پارامتر و کلمه راهنمای متناسب با آن تشکیل میشود. ترکیب ایجاد شده باید به گونه‌ای باشد که انحراف تشکیل‌شده با معنی باشد. جدول ۱، پارامترها و کلمه‌های

(۱) Check-List Analysis

(۳) What-If Analysis

(۵) Imperial chemical Industry

(۲) Preliminary Hazard

(۴) Hazard and Operability Study (HAZOP)

همچنین عواقب ناخوشایند این انحرافات را تعیین کند.
 - به منظور تعیین صحت و درستی مطالعه همان طور که در قسمت قبل اشاره شد گروه مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات باید گروهی متشکل از متخصصین در زمینه‌های متفاوت طراحی، عملیاتی و جنبه‌های نگهداری واحد فرایندی باشد.
 متخصصین باید به اندازه کافی با تجربه باشند تا بتوانند تمامی راههای ممکن ایجاد خطر و مشکلات عملیاتی واحد فرایندی را پیشبینی کنند.

بنابراین، با توجه به آنچه در بالا ذکر شد مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات به دلیل نیاز به نیروی انسانی قابل توجه و صرف زمان قابل ملاحظه روشی هزینه‌بر و وقت‌گیر است. از آنجایی که مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات پیش‌نیازی برای سایر مراحل تشخیص مخاطرات و جلوگیری از خسارات محسوب میشود، توافق روی دقت این روش ایمن به نظر نمیرسد. به عبارت دیگر کاهش هزینه‌ها با عدم جامعیت مطالعه، خطرناک خواهد بود. برخی محدودیتهای دیگر این روش عبارت‌اند از:

- عدم دسترسی به متخصصین با تجربه: برخی مواقع با وجود آنکه شرکتی حاضر است تمام هزینه‌های مربوط را بپردازد و امکانات لازم را فراهم آورد، ممکن است افراد متخصص مورد نیاز که مهارت و تجربه کافی داشته باشند در دسترس نباشند.

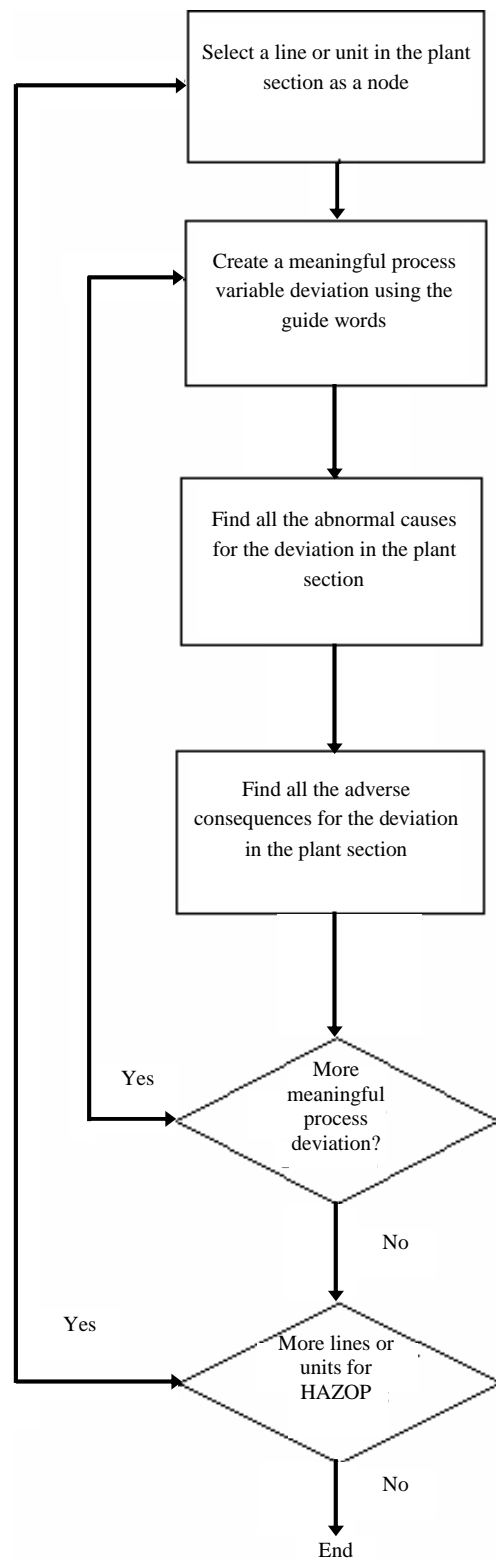
- تکرار پذیری روش: تعداد زیادی از انحرافات محتمل از شرایط نرمال، از جمله عوامل رایجی هستند که گروه باید مورد ملاحظه قرار داده و هر یک را مطالعه کند. این جنبه از مطالعه به نسبت خسته کننده است. از طرفی گروه نمیتواند از تعداد قابل توجهی علل رایج چشمپوشی کند، زیرا هر یک از آنها پتانسیل ایجاد حادثه را دارند.

در کنار نقاط ضعف مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات، جنبه‌های مثبتی نیز وجود دارند که تفکر استفاده از مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات را تقویت میکند. این جنبه‌ها عبارت‌اند از:

- ساختار سیستماتیک و منطقی مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات، میتواند الگوریتمی را برای اتوماتیک‌کردن روش، پیشنهاد کند.

- رشد روزافزون و توسعه سیستمهای نرم‌افزاری همراه با گسترش کاربرد آنها در رشته‌های متفاوت فنی و مهندسی، نویدبخش راهی برای استفاده از این سیستمها برای مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات میباشد [۱۰ و ۱۱].

با ملاحظه عوامل و جنبه‌های متفاوت ذکر شده، این نتیجه



شکل ۱- فلوجارت روش HAZOP.

تقلید و مدلسازی تخصص بشری طراحی میشود. این سیستم در واقع شاخه‌های از هوش مصنوعی است و با استفاده از یک محیط تعاملی دانش تخصصی مورد نیاز کاربر را فراهم میکند [۱۷]. سیستم خبره به طور اصولی از بانک دانش^(۱)، ماشین استنباط^(۲) و اطلاعات ویژه^(۳) به همراه برخی انواع واسط کاربر^(۴) که به ماشین استنباط ملحق میشوند، تشکیل شده است. شکل ۲ ارتباط این موردها را نشان میدهد.

بانک دانش مجموعه منظمی از واقعیتهای مشروح و قانون‌های مربوط به موضوع مورد بررسی را شامل میشود. بیشتر سیستم‌های خبره موجود، دارای بانک دانش ثابت هستند به طوری که کاربر نمیتواند به صورت پویا اطلاعات آنها را تغییر و یا بسط دهد.

ماشین استنباط با ملاحظه اطلاعات بانک دانش و اطلاعات ویژه، قانون‌ها و وقایعی را نتیجه میگیرد. در واقع ماشین استنباط از سطحی بالاتر، چگونگی ترتیب دانش موجود را بررسی کرده و از آنها برای حل مسأله بهره میگیرد.

وظیفه واسط کاربر برقراری ارتباط ساده و راحت بین کاربر و نرم افزار است. به طوری که پرسش و پاسخ بین کاربر و نرم افزار از راه زبانی که به کاربر نزدیکتر است، صورت میگیرد.

همانطور که اشاره شد، سیستم‌های خبره متفاوتی برای مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات ارائه شده‌اند. تمامی این سیستم‌های خبره یک وجه مشترک دارند. این وجه مشترک عبارت است از:

استفاده از بانک‌های دانش و ماشین استنباط، همچنین برقراری ارتباط با سیستم خبره از راه یک واسط کاربر بهطوری که با توجه به شرایط مورد نظر کاربر، به تحلیل پرداخته، نتیجه را به عنوان مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات ارائه کند. وجه تمایز سیستم‌های خبره را میتوان در موارد زیر خلاصه کرد:

نحوه معماری سیستم خبره، ساختار بانک دانش ارائه شده، الگوریتم به کار رفته در ایجاد ماشین استنباط، طراحی واسط کاربر و نحوه برقراری ارتباط کاربر با سیستم و میزان امکانات و نتیجه‌هایی که سیستم می‌تواند ارائه دهد.

بیشتر سیستم‌های خبره موفق ارائه شده برای مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات در محیط نرم افزاری G_۲ و با استفاده از ساختار شیء‌گرا توسعه یافته‌اند. برخی از ویژگیهای ساختار

حاصل میشود که اگر مطالعه مخاطرات واحدهای عملیاتی متداول و رایج به طور اتوماتیک انجام شود، به میزان قابل توجهی از حجم کاری متخصصین کاسته شده و زمان بیشتری در اختیار خواهند داشت تا روی مطالعه مخاطرات تجهیزات فرایندی پیچیده‌تر که قابلیت خودکار شدن را ندارند، متمرکز شوند [۸].

اقدامات انجام شده برای مطالعه اتوماتیک مخاطرات

هر چند که متخصصین به لزوم اتوماتیک کردن مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات پی برده‌اند و تحقیقات قابل ملاحظه‌ای نیز در این زمینه صورت گرفته است [۱۴-۱۲]، اما سیستم‌های ارائه‌شده کارایی محدودی داشته و حتی موفقیت‌های کسب شده، اندک بوده است [۳].

از آن جمله می‌توان به تلاش‌های Poucet و Suokas (۱۹۹۲)، Suzuki و Shimada (۱۹۹۵)، Venkatasubramanian و Preston (۱۹۹۶) اشاره کرد [۱۵ و ۱۶].

در این زمینه سیستم‌های خبره HAZOPEXpert ارائه شده توسط Vaidhyathan و Venkatasubramanian (۱۹۹۴)، EXPERTOP ارائه شده توسط S.A. Abbasi و Faisal I. Khan (۲۰۰۰)، نتیجه‌های قابل قبولی ارائه کرده‌اند [۳ و ۸]. تمامی روش‌های به کار رفته به طور مشخص در یکی از دو گروه زیر جای می‌گیرند [۱۵]:

- سیستم‌های خبره: به طور معمول از بانک‌های دانش و ماشین‌های استنباط قراردادی برای رسیدن به حل قابل قبول استفاده میکنند.

- سیستم‌های مبتنی بر مدل: رفتار واحدهای فرایندی را در قالب مدل شرح میدهند و روی بررسی این مدل متمرکز میشوند. به عنوان مثال، یک واحد را به صورت یک سیستم معادله‌های دیفرانسیل معرفی میکنند.

سیستم‌های مبتنی بر مدل از سیستم‌های خبره دقیقتر و در گستره وسیعتری قابل کاربرد هستند، اما از آنجایی که این مدل‌ها اغلب مبهم و ایجاد آنها مشکل است، سیستم‌های خبره ترجیح داده میشوند.

سیستم خبره

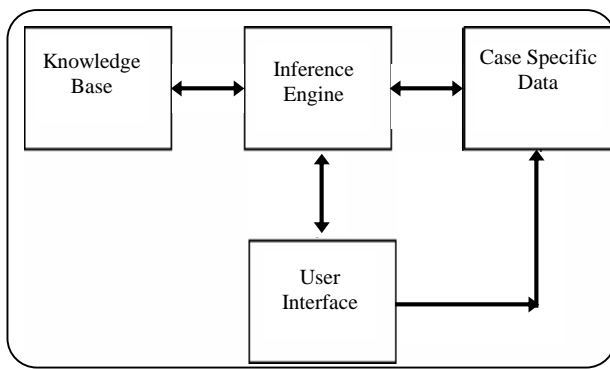
به طور کلی سیستم خبره، یک بسته نرم‌افزاری است که برای

(۱) Knowledge-base

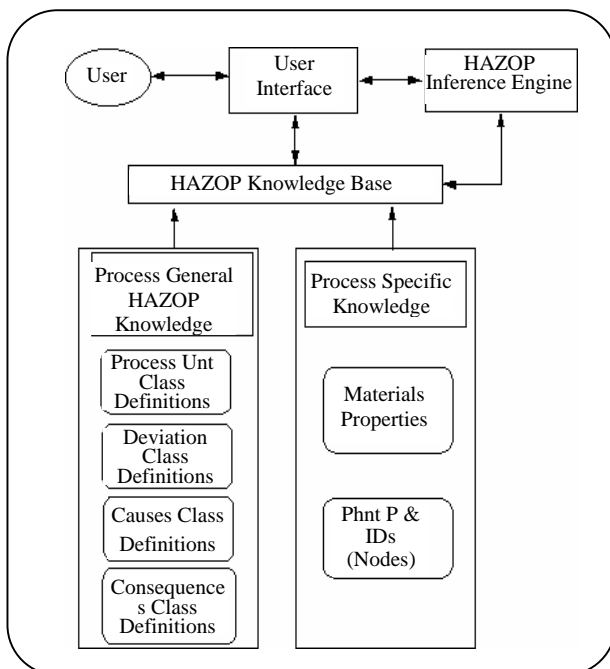
(۲) Inference Engine

(۳) Specific Knowledge

(۴) User Interface



شکل ۲- ساختار بنیادین سیستم خبره.



شکل ۳- معماری سیستم خبره HAZOPEN.

در سمت پوسته و فشار بیشتر از سمت لوله، مبدل حرارتی با جریان سیال گرم در سمت لوله و فشار بیشتر از سمت پوسته، مبدل حرارتی با جریان سیال گرم در سمت پوسته و فشار بیشتر از سمت لوله، پمپ سانتریفوژ، پمپ جابه‌جایی مثبت، کمپرسور سانتریفوژ، کمپرسور جابه‌جایی مثبت، تانک ذخیره، تانک ته‌نشینی و شیر کنترل.

کاربر با استفاده از واسط کاربر، مقدارهای این مشخصات را برای گره‌های مورد مطالعه مشخص میکند.

شیء‌گرا، کارایی سیستم خبره را افزایش میدهد. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از [۱۰]:

کیفیت، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و اصلاح پذیری.

ارایه سیستم خبره HAZOPEN^(۱)

با توجه به مزایای استفاده از سیستم‌های خبره در مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات، سیستم خبره HAZOPEN با ساختاری شیء‌گرا و در محیط نرم افزاری ۵ C++ Builder توسعه داده شد. معماری این سیستم خبره در شکل ۳ آمده است. این سیستم شامل بخش‌های دانش ویژه فرایندی، دانش عمومی فرایندی، ماشین استنباط و واسط کاربر است.

دانش ویژه فرایندی

شامل اطلاعات یک فرایند ویژه بوده و از فرایندی به فرایند دیگر متفاوت است. این اطلاعات که توسط کاربر فراهم می شود، شامل موارد زیر است:

- مواد شیمیایی حاضر در فرایند: دلیل اصلی اهمیت ایمنی فرایندهای شیمیایی را میتوان در مواد شیمیایی خطرناک موجود در فرایند یافت. این مواد در شرایط ویژه، قادر به ایجاد حوادث جدی هستند. لذا نقش تعیینکننده آنها باید در مطالعه مخاطرات لحاظ شود [۱۸].

- هر ماده شیمیایی در سیستم خبره HAZOPEN، به صورت شیء از کلاس مواد فرایندی ایجاد میشود.

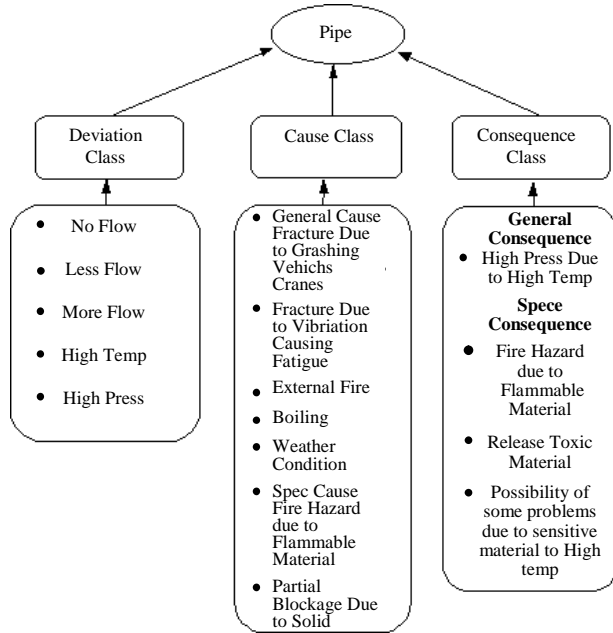
این کلاس دارای ویژگی‌های نام ماده شیمیایی، نقش ماده در فرایند، حالت فیزیکی و خصوصیت خطرزای ماده است.

- تعیین گره‌های موجود در فرایند: این گره‌ها در واقع همان تجهیزات موجود در فرایند هستند که با استفاده از نمودارهای لوله‌کشی و ابزار دقیق واحد فرایندی مورد ملاحظه، تعیین میشوند. هر گره یک شیء نمونه از کلاس گره است. این کلاس مشخصات نام گره، نوع گره، شرایط دلخواه طراحی گره، شرح عملیات گره و فهرستی از مواد شیمیایی حاضر در گره را در بر میگیرد. نوع گره موردهای زیر را شامل میشود:

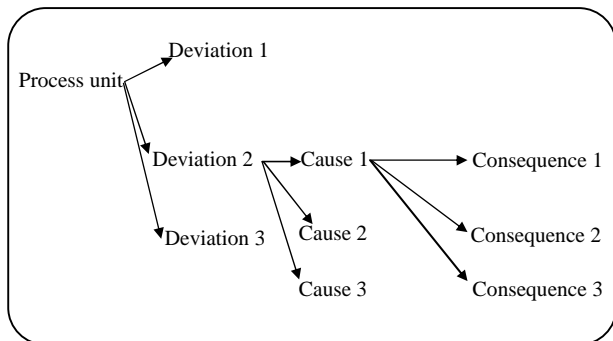
خط لوله، مبدل حرارتی با جریان سیال سرد در سمت لوله و فشار بیشتر از سمت پوسته، مبدل حرارتی با جریان سیال سرد

(۱) HAZOPENcode

دانش عمومی فرایند



شکل ۴- بخشی از مدل عمومی مخاطرات خط لوله.



شکل ۵- ارتباط بین بخشهای متفاوت دانش عمومی.

گزارش میکند. این نتیجه‌ها بستگی به علل ایجاد انحراف داشته و به تبعیت از علت، متفاوت است. به عنوان مثال، اگر علت انحراف "No Flow" در لوله، پاره شدن در اثر ساییدگی لوله باشد، آلودگی محیط به مواد فرایندی را نتیجه می‌دهد. حال اگر بسته شدن لوله به دلیل وجود مواد جامد، علت قطع جریان باشد، ممکن است فقط افزایش فشار لوله به عنوان نتیجه گزارش شود. کلاس نتیجه انحراف‌های متغیرهای فرایندی دارای ویژگی پیامد انحراف متغیر فرایندی است که با توجه به انحراف متغیر فرایندی واحد عملیاتی و علت ایجاد آن، تعیین و به عنوان بخش دیگری از دانش عمومی سیستم خبره ذخیره می‌شود.

دانش عمومی ۱۲ واحد عملیاتی ذکر شده با استفاده از منابع

شامل مدل‌های عمومی مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات است. این اطلاعات مستقل از هر فرایند مورد ملاحظه، به طور ثابت و تغییر ناپذیر با ساختاری شیءگرا کدنویسی می‌شود. دانش عمومی فرایندی متشکل از کلاسهای زیر است:

۱- کلاس انحرافات متغیرهای فرایندی: چگونگی انحراف یک متغیر فرایندی به نوع واحد عملیاتی مورد مطالعه و متغیر فرایندی مورد ملاحظه در آن بستگی دارد. کلاس انحرافات متغیرهای فرایندی دارای مشخصات کلمه راهنما، متغیر فرایندی و انحراف است. این مشخصات برای ۱۲ نوع واحد عملیاتی که در بخش تعیین گرهای موجود در فرایند ذکر شده، با توجه به انحرافات متداول آن تجهیزات، مقداری شده و به عنوان بخشی از دانش عمومی سیستم خبره نگه‌داری می‌شود.

۲- کلاس دلایل انحرافات متغیرهای فرایندی: یکی از اهداف مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات تعیین علل بالقوه انحرافات احتمالی متغیرهای فرایندی در واحدهای عملیاتی یا به عبارتی گره مورد ملاحظه است. برخی از این دلایل عمومی بوده و برای استفاده از گره مورد نظر در فرایندهای متفاوت مشترک است. در حالی که برخی دیگر خاص بوده و با توجه به فرایند و شرایط ویژه مورد مطالعه تعیین می‌شوند. به عنوان مثال، انحراف "No Flow" در لوله ممکن است در اثر ساییدگی لوله و در نتیجه پاره شدن آن ایجاد شود. این عامل ممکن است در فرایندهای متفاوت ایجاد شود. بنابراین، به عنوان یک دلیل عمومی محسوب می‌شود. حال اگر جسم جامدی در جریان سیال داخل لوله وجود داشته باشد، ممکن است باعث بسته شدن لوله و در نتیجه قطع جریان شود. این علت بستگی به شرایط ویژه فرایند و مشخصات مواد فرایندی دارد. بنابراین، این دلیل در گروه دلایل ویژه طبقه‌بندی می‌شود.

کلاس دلایل انحرافات متغیرهای فرایندی دارای مشخصات گره مورد نظر، انحراف متغیر فرایندی مخصوص گره، دلایل ویژه و عمومی ایجاد انحرافات متغیرهای فرایندی است. دلایل انحرافات متغیرهای فرایندی با ملاحظه واحدهای عملیاتی و انحرافات خاصشان مقداری شده و در بخش دانش عمومی سیستم خبره قرار می‌گیرد.

۳- کلاس نتیجه‌های انحرافات متغیرهای فرایندی: روش مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات پس از تعیین دلایل بالقوه ایجاد انحرافات متغیرهای فرایندی در واحدهای عملیاتی، نتیجه‌ها و عواقب ناخوشایند و در برخی موردها زیانبار انحرافات را نیز

موجود [۲۱-۱۹] تهیه و در کلاسهای مربوط کدنویسی شد. شکل ۴ بخشی از مدل عمومی مخاطرات خط لوله را نشان میدهد. شکل ۵ ارتباط بین بخشهای متفاوت دانش عمومی را نشان میدهد.

مکانیسم ماشین استنباط سیستم خبره HAZOPEN

این مکانیسم با برقراری ارتباط بین دانش ویژه فرایندی و دانش عمومی سیستم خبره، نتیجه‌های مطالعه مخاطرات و راهبردی عملیات را استخراج کرده و گزارش میدهد.

فلوچارت ماشین استنباط این سیستم خبره در شکل ۶ آمده است. شرح الگوریتم به قرار زیر است:

۱- بررسی با تشکیل سیستمی از مواد شیمیایی و فهرست گره‌های مورد نظر مطابق با دیاگرام لوله‌کشی و ابزار دقیق واحد شروع میشود. این موارد توسط کاربر و از طریق واسط کاربر تعیین میشود.

۲- کاربر یک گره را از فهرست گره‌های موجود و یک انحراف متغیر فرایندی را از فهرست انحرافات متغیرهای فرایندی مخصوص آن گره انتخاب میکند.

۳- گره مسبب ایجاد انحراف در گره مورد نظر و انحراف متناسب با آن انتخاب، سپس فهرست دلایل انحراف مقداره‌ی میشود. با انتخاب گره مسبب میتوان تأثیر گره‌های متفاوت را بررسی و عمل توزیع انحراف مورد نظر بین گره‌های متفاوت را برای استخراج تمامی دلایل انحراف انجام داد.

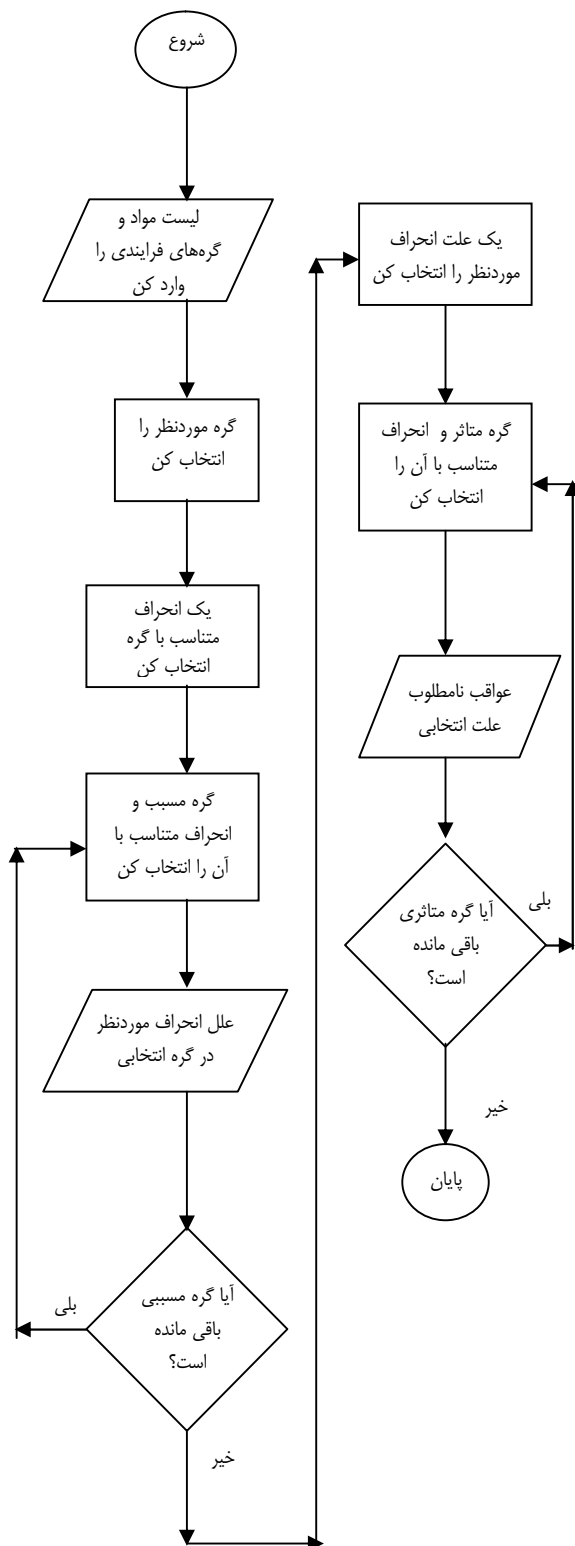
۴- انتخاب یک علت از فهرست دلایل انحراف متغیر فرایندی گره مورد نظر، همچنین تعیین گره متأثر از این انحراف و انحراف ایجاد شده در آن. با انتخاب گره متأثر، برهم‌کنش و تأثیرپذیری گره‌های متفاوت بررسی و در واقع عمل توزیع انحراف مورد نظر بین گره‌های متفاوت برای تعیین تمام عواقب احتمالی انحراف انجام میشود.

۵- مقدردهی فهرست نتیجه‌های انحراف.

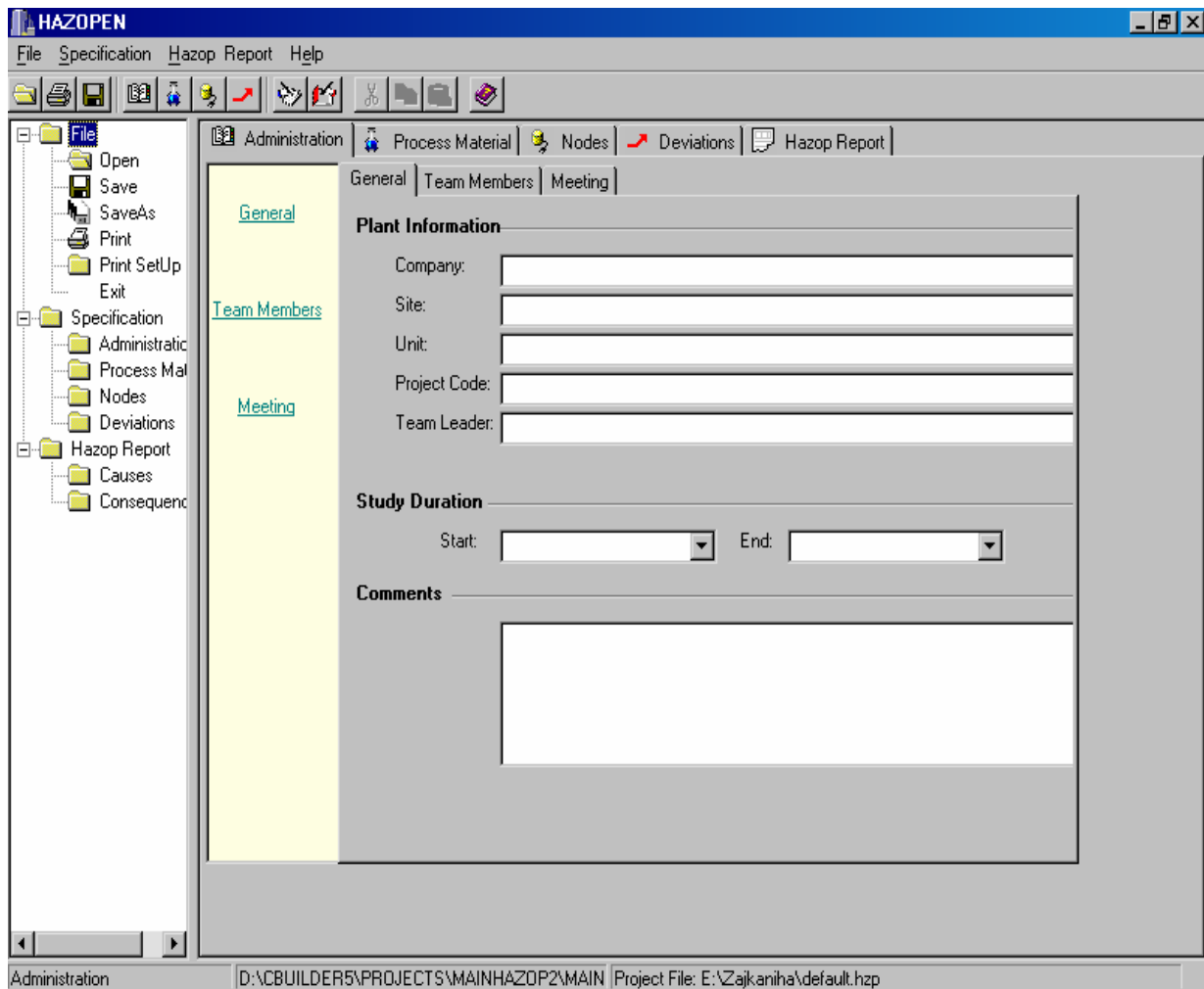
واسط کاربر

طراحی واسط کاربر باید به گونهای باشد که کاربر بتواند به راحتی با آن ارتباط برقرار کرده، مراحل متفاوت اجرای سیستم نرم‌افزاری را به انجام رساند و در یک عبارت کاربر دوست باشد.

سیستم خبره HAZOPEN در محیط نرم افزاری C++ Builder ۵ توسعه داده شد. همچنین سعی شد طراحی واسط کاربر تا حد امکان مأنوس با کاربر باشد. همچنین میتوان از بخش راهنمای این سیستم



شکل ۶- فلوچارت ماشین استنباط HAZOPEN.



شکل ۷- واسط کاربر طراحی شده سیستم خبره HAZOPEN.

برای چگونگی اجرای قسمت‌های متفاوت آن استفاده کرد. شکل ۷ واسط کاربر طراحی شده HAZOPEN را نشان می‌دهد.

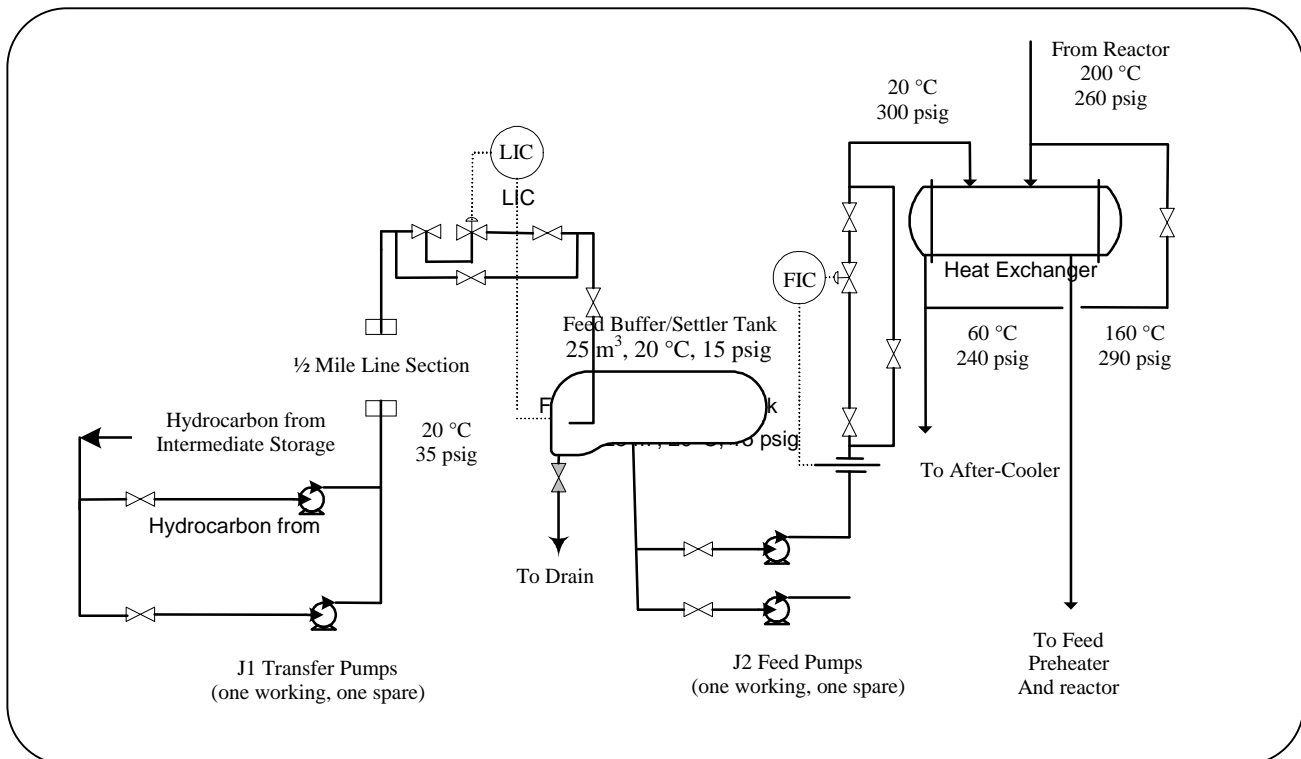
مطالعه موردی (۱)

دیمر شدن اولفین

سیستم خبره HAZOPEN برای مطالعه مخاطرات بخش خوراک واحد دیمر شدن اولفین به کار برده شد. یک مخلوط معلق آلکان- آلکن و آب، از یک تانک ذخیره و از طریق یک خط لوله به طول یک کیلومتر، به طور پیوسته به یک تانک ته‌نشینی، پمپ می‌شود. در این تانک، مخلوط مدتی باقی می‌ماند تا آب موجود در آن ته‌نشین شود. سپس از یک مبدل و یک پیش‌گرم‌کن عبور کرده، به بخش واکنش منتقل می‌شود. نمودار جریان این فرایند

در شکل ۸ آمده است [۲۲].

آب روی واکنش دیمر شدن تأثیر نامطلوب می‌گذارد، از این رو در تانک ته‌نشینی جدا شده و در فاصله‌های زمانی متفاوت، به طور دستی خارج می‌شود. همچنین مخلوط آلکان- آلکن به افزایش دما حساس بوده و ممکن است در اثر افزایش دما واکنش ناخواسته پلیمری شدن صورت گیرد. محصول دیمر شده نیز قابل اشتعال است. نتیجه‌های این سیستم با نتیجه‌های حاصل از مطالعه سنتی فرایند قابل مقایسه است. نتیجه‌های به‌دست آمده از این سیستم خبره تمام دلایل و عواقب مطالعه سنتی مخاطرات را تحت پوشش قرار می‌دهد. از طرفی این سیستم موارد بیشتری را ذکر کرده، مطالعه را دقیقتر و کاملتر انجام می‌دهد. همچنین زمان انجام مطالعه به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۸ - نمودار جریان بخش خوراک واحد دیمر شدن اولفین.

۴- انتخاب گره مسبب: خط انتقال به عنوان گره‌های که میتواند انحراف "Low Level" را در تانک ته‌نشینی ایجاد کند، انتخاب میشود.

۵- تعیین انحراف گره مسبب: انحراف "No Flow" گره مسبب میتواند باعث "Low Level" در تانک ته‌نشینی شود.

۶- در اینجا دلایل انحراف مشخص‌شده گره انتخابی به‌وسیله‌ی سیستم خبره HAZOPEN گزارش میشود. این دلایل عبارت‌اند از:
- پاره شدن خط لوله به دلیل خوردگی (وجود ماده خورنده، آب).

- پاره شدن خط لوله به دلیل ساییدگی.

- پاره شدن خط لوله به دلیل عبور وسایل نقلیه.

- پاره شدن خط لوله به دلیل اشکال‌هایی که موقع نصب ایجاد شده و مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

- پاره شدن خط لوله به دلیل ارتعاش شدید.

۷- انتخاب یک علت گزارش‌شده، برای تعیین عواقب مخصوص آن: پاره شدن لوله در اثر خوردگی به عنوان یک علت انتخاب میشود.

۸- انتخاب گره متأثر: مبدل حرارتی به عنوان گره‌های که

در اینجا مراحل اجرای سیستم خبره HAZOPEN برای تانک ته‌نشینی به عنوان گره حایز اهمیت این بخش آورده میشود:

۱- مواد شیمیایی و گره‌های مورد ملاحظه فرایند، توسط کاربر مشخص میشوند.

مواد شیمیایی موجود در فرایند شامل آب به عنوان ناخالصی، آلکان و آلکن واکنش‌گر و اولفین به عنوان فرآورده دیمر شدن هستند.

گره‌های مورد ملاحظه این بخش عبارت‌اند از: تانک ذخیره، پمپ‌های سانتریفوژ J_۱، خط انتقال خوراک از تانک ذخیره به تانک ته‌نشینی، شیر کنترل LCV، تانک ته‌نشینی، پمپ‌های سانتریفوژ J_۲، شیر کنترل FCV، مبدل حرارتی با جریان سیال سرد در سمت پوسته و فشار بیشتر از سمت لوله.

۲- انتخاب گره مورد مطالعه: تانک ته‌نشینی به عنوان گره مورد مطالعه انتخاب میشود.

۳- انتخاب انحراف متغیر فرایندی قابل توجه در گره انتخابی: در اینجا انحراف "Low Level" به عنوان انحراف قابل ملاحظه انتخاب و بررسی میشود.

Deviation Of Cause Node	Cause Node	Relevant General Causes	Relev
No Flow	1 Km Line Section	1.1 Km Line Section Fracture Due to Erosion	1.1 Km
No Flow	1 Km Line Section	2.1 Km Line Section Fracture Due to Crashing Vehicles,Cranes	
No Flow	1 Km Line Section	3.1 Km Line Section Fracture Due to Overstressing	
No Flow	1 Km Line Section	4.1 Km Line Section Fracture Due to Damage Occurring during installation (
No Flow	1 Km Line Section	5.1 Km Line Section Fracture Due to Explosion or Overpressure,Both Intern	
No Flow	1 Km Line Section	6.1 Km Line Section Fracture Due to Vibration Causing Fatigue	
No Flow	1 Km Line Section	7.1 Km Line Section Fracture Due to Very High Temperature Pipe Work,Cre	

شکل ۹- دلایل گزارش شده به وسیله سیستم خبره HAZOPEN برای گره تانک ته نشینی.

ته نشینی را با مطالعه سنتی مخاطرات این گره مقایسه میکند.

مطالعه موردی (۲)

واحد مرکابتانزدایی بوتان

بوتان از یک مخزن خوراک در فشار ۱۴ bara و دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد به وسیله پمپ A/B ۱۰-۸۳۱ E به مبدل حرارتی ۸-۸۳۱ G، پمپ میشود. جریان بوتان پس از رسیدن به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به قسمت پایین برج استخراج بوتان، شامل مرکابتان‌ها، کربونیل سولفید و کربن دی سولفید به وسیله محلول ۱۵ درصد کاستیک، در دمای حدود ۶۲-۵۸ درجه سانتی‌گراد شسته میشود. سپس جریان بوتان عاری از مرکابتان از بالای برج استخراج ۸۳۱-۷۱۰ وارد برج جداکننده قطره‌ها میشود تا قطره‌های محلول کاستیک حمل شده، جدا شود. نمودار جریان این فرایند در شکل ۱۱ آمده است [۲۳].

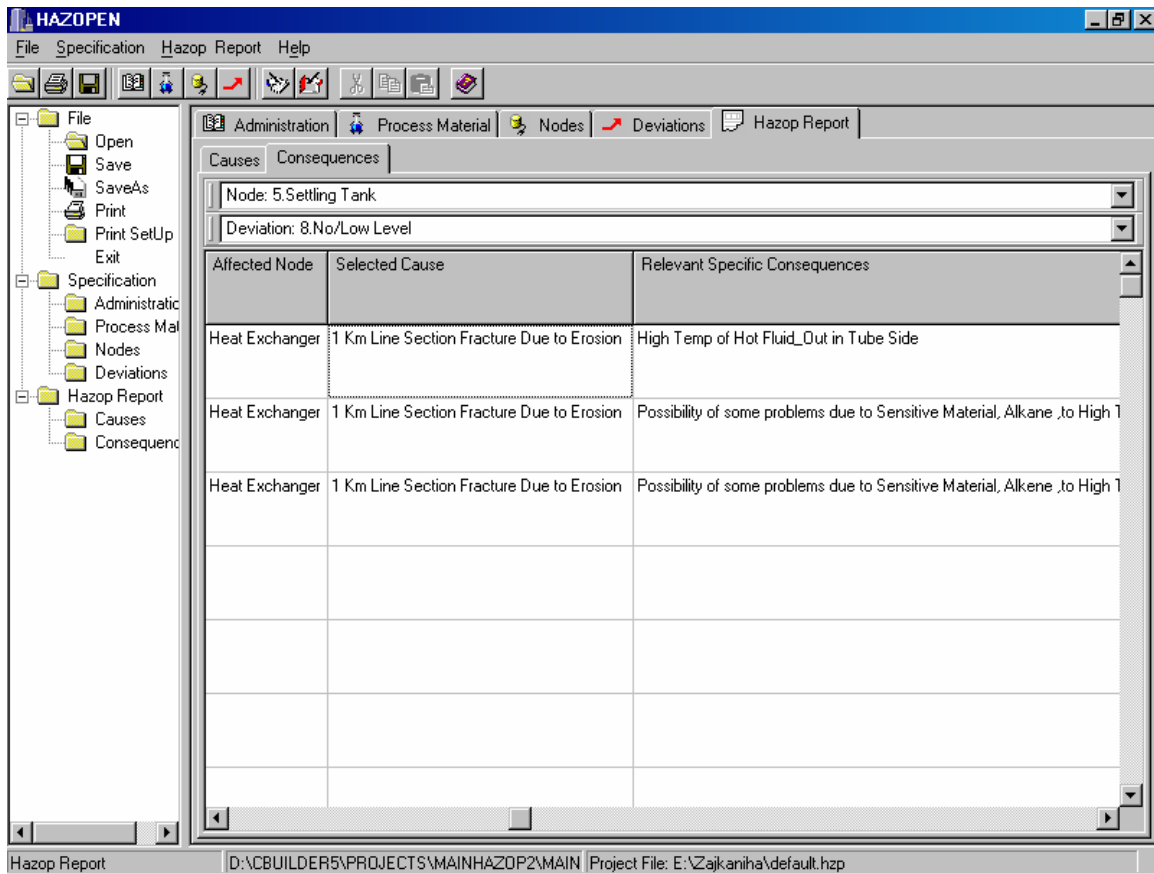
میتواند تحت تأثیر قرار گیرد، انتخاب میشود.

۹- تعیین انحراف گره متأثر: انحراف "Less Flow of Cold Fluid Out"، کم شدن جریان سرد خروجی از مبدل، را میتوان مورد ملاحظه قرار داد.

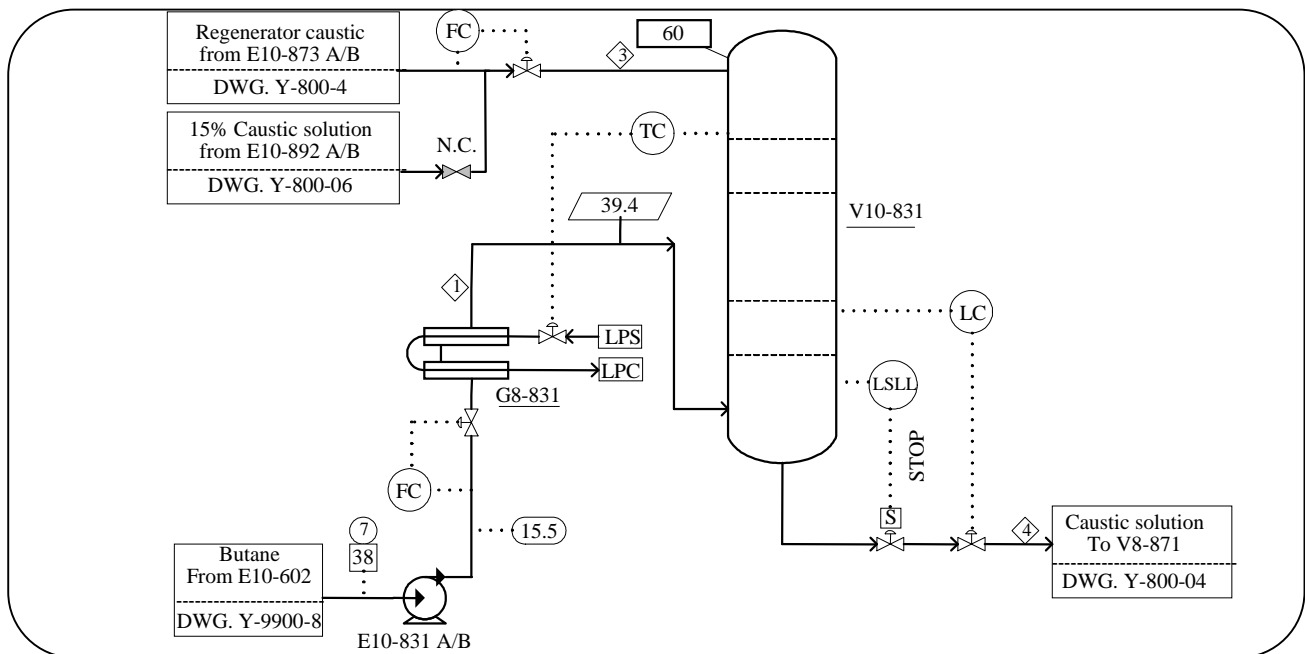
۱۰- حال میتوان عواقب انحراف ایجاد شده در تانک ته نشینی را روی مبدل حرارتی مشاهده کرد. این عواقب عبارت‌اند از:

- افزایش دمای سیال گرم خروجی از مبدل.
 - افزایش دمای سیال سرد خروجی از مبدل.
 - احتمال بروز پارهای مشکل‌ها به دلیل وجود مواد حساس به افزایش دما، آلکان و آلکن، در جریان سیال سرد.
- شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب دلایل و عواقب گزارش شده را نشان میدهند.

جدول ۲ نتیجه‌های به دست آمده از اجرای سیستم خبره HAZOPEN برای انحراف "Low Level" گره تانک



شکل ۱۰ - عواقب گزارش شده توسط سیستم خبره HAZOPEN برای گره تانک ته‌نشینی.



شکل ۱۱ - نمودار جریان بخش شستشوی واحد مرکاپتانزادایی بوتان.

جدول ۲ - مقایسه نتیجه‌های به‌دست آمده از اجرای سیستم HAZOPEN و مطالعه سنتی HAZOP (دلیل‌های خاص).

Selected Node: Settling Tank			
Deviation: Low Level			
HAZOPEN		Conventional HAZOP	
Causes	Consequences	Causes	Consequences
Specific Cause: 1. 1 Km Line Section Fracture due to Corrosive material, H ₂ O.	Specific: 1.1 Possibility of some problems due to Sensitive Material, Alkane, to high Temp	1.LCV or its controller fails close more	1.1 Cavitation may occur in J2pump and may damage to pump
	1.2 Possibility of some problems due to Sensitive Material, Alkene, to high Temp		1.2 Loss of feed to reaction section and reducing of output
	1.3 Cavitation in J2 Pump	2. FCV or its controller fails open more	1.3 Polymer formation in heat exchanger under no flow condition. 2.1 The Same as 1.1 2.2 Incomplete separation of water phase in settling tank leading to problems on reaction section

ادامه‌ی جدول ۲ - مقایسه نتیجه‌های به‌دست آمده از اجرای سیستم HAZOPEN و مطالعه سنتی HAZOP (دلیل‌های عام).

Selected Node: Settling Tank			
Deviation: Low Level			
HAZOPEN		Conventional HAZOP	
Causes	Consequences	Causes	Consequences
General Cause:			
1. 1 Km Line Section Fracture due to Erosion	The Same as above		
2. 1 Km Line Section Fracture Due to Crashing Vehicles, Cranes	The Same as above		
3. 1 Km Line Section Fracture Due to Overstressing	The Same as above		
4. 1 Km Line Section Fracture Due to Damage Occurring during installation (This Can Remain Hidden For a long Time)	The Same as above		
5. 1 Km Line Section Fracture Due to Vibration Causing Fatigue	The Same as above		
6. 1 Km Line Section Fracture Due to Fire	The Same as above		
7. Incorrect or Unanticipated Cross-Connection Causing Uncontrolled out-flow	The Same as above		
8. Run out of Row Material	The Same as above		
9. J1 Pump failure due to mechanical damage	The Same as above		
10. various motor failure of J1 Pump	The Same as above		
11. Failure of LCV or Its Controller & Close	The Same as above		
12. Failure of FCV or Its Controller & Open More	12.1 The Same as above		
	12.2 Incomplete Separation of Phases in Settling tank Leads to Some Problems in Down Stream		

نتایج و بحث

مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات، از جمله مباحث مهمی است که توجه متخصصین را به خود جلب کرده است تا با استفاده از یک سیستم خبره بتوانند در زمان و هزینه اجرای روش صرفه‌جویی کرده، مطالعه را دقیقتر و با جزئیات کاملتری انجام دهند.

در راستای رسیدن به این هدف، سعی شده است، یک سیستم اتوماتیک مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات معرفی شود.

این سیستم با استفاده از روش سیستم‌های خبره به نام HAZOPEN در محیط نرم‌افزاری ۵ Builder C++ توسعه یافته است.

ساختار کلی سیستم خبره HAZOPEN شامل چهار بخش دانش ویژه فرایندی، دانش عمومی فرایندی، ماشین استنباط و واسط کاربر می‌باشد.

دانش ویژه فرایندی متشکل از اطلاعات مربوط به مواد شیمیایی حاضر در فرایند و گرهم‌های فرایندی است و توسط کاربر و از طریق واسط کاربر مشخص می‌شوند.

دانش عمومی فرایندی شامل اطلاعات عمومی لازم جهت مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات است و مستقل از فرایند مورد ملاحظه و تغییرناپذیر در سیستم خبره نگهداری می‌شود. این اطلاعات از موردهای زیر تشکیل می‌شود:

- ۱- انحراف متغیرهای فرایندی واحدهای فرایندی.
 - ۲- دلیل‌های ویژه و عمومی انحراف متغیرهای فرایندی واحدهای فرایندی.
 - ۳- عواقب ناخوشایند انحرافات متغیرهای فرایندی.
- اطلاعات عمومی فرایند برای ۱۲ واحد عملیاتی ذکر شده در بخش تعیین گرهم‌های موجود در فرایند، توسعه داده شد. ماشین استنباط، الگوریتم مطالعه اتوماتیک مخاطرات و راهبری عملیات را تشکیل می‌دهد و از برقراری ارتباط بین دانش ویژه و عمومی فرایندی، نتیجه‌های مطالعه را استخراج کرده، گزارش می‌دهد. این نتیجه‌ها شامل علل و عواقب نامطلوب انحرافات متغیرهای فرایندی در گرهم مورد ملاحظه است. کاربر از راه واسط کاربر، دانش ویژه فرایندی شامل اطلاعات مواد شیمیایی و گرهم‌های فرایندی را مطابق نمودار لوله‌کشی و ابزار دقیق فرایند مشخص می‌کند. هم‌چنین می‌تواند اطلاعات عمومی از قبیل مشخصات کلی واحد، فهرست گروه متخصص و گزارش جلسات را وارد کند.

در اینجا مسیر تحلیل و مطالعه مخاطرات به شرح ذیل است:
۱- مواد شیمیایی و گرهم‌های مورد ملاحظه فرایند، توسط کاربر مشخص می‌شوند.

مواد شیمیایی موجود در فرایند شامل بوتان به عنوان ماده فرایندی، محلول کاستیک به عنوان حلال، ناخالصیها شامل مرکاپتان‌ها، کربونیل سولفید و کربن دی سولفید است.

۲- گرهم‌های مورد ملاحظه این بخش عبارت‌اند از:

- خط انتقال خوراک از مخزن خوراک تا برج استخراج.

- پمپ‌های سانتریفوژ A/B ۸۳۱-۱۰ E.

- شیر کنترل جریان ۸۳۱-FCV.

- مبدل حرارتی ۸۳۱-G، با جریان سیال سرد در سمت

پوسته و فشار بیشتر از سمت لوله.

۳- انتخاب گرهم مورد نظر: به‌طور نمونه مبدل حرارتی به عنوان گرهم مورد ملاحظه، انتخاب می‌شود.

۴- در اینجا انحراف "Less Flow of Cold Fluid Out" به

عنوان انحراف قابل ملاحظه انتخاب و بررسی می‌شود. - انتخاب

گرهم مسبب: خط انتقال، پمپ‌های سانتریفوژ A/B ۸۳۱-۱۰ E،

شیر کنترل ۸۳۱-FCV، به عنوان گرهم‌های که می‌تواند انحراف

"Less Flow of Cold Fluid Out" را در مبدل حرارتی ایجاد کند،

انتخاب می‌شود.

۵- انحرافی از گرهم مسبب که می‌تواند باعث کم شدن جریان

سرد در مبدل حرارتی شود انتخاب می‌شود.

۶- در اینجا دلیل‌های انحراف مشخص شده گرهم انتخابی

به‌وسیله سیستم خبره گزارش می‌شود.

۷- انتخاب یک علت گزارش‌شده، برای تعیین عواقب

مختص آن

۸- انتخاب گرهم متأثر: مبدل حرارتی به عنوان گرهم‌های که

می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد، انتخاب می‌شود.

۹- تعیین انحراف گرهم متأثر: انحراف "Less Flow of Cold

Fluid Out"، کم‌شدن جریان سرد خروجی از مبدل، را می‌توان

مورد ملاحظه قرار داد.

۱۰- حال می‌توان عواقب انحراف ایجاد شده در مبدل حرارتی

را مشاهده کرد. جدول ۳ نتیجه‌های به‌دست آمده از سیستم

HAZOPEN را با مطالعه سنتی مخاطرات این گرهم مقایسه

می‌کند.

شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب دلیل‌ها و عواقب گزارش

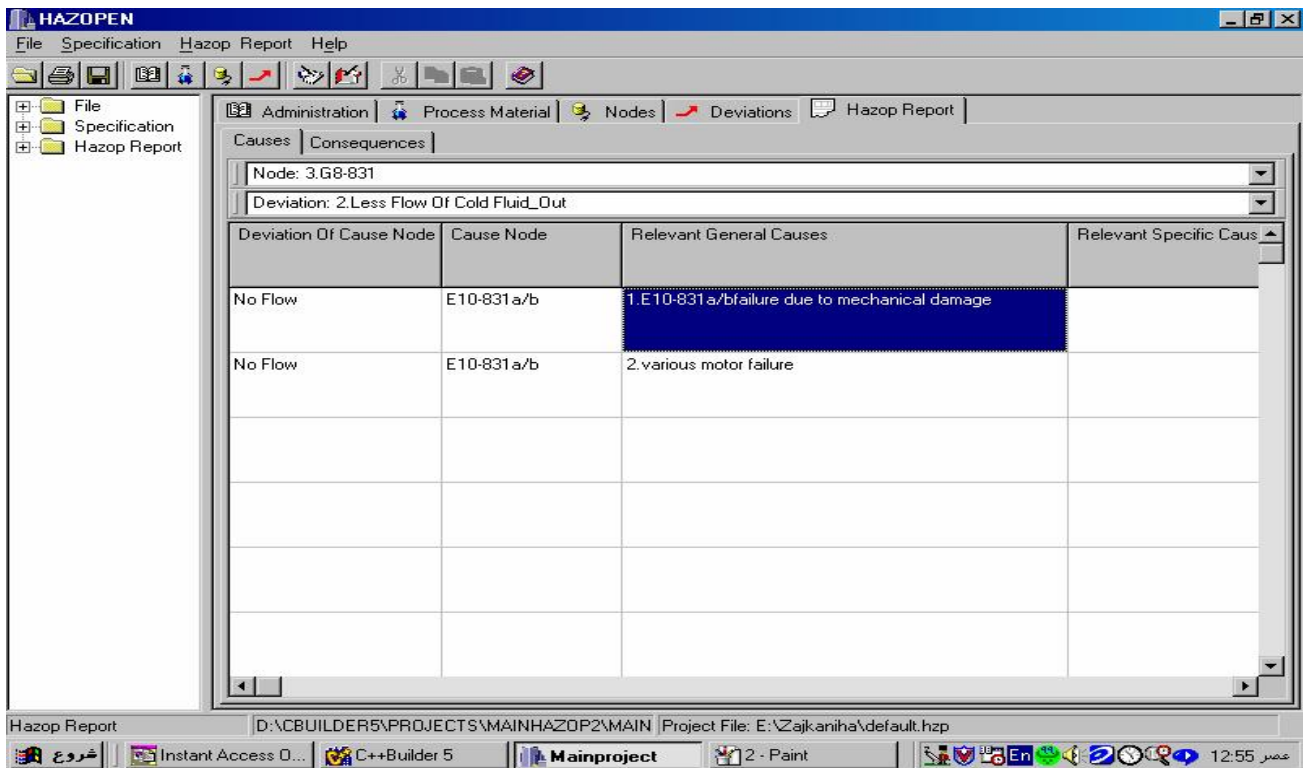
شده را نشان می‌دهند.

جدول ۳ - مقایسه نتیجه‌های به‌دست آمده از اجرای سیستم HAZOPEN و مطالعه سنتی HAZOP (دلیل‌های خاص).

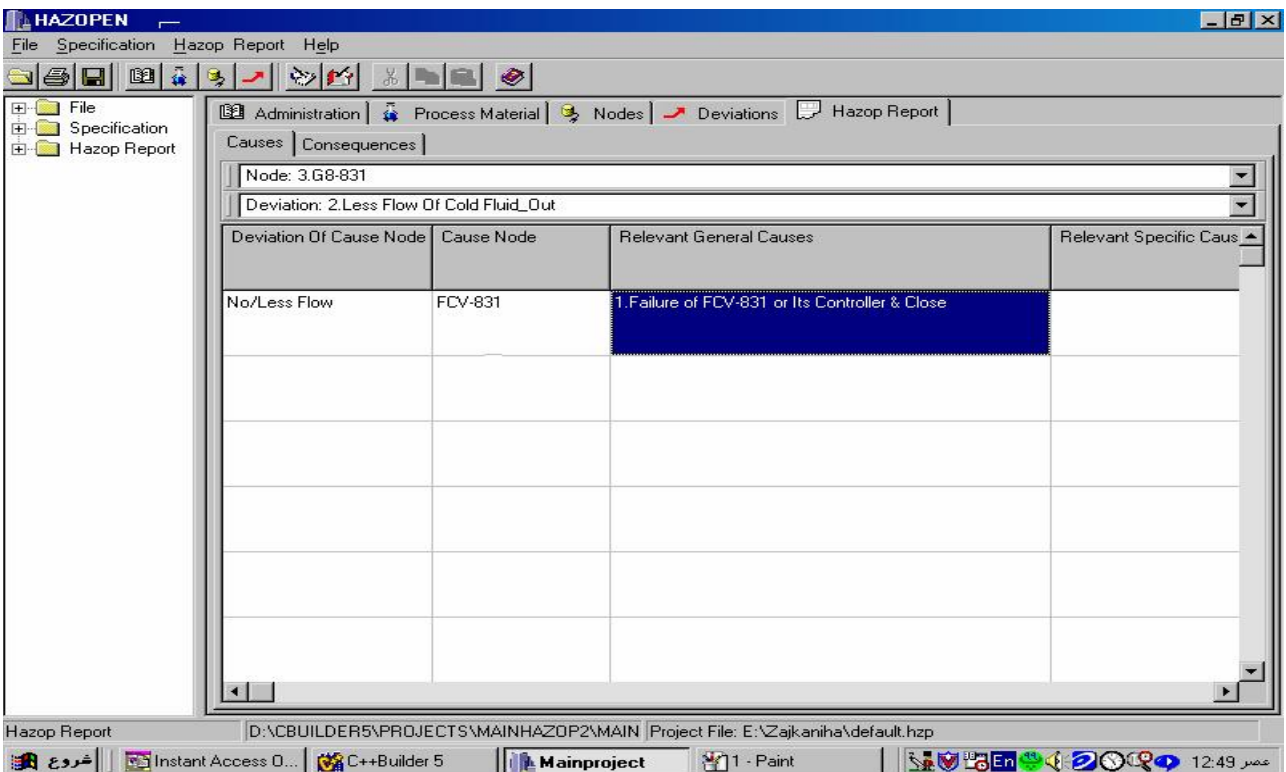
Selected Node: G8-831 (Heat Exchanger)			
Deviation: Less Flow of Cold Fluid_Out			
HAZOPEN		Conventional HAZOP	
Causes	Consequences	Causes	Consequences
Specific Cause: 1. Leakage in pipe due to Corrosive material.	Specific: 1.1 Contamination of the environment to process material	1. Blockage of strainer of pump E10-831A/B	1.1 Decreasing of cold fluid flow to G8-831
	1.2 Cavitations in pump E10-831A/B	2. Supply feed failure or failure of shut off valve, XV-832 and close	2.1 The Same as 1.1
2. Leakage from shell side to tube side of G8-831 due to corrosive materials	2.1 Possibility of increasing of pressure in tube side leading to tube rupture.		
		3. FCV-831 or its controller fails & close more	3.1 The Same as 1.1

ادامه‌ی جدول ۳ - مقایسه نتیجه‌های به‌دست آمده از اجرای سیستم HAZOPEN و مطالعه سنتی HAZOP (دلیل‌های عام).

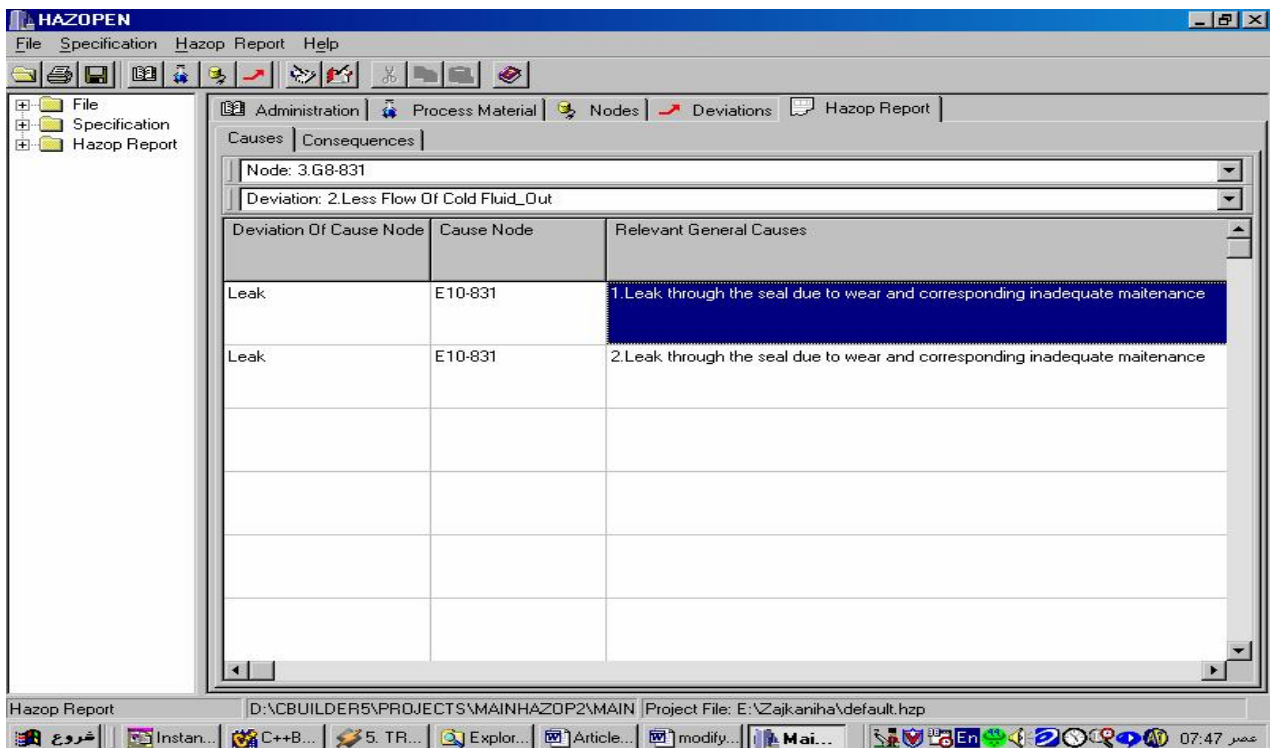
Selected Node: G8-831 (Heat Exchanger)			
Deviation: Less Flow of Cold Fluid_Out			
HAZOPEN		Conventional HAZOP	
Causes	Consequences	Causes	Consequences
General Cause:			
1. Line Fracture due to Erosion	The Same as above		
2. Line Fracture Due to Crashing Vehicles, Cranes	The Same as above		
3. Line Fracture Due to Overstressing	The Same as above		
4. Line Fracture Due to Damage Occurring during installation (This Can Remain Hidden For a long Time)	The Same as above		
5. Line Fracture Due to Vibration Causing Fatigue	The Same as above		
6. Line Fracture Due to Fire	The Same as above		
7. Incorrect or Unanticipated Cross-Connection Causing Uncontrolled out-flow	The Same as above		
8. Run out of Row Material	The Same as above		
9. E10-831A/B Pump failure due to mechanical damage	Decreasing of cold fluid flow to G8-831		
10. Various motor failure of E10-831A/B Pump	The Same as above		
11. Leakage through the seal due to wear and corresponding inadequate maintenance			
1. Failure of FCV-831 or Its Controller & Close more	The Same as above		



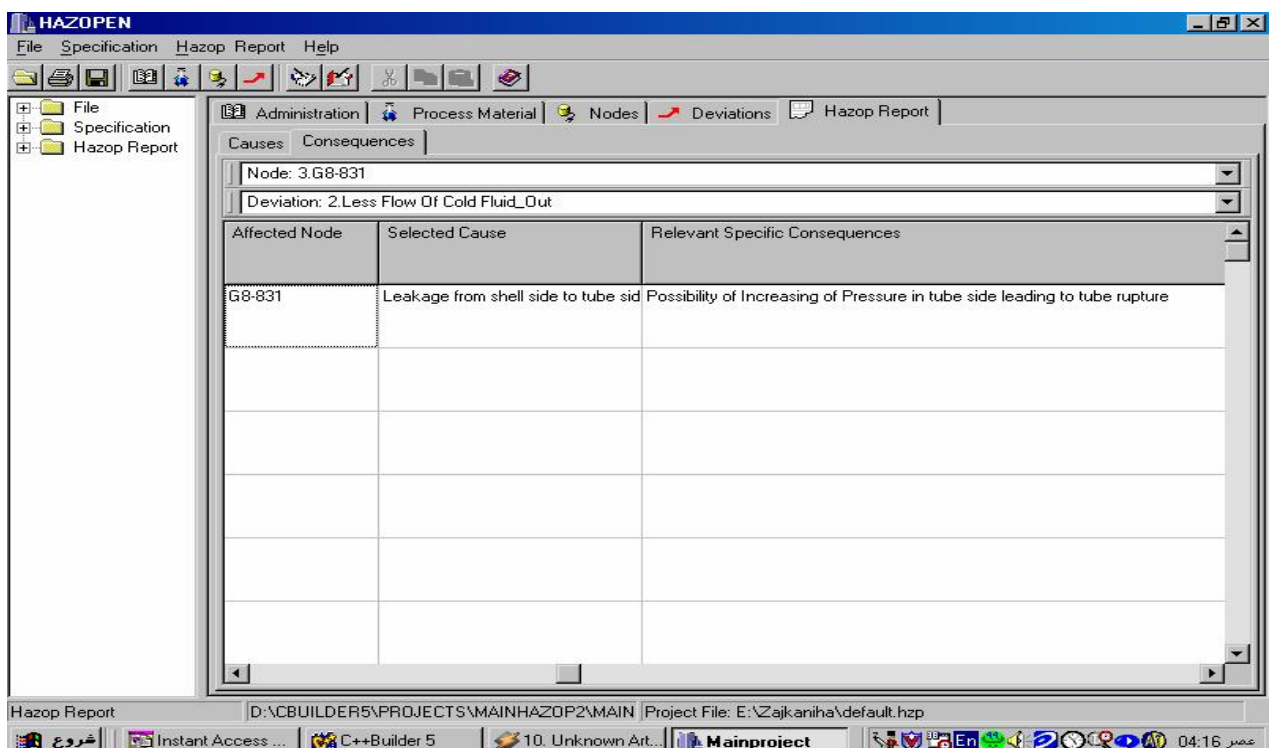
شکل ۱۲ - دلیل‌های گزارش شده به وسیله سیستم خبره HAZOPEN برای گره مبدل حرارتی ۸۳۱-۸۳۱-۸۳۱.



شکل ۱۳ - دلیل‌های گزارش شده به وسیله سیستم خبره HAZOPEN برای گره مبدل حرارتی ۸۳۱-۸۳۱-۸۳۱.



شکل ۱۴ - دلایل گزارش شده به وسیله سیستم خبره HAZOPEN برای گره مبدل حرارتی ۸۳۱-۸۳۱-۸۳۱.



شکل ۱۵ - عواقب گزارش شده به وسیله سیستم خبره HAZOPEN برای گره مبدل حرارتی ۸۳۱-۸۳۱-۸۳۱.

متشکل از این ۱۲ واحد فرایندی قابل اجراست. با افزایش مدل‌های مطالعه مخاطرات واحدهای فرایندی میتوان سیستم خبره را برای فرایندهای پیچیده‌تری به کار برد.

۲- ایجاد ارتباط بین گره‌های فرایندی با استفاده از بانک‌های اطلاعاتی و معادله‌های کیفی: به گونه‌ای که توزیع انحرافات متغیرهای فرایندی بین گره‌های بالادست و پایبندست گره مورد نظر به منظور تعیین تمامی دلایل و عواقب انحرافات به طور اتوماتیک انجام شود.

۳- توسعه واسط کاربر گرافیکی: به طوری که کاربر بتواند با استفاده از امکانات گرافیکی نمودار لوله‌کشی و ابزار دقیق واحد فرایندی را رسم کند.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۱/۱۰/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۲/۱۲/۲۵

همچنین بخش راهنمای واسط کاربر، کاربر را برای استفاده از سیستم خبره HAZOPEN راهنمایی میکند.

اجرای سیستم خبره HAZOPEN برای بخش خوراک واحد دیمرشدن اولفین و همچنین مرکاپتانزدایی بوتان، نتیجه‌های قابل تاملی را ارایه میکند و با مطالعه سنتی این فرایند قابل مقایسه میباشد. این سیستم مطالعه را دقیق‌تر و با جزئیات کاملتر انجام میدهد. همچنین زمان انجام مطالعه به میزان قابل ملاحظه‌ای کوتاهتر میشود.

با توجه به نتیجه‌های به دست آمده، میتوان موردهای زیر را برای بهبود سیستم خبره ارایه‌شده، پیشنهاد کرد:

۱- توسعه دانش عمومی فرایند: دانش عمومی فرایندی سیستم خبره HAZOPEN محدود به مدل‌های مطالعه مخاطرات ۱۲ واحد فرایندی است. لذا، این سیستم فقط برای گره‌های

مراجع

- [1] Venkatasubramanian, V., Zhao J., and Viswanathan S., Intelligent systems for HAZOP analysis of complex process plants, *Computers and Chemical Engineering*, **24**, 2291 (2000).
- [2] Khan, F. I. and Abbasi, S. A., TOPHAZOP: a knowledge-based software tool for conducting HAZOP in a rapid, efficient yet inexpensive manner, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **10**(5-6), 333 (1997).
- [3] Khan, F. I. and Abbasi, S. A., Towards automation of HAZOP with a new tool EXPERTOP, *Environmental Modeling & Software*, **15**, 67 (2000).
- [4] www. CNN.com.
- [5] www. mapcruzin.com.
- [6] www. panna.org.
- [7] Center for Chemical Process Safety(CCPS), Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, *AICHE*, New York (1985).
- [8] Venkatasubramanian, V. and Vaidhyanathan, R., A knowledge-based framework for automating HAZOP analysis, *AICHE Journal*, **40**(3), 496-505(1994).
- [9] HAZOP EP 95-0313 HSE Manual, 8sp HSE Management Manual, Revision 5.1, 5 th sep. (2004).
- [10] Vikas and Annuradhas S. Sahni , "Object Oriented Programming Systems", prentice Hall of India, New Delhi (1998).
- [11] Quantrille, T. E. and Liu, Y. A., "Artificial Intelligence in Chemical Engineering", *Academic Press* (1991).
- [12] Parmar, J. C. and Less, F. P., The propagation of faults in process plant: hazard identification for a water separator system, *Reliability Engineering*, **17**, 303(1987).

- [13] Freeman, R. A., Lee, R. and McYamana, T. P., Plan HAZOP studies with an expert system, *Chemical Engineering Progress*, **88**(8), 28 (1992).
- [14] Khan, F. I. and Abbasi, S. A., optHAZOP. An effective and efficient technique for hazard identification and assessment, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **10**, 191 (1997).
- [15] Holger, G. and Henner, S-T., An integrated approach to early process hazard identification of continuous and batch plants with state chart modeling and simulation, *Computers and Chemical Engineering*, **25**, 61 (2001).
- [16] Shimada, Y., Suzuki, K. and Sayama, H., Computer-aided operability study, *Computer and Chemical Engineering*, **20**(6-7), 905 (1996).
- [17] Weatherill T., and Cameron I. T. A Prototype Expert System For Hazard and Operability Studies, *Computers and Chemical Engineering*, **13**(11-12), 1229 (1989).
- [18] Kang, B. et al., AHA: A Knowledge Based System for Automatic Hazard Identification in Chemical Plant by Multimodel Approach, *Expert Systems with Applications*, **16**, 183 (1999).
- [19] Center for Chemical Process Safety (CCPS), "Guide lines for Design Solutions for Process Equipment Failures", *AICHE*, New York (1985).
- [20] Taylor. J. R, "Risk Analysis for Process Plant, Pipelines, Transport Systems", Chapman & Hall Ltd., (1993).
- [21] Library of PHA. Pro 5, (version 6) Software, 2002 Acu Tech. Consulting.
- [22] Kletz, T. A., "HAZOP & HAZAN notes on the identification and assessment of hazards. Rugby", UK: The Institution of Chemical Engineers, (1986).