

## توسعه ماتریس‌های سه مرحله‌ای سلسله مراتبی غربالی برای بهینه‌سازی شاخص طراحی ذاتاً ایمن و هزینه اجرای طراحی ذاتاً ایمن (مطالعه موردی فرآیند تولید استیک اسید)

حمید سرخیل<sup>۱\*</sup> - شاهرخ رهبری<sup>۲</sup> - مهیار حبیبی راد<sup>۲</sup> - جواد توکلی<sup>۲</sup>  
sarkheil\_h@yahoo.co.uk

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۱۰

### مکیده

**مقدمه:** استفاده از اصول ایمنی ذاتی در فازهای ابتدایی طراحی فرآیند بسیار کارآمد می‌باشد، چرا که ارزان و پربازده است. در حالی که در فازهای ابتدایی طراحی فرآیند اطلاعات کاملی در دسترس نیست. استفاده از شاخصی معتبر به منظور ارزیابی ایمنی ذاتی می‌تواند بسیار کارآمد باشد، به طوری که با مقایسه نتایج کمی می‌توان بهترین مسیر به منظور طراحی فرآیندی ایمن تر را انتخاب نمود.

**روش کار:** در این تحقیق توسط روش ماتریس سه بعدی سلسله مراتبی غربالی، شاخص‌هایی جامع به منظور ارزیابی ایمنی ذاتی فرآیند (ISD) و هم‌چنین ارزیابی هزینه ناشی از اجرای طراحی ذاتاً ایمن (ISDC) مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی با استفاده از شاخص‌های معرفی شده ایمنی ذاتی فرآیند تولید استیک اسید و هزینه‌های ناشی از اجرای ISD ارزیابی شده است. ابعاد ماتریس‌های ISD و ISDC شامل (۱) بردار اقدامات چهارگانه طراحی ذاتاً ایمن، (۲) بردار مکانی طراحی ذاتاً ایمن و (۳) بردار پارامتر (کمیت) طراحی ذاتاً ایمن می‌باشد.

**یافته‌ها:** به منظور بهینه‌سازی اجرای طراحی ذاتاً ایمن و بهینه‌سازی هزینه‌ها از سه فرضیه استفاده شده است که از این میان، فرضیه استفاده از دو فرآیند با ظرفیت نصف به عنوان طراحی با بیشترین سطح ایمنی ذاتی و فرضیه استفاده از متانول ۵۰٪ به عنوان کم هزینه‌ترین فرآیند انتخاب شده‌اند.

**نتیجه‌گیری:** در این ارزیابی‌ها امتیاز کل شاخص ایمنی ذاتی برای فرضیات سه‌گانه به ترتیب برابر با ۵۵، ۷۰ و ۱۳۵ بوده و هزینه غیرریالی کل فرضیات سه‌گانه به ترتیب برابر با ۸۵۸,۰۰۰، ۷۴۶,۰۰۰ و ۸۰۳,۰۰۰ دلار برآورد شده است. به طوری که این ابزار تأثیر سناریوهای مختلف در طراحی ذاتاً ایمن را نشان می‌دهد و هم‌چنین می‌تواند تضاد بین چهار اصل اساسی ISD و تأثیر آن بر روی عوامل ایمنی و هزینه، با استفاده از یک سیستم جایگزینی تأمین‌کننده متانول را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد.

**کلمات کلیدی:** ماتریس‌های سه مرحله‌ای ISD و ISDC، طراحی فرآیند، استیک اسید، ایمنی ذاتی

۱- استادیار، گروه محیط زیست انسانی، دانشکده محیط زیست، کرج، ایران  
۲- کارشناس ارشد، گروه محیط زیست انسانی، دانشکده محیط زیست، کرج، ایران

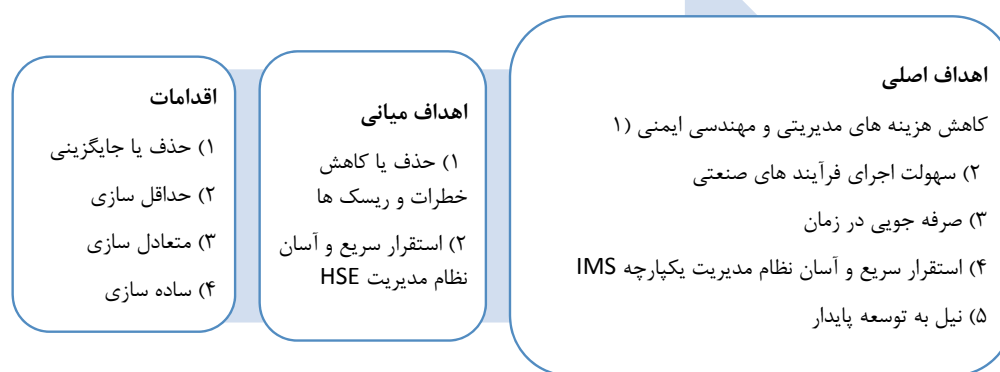
### مقدمه

در سال ۱۹۷۷ کلتز نظریه طراحی ذاتاً ایمن را که با هدف حذف و یا کاهش خطرات به کار می رود، معرفی نموده است (۱). این نظریه بر چهار اصل استوار است: (۱) حذف / جایگزینی، (۲) به حداقل رساندن، (۳) تعدیل و (۴) ساده کردن. در شکل ۱ اقدامات و اهداف میانی و اصلی طراحی ذاتاً ایمن ارائه شده است.

در دهه‌های پیشین، کمبود و یا نبود طراحی ذاتاً ایمن در صنایع به ویژه فرآیندهای شیمیایی و هسته‌ای منجر به حوادث بزرگی مانند بوپال، فلیکسپورو و چرنوبیل شده است که پیامدهای ویرانگری داشتند. لازم به ذکر می باشد که حوادث مذکور بازتابی جهانی داشته و باعث تغییر نگرش در ارزیابی‌های محیط زیستی شدند به گونه‌ای که منجر به ایجاد و توسعه ارزیابی ریسک محیط زیستی ERA با تلفیق روش‌های ارزیابی اثرات محیط زیستی و ارزیابی ریسک گردیدند. این حوادث بارها و بارها به عنوان حادثاتی که از طریق اجرای طراحی ذاتاً ایمن قابل پیش‌گیری بوده اند ذکر می شوند

(۷-۲). اولین گام برای اجرای کارآمد طراحی ذاتاً ایمن، شناسایی تمامی مخاطرات موجود در فرآیند مورد مطالعه می باشد. شناسایی مخاطرات معمولاً با استفاده از روش‌های مطالعه شناسایی مخاطرات HAZID، مطالعه حالت شکست و تجزیه و تحلیل اثرات HAZOP، مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات FMEA و مطالعه تحلیل مخاطرات اولیه PHA انجام می پذیرد. در این مطالعه از مدارک نام برده در زیر مستخرج از یک کارخانه تولید استیک اسید جهت شناسایی خطرات استفاده شده است (۱):

- مطالعات شناسایی مخاطرات (HAZID)
  - مطالعات روش حالت شکست و تجزیه و تحلیل اثرات (FMEA)
  - مطالعات مخاطرات و راهبری عملیات (HAZOP)
  - مطالعات مواد خطرناک ویژه
  - روش اجرایی بازرسی بهداشت و سلامتی
  - کتابچه راهنمای فرآیند ایمن سازمان
- به منظور پیاده سازی یک طراحی ذاتاً ایمن باید از یک روش سلسله مراتبی استفاده شود، به طوری که در این روش، مرتبه اول ایمنی ذاتی شامل



شکل ۱. اقدامات و اهداف میانی و اصلی طراحی ذاتاً ایمن (۱).

منظور رسیدن به بالاترین مقدار سود مهندسی در نظر گرفته شوند. از جمله مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی ایمنی ذاتی توسعه یافته می‌توان به شاخص ارزیابی ایمنی نمونه اولیه (PIIS) که توسط ادوارد و لورانس (۱۹۹۳) بسط داده شد (۱۵)، به علاوه شاخص i-Safe (۲۰۰۲) معرفی گردید، اشاره نمود (۱۶). در این میان شاخص‌های کمی DOW، MOND، و شاخص مرگ و میر مارشال نیز معرفی شده بودند که به طور اختصاصی به منظور ارزیابی ایمنی ذاتی معرفی نشدند و کاربردهای دیگری نیز داشتند (۷).

در این تحقیق تلاش خواهد شد ضمن معرفی روش ماتریس سلسله مراتبی غربالی، شاخص‌هایی جامع برای ارزیابی ISD و ISDC معرفی شود و همچنین به عنوان مطالعه موردی، فرآیند تولید استیک اسید و هزینه‌های ناشی از اجرای فرآیند ذاتاً ایمن بر روی سناریوهای مختلف، ارزیابی خواهد شد.

### روش‌شناسی

در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی فرآیند طراحی ذاتاً ایمن، با مشخص نمودن یک مطالعه موردی که فرآیند تولید استیک اسید می‌باشد و مشخص کردن اعضاء ماتریس طراحی ذاتاً ایمن و نیز ماتریس هزینه طراحی ذاتاً ایمن برای این فرآیند، شاخص طراحی ذاتاً ایمن و هزینه این طراحی را برای فرضیات و سناریوهای تعیین شده محاسبه نموده، به طوری که نتایج این محاسبات مبنای نتیجه‌گیری و تجزیه و تحلیل در این تحقیق خواهد بود.

#### مطالعه موردی

در مطالعه موردی این تحقیق، فرآیند تولید استیک اسید مورد بررسی قرار گرفته است. در طی این فرآیند، با کریوکسیلی کردن متانول در فاز مایع

یک مرحله برای جلوگیری از خطر و یا از بین بردن آن است و هنگامی که مرتبه اول ایمنی ذاتی قابل اجرا نیست، مرتبه دوم ایمنی ذاتی در نظر گرفته خواهد شد. اجرای مرتبه دوم ایمنی ذاتی شامل ۲ مرحله است: کاهش شدت و نیز کاهش احتمال (۸). اگرچه مفهوم ISD ساده به نظر می‌رسد، عوامل بسیار زیادی در انتخاب ISD در نظر گرفته می‌شود مانند عمل کرد، محیط زیست، تنازع بین اصول ایمنی ذاتی، تضاد بین مخاطرات و کسب و کار و عوامل اقتصادی (۹). همچنین باید توجه شود که ساخت یک مرکز ذاتاً ایمن به طور خودکار خطرات را کاهش نمی‌دهد. اگر چه این اقدام منجر به کاهش خطرات شیمیایی و فیزیکی فرایند می‌گردد؛ این عمل معمولاً از کاهش شدت حادثه میسر می‌گردد. از آنجایی که ریسک تابع هر دو عامل شدت و احتمال رویداد است. بنابراین هرگونه تغییر که احتمال رویداد را افزایش دهد و افزایش احتمال بیش از کاهش شدت باشد، موجب افزایش خطر کلی می‌شود (۱۰). همان‌گونه که فرآیند در خلال مسیر چرخه عمر خود پیش می‌رود، اصول طراحی ذاتاً ایمن‌تر و تجهیزات ایمنی اضافی مورد نیاز تغییر می‌نماید (۱۱، ۱۲). مهم‌ترین تصمیمات در رابطه با اصول طراحی ذاتاً ایمن‌تر و کاربرد آن‌ها در خلال فرآیند باید در همان فازهای ابتدایی طراحی مفهومی فرآیند و توسعه آن اتخاذ گردد (۱۳). بر این اساس مهندسی اولیه فرآیند و توسعه آن مناسب‌ترین فاز برای به کارگیری اصول طراحی ذاتاً ایمن‌تر در خلال طراحی فرآیند به حساب می‌آید، در حالی که غالباً تصمیم‌گیری در رابطه با به کارگیری تجهیزات ایمنی اضافی در خلال فازهای تشریح فرآیند و مهندسی ساخت در نظر گرفته می‌شوند (۱۴). به بیان دیگر با پیشرفت فرآیند توسعه و طراحی فرآیند، شانس به کارگیری اصول طراحی ذاتاً ایمن‌تر کاهش می‌یابد. بنابراین لازم است تا اصول ایمنی ذاتی در اسرع وقت به

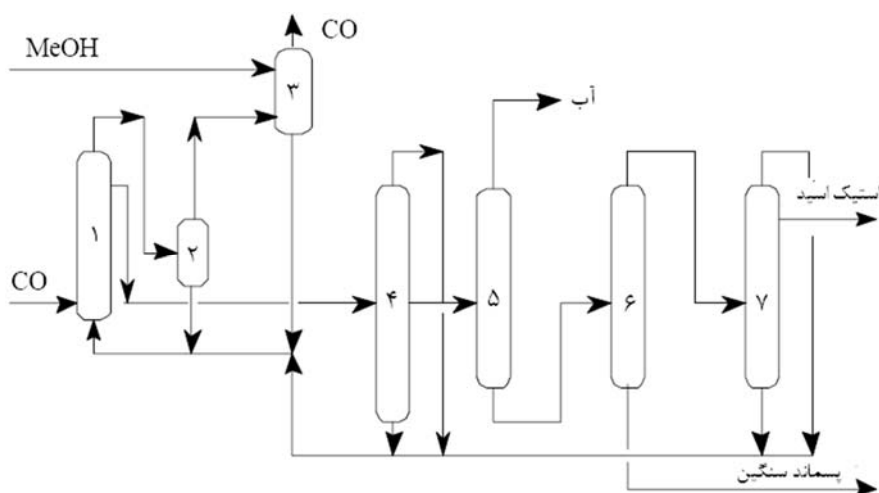
گونه ای که هر دو جریان برگشتی به رآکتور شماره ۱، فرستاده می‌شوند. استیک اسید جریان جانبی در بخش سبک جداکننده شماره ۴ به خشک کن شماره ۵ برای حذف رطوبت فرستاده می‌شود. از پایین خشک کن شماره ۵ اسید استیک خشک شده به برج تولید شماره ۶ فرستاده می‌شود، تا تولیدات جانبی سنگین از آن جدا شوند. اسید استیک خروجی از بالای برج تولید شماره ۶ برای خالص سازی نهایی به برج پایانی شماره ۷ منتقل می‌شود. کلیه مواد شیمیایی درگیر در این فرآیند با درجات گوناگون سمی و یا اشتعال پذیر می‌باشند. جریان‌های متفاوت فرآیندی، با توجه به نوع و مقدار ماده شیمیایی که با خود به همراه دارند، به اندازه‌های متفاوتی خطرناک می‌باشند.

#### ماتریس ISD و ISDC

در این مطالعه از دو ماتریس سه بعدی  $ISDC = [B'n, C'n, D'n]$  و  $ISD = [Bn, Cn, Dn]$  به منظور محاسبه شاخص طراحی ذاتاً ایمن ISD و هزینه طراحی ذاتاً ایمن ISDC استفاده شده است،

می‌توان استیک اسید به دست آورد. در طی واکنش بین متانول و کربن مونو اکسید در مجاورت رادیوم یدوکربونیل به عنوان کاتالیزور می‌توان به استیک اسید دست یافت. به گونه‌ای که نمودار فرآیند تولید استیک اسید در شکل شماره ۲ نشان داده شده است (۱).

واکنش کربوکسیلی نمودن متانول در یک رآکتور و در شرایط واکنش: دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد و فشار ۳۰ بار انجام می‌شود. گاز خروجی از رآکتور شماره ۱ به جداکننده شماره ۲ منتقل می‌شود تا گاز کربن مونو اکسید و مواد بی اثر تولیدی، از ترکیب چگالش پذیر جدا شود. سپس ترکیب گازی به بخش اسکرابر (تمیز کننده و شستشو دهنده) شماره ۳ فرستاده می‌شود تا با استفاده از متانول، ترکیبات آلی آن جدا شود. جریان خروجی از جداکننده شماره ۲ به همراه متانول خروجی از اسکرابر شماره ۳ برای بازیابی به رآکتور فرستاده می‌گردد. مابع خروجی از رآکتور شماره ۱ نیز به برج تقطیر شماره ۴، برای جداسازی بخش سبک و سنگین منتقل می‌شود، به



شکل ۲. نمودار فرآیند تولید استیک اسید: (۱) رآکتور، (۲) جداساز، (۳) بخش اسکرابر (تمیز کننده و شستشو دهنده)، (۴) جداکننده بخش سبک، (۵) برج خشک کن، (۶) بخش بازیابی، (۷) محصول نهایی (۱)

جدول ۱. بردارهای اول ماتریس‌های ISD و ISDC (B<sub>n</sub> و B'<sub>n</sub>) اقدامات طراحی ذاتاً ایمن

عضو	B1	B2	B3	B4
بردار اول ماتریس ISD	موارد حذف/جایگزینی	موارد حداقل سازی	موارد متعادل سازی	موارد ساده سازی
عضو	B'1	B'2	B'3	B'4
بردار اول ماتریس ISDC	هزینه حذف/جایگزینی	هزینه حداقل سازی	هزینه متعادل سازی	هزینه ساده سازی

جدول ۲. بردارهای دوم ماتریس‌های ISD و ISDC (C<sub>n</sub> و C'<sub>n</sub>) نواحی اقدامات طراحی ذاتاً ایمن

عضو	C1	C2	C3	C4
بردار دوم ماتریس ISD	دستگاه ۱	دستگاه ۲	دستگاه ۳	دستگاه ۴
عضو	C5	C6	C7	
بردار دوم ماتریس ISD	دستگاه ۵	دستگاه ۶	دستگاه ۷	
عضو	C'1	C'2	C'3	C'4
بردار دوم ماتریس ISDC	هزینه دستگاه ۱	هزینه دستگاه ۲	هزینه دستگاه ۳	هزینه دستگاه ۴
عضو	C'5	C'6	C'7	
بردار دوم ماتریس ISDC	هزینه دستگاه ۵	هزینه دستگاه ۶	هزینه دستگاه ۷	

جدول ۳. بردارهای سوم ماتریس‌های ISD و ISDC (D<sub>n</sub> و D'<sub>n</sub>) پارامترهای اقدامات طراحی ذاتاً ایمن

عضو	D1	D2	D3	D4
بردار سوم ماتریس ISD	دما	فشار	غلظت	توان
عضو	D5	D6		
بردار سوم ماتریس ISD	جریان	سمیت		
عضو	D'1	D'2	D'3	D'4
بردار سوم ماتریس ISDC	هزینه دما	هزینه فشار	هزینه غلظت	هزینه توان
عضو	D'5	D'6		
بردار سوم ماتریس ISDC	هزینه جریان	هزینه سمیت		

به طوری که اعضاء به صورت زیر تعریف می گردند:

- B<sub>n</sub>: اقدامات طراحی ذاتاً ایمن
- C<sub>n</sub>: ناحیه (فرآیندی) اقدامات طراحی ذاتاً ایمن
- D<sub>n</sub>: پارامتر (فرآیندی) اقدامات طراحی ذاتاً ایمن
- B'<sub>n</sub>: هزینه اقدامات طراحی ذاتاً ایمن
- C'<sub>n</sub>: هزینه ناحیه (فرآیندی) اقدامات طراحی ذاتاً ایمن
- D'<sub>n</sub>: هزینه پارامتر (فرآیندی) اقدامات طراحی ذاتاً ایمن

ایمن

در جداول ۱، ۲ و ۳ به ترتیب اعضای ماتریس‌های ISD و ISDC تشریح شده اند. جهت دستیابی به فرآیند طراحی ذاتاً ایمن با کمترین

هزینه از سه فرضیه به صورت زیر استفاده شده است:

۱. فرآیند شیمیایی موجود مطابق بخش ۱، ۲ با متانول تقریباً خالص به عنوان واکنش گر.
۲. فرآیند شیمیایی با محلول ۵۰٪ وزنی متانول به عنوان واکنش گر.
۳. دو فرآیند کاملاً مشابه با ظرفیت‌های نصف فرضیه شماره یک.

محاسبه شاخص ISD و هزینه ISD برای فرضیات ماتریس‌های معرفی شده در بخش قبل توسط فرآیندی سلسله مراتبی و غربالی تحلیل گردیده و

جدول ۴. شرایط عملیاتی فرضیات مطرح در ISD فرآیند تولید استیک اسید

گزینه ها	ماده واکنش گر	طول لوله کشی (متر)	وزن متانول (KG)	پمپ ورودی	ابزار کاربری
فرضیه ۱	متانول خالص	۲۸۲,۸۸	۲۳۵,۸۷	۳	۳۲,۳۶ کیلوگرم بر ساعت بخار و مونواکسید کربن
فرضیه ۲	محلول ۵۰٪ وزنی (متانول/آب)	۳۰۹,۶۰	۱۴۳,۱۶	۴	۱۵,۳۶ کیلوگرم بر ساعت بخار و مونواکسید کربن
فرضیه ۳	متانول خالص (دو سیستم مشابه)	۶۰۹,۶۰	۲۶۵,۵۴	۶	۳۷,۳۶ کیلوگرم بر ساعت بخار و مونواکسید کربن

جدول ۵. نحوه ارتباط ابعاد مختلف ماتریس های ISD و ISDC برای فرآیند تولید استیک اسید

مرحله اول							
ISD نمود	لغت راهنمای ISD						
	حذف جایگزینی	کوچک سازی	اعتدال	ساده سازی			
	B1	B2	B3	B4			
A1	حذف خطر	x					
A2	کاهش نتیجه		x	x			
A3	کاهش احتمال						x

مرحله دوم							
لغت راهنمای ISD	نشان گر ISD						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	دستگاه ۱	دستگاه ۲	دستگاه ۳	دستگاه ۴	دستگاه ۵	دستگاه ۶	دستگاه ۷
B1	حذف/جایگزینی	x	x	x			
B2	کوچک کردن	x	x	x	x	x	x
B3	اعتدال				x	x	x
B4	ساده کردن				x	x	x

مرحله سوم							
نشان گر ISD	متغیر ISD						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	
	تعداد	فشار	غلظت	زمان	تولید	تعمیر	
C1	دستگاه ۱		x	x		x	
C2	دستگاه ۲					x	
C3	دستگاه ۳		x	x		x	
C4	دستگاه ۴				x	x	
C5	دستگاه ۵	x			x	x	
C6	دستگاه ۶	x				x	
C7	دستگاه ۷	x	x	x		x	

ایمن در فرآیند هر یک از فرضیات تعیین می‌گردند. در این قسمت خانه‌های مرتبط با یکدیگر حفظ شده و خانه‌های دیگر رها می‌گردند. در ماتریس ISD شاخص طراحی ذاتاً ایمن برای هر خانه نوشته می‌شوند که این مقدار برابر با مجموع شاخص‌های طراحی ذاتاً ایمن برای خانه‌های مرتبط در گام سوم بوده و نشان دهنده سطح ایمنی ذاتی برای ناحیه اقدام طراحی ذاتاً ایمن مورد نظر می‌باشد. در ماتریس ISDC هزینه مرتبط با هر خانه نوشته می‌شود؛ این مقدار برابر با مجموع تمامی هزینه‌های مرتبط با خانه مورد نظر در گام سوم می‌باشد. گام سوم: پارامتر فرآیندی (کمیت) مرتبط با ناحیه اقدامات طراحی ذاتاً ایمن تعیین می‌شوند. در این قسمت خانه‌های مرتبط با یکدیگر حفظ شده و خانه‌های دیگر رها می‌گردند. در ماتریس ISD شاخص طراحی ذاتاً ایمن برای هر خانه نوشته می‌شوند که این مقدار عددی بین ۰ و ۵ بوده و نشان دهنده سطح ایمنی ذاتی برای پارامتر

در نهایت خانه‌های پر شده جهت برآورد و ارزیابی هر فرضیه مورد بررسی قرار می‌گیرند. جهت محاسبه شاخص طراحی ذاتاً ایمن و هزینه اجرای طراحی ذاتاً ایمن برای هر یک از سه فرضیه مطرح شده، مطابق گام‌های زیر عمل شده است.

گام اول: اقدامات طراحی ذاتاً ایمن مرتبط با (۱) حذف خطر، (۲) کاهش احتمال خطر و (۳) کاهش شدت خطر تعیین می‌شوند. در این قسمت خانه‌های مرتبط با یکدیگر حفظ شده و خانه‌های دیگر رها می‌گردند. در ماتریس ISD شاخص طراحی ذاتاً ایمن برای هر خانه نوشته می‌شوند؛ این مقدار برابر با مجموع خانه‌های مرتبط با هر خانه حفظ شده در گام‌های دوم و سوم به صورت سلسله مراتبی می‌باشد. در ماتریس ISDC هزینه مرتبط با هر خانه نوشته می‌شود. این مقدار برابر با مجموع تمامی هزینه‌های مرتبط با خانه مورد نظر در گام‌های دوم و سوم می‌باشد. گام دوم: ناحیه مرتبط با اقدامات طراحی ذاتاً

جدول ۶. ارتباط خانه‌های مختلف از بردارهای ماتریس‌های ISD و ISDC فرآیند تولید استیک اسید

بردار/ماتریس	فرضیه ۳		فرضیه ۲		فرضیه ۱	
	شاخص طراحی ذاتاً ایمن	هزینه* (دلار)	شاخص طراحی ذاتاً ایمن	هزینه (دلار)	شاخص طراحی ذاتاً ایمن	هزینه (دلار)
دستگاه ۱	۱۶	۴۲۰,۰۰۰	۱۰	۳۱۵,۰۰۰	۷	۳۹۰,۰۰۰
دستگاه ۲	۵	۷۱,۰۰۰	۲	۵۶,۰۰۰	۲	۶۰,۰۰۰
دستگاه ۳	۱۸	۵۶,۰۰۰	۱۲	۵۵,۰۰۰	۸	۶۱,۰۰۰
دستگاه ۴	۱۲	۸۰,۰۰۰	۸	۸۵,۰۰۰	۶	۱۰۰,۰۰۰
دستگاه ۵	۱۵	۱۰۲,۰۰۰	۱۰	۱۳۲,۰۰۰	۱۰	۱۳۰,۰۰۰
دستگاه ۶	۱۳	۵۲,۰۰۰	۸	۷۲,۰۰۰	۷	۷۰,۰۰۰
دستگاه ۷	۲۳	۲۲,۰۰۰	۲۰	۳۱,۰۰۰	۱۵	۴۸,۰۰۰
حذف/جایگزینی	۳۹	۵۴۷,۰۰۰	۱۲	۳۷۱,۰۰۰		
کوچک سازی	۹۶	۲۵۶,۰۰۰	۱۲	۵۵,۰۰۰		
تعدیل	۰	۰	۴۶	۳۲۰,۰۰۰		
ساده سازی	۰	۰	۰	۰		
ISD	۱۳۵		۷۰		۵۵	
ISDC		۸۰۳,۰۰۰		۷۴۶,۰۰۰		۸۵۸,۰۰۰

\* مبنای محاسبات بر مبنای قیمت‌های برآوردی در سال ۱۳۹۱ هجری شمسی می‌باشد.

### بحث

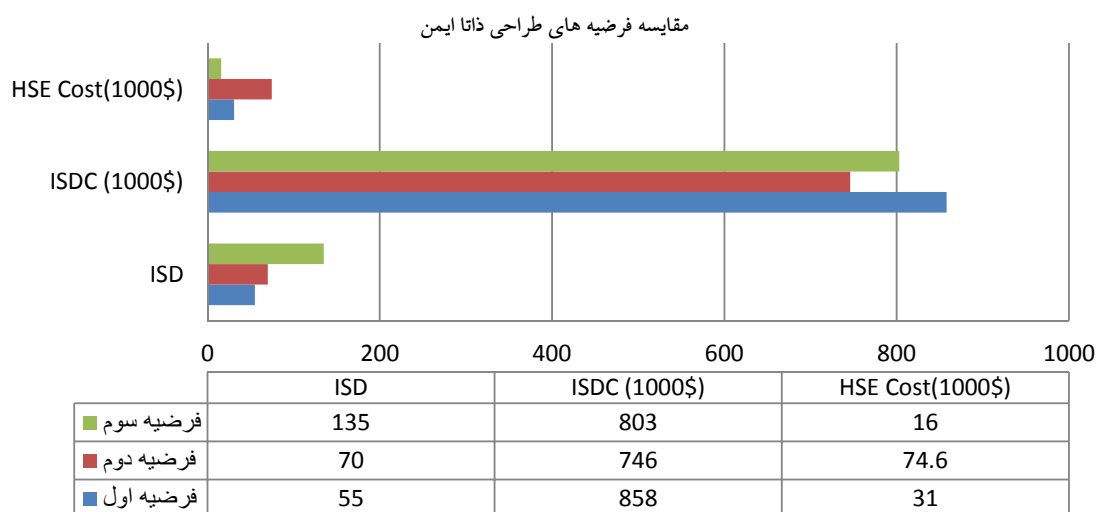
نتایج محاسبه شاخص‌های طراحی ذاتاً ایمن و هزینه‌های آن به صورت سلسله مراتبی و غربالی برای فرضیات ۱، ۲ و ۳، در جدول ۶ ارایه شدند که با بررسی نتایج محاسبات حاصل از این فرضیات می‌توان ضمن معرفی بالاترین شاخص‌ها و هزینه‌های حاصل شده از این طراحی‌ها، به مقایسه بین خروجی‌ها نیز اشاره نمود.

در شکل شماره ۳ فرضیه‌های طراحی ذاتاً ایمن در مطالعه موردی مقایسه شده‌اند. مطابق این شکل، می‌توان نتیجه گرفت فرضیه سوم بالاترین سطح ایمنی ذاتی را دارا می‌باشد (بالاترین شاخص ISD). همچنین این فرضیه دارای کم‌ترین هزینه می‌باشد که نشان دهنده سطح بالای ایمنی ذاتی و نیاز کم‌تر به هزینه‌های HSE می‌باشد. از میان فرضیه‌های موجود، فرضیه اول (فرآیند موجود) دارای کم‌ترین میزان سطح ایمنی ذاتی و بیش‌ترین هزینه می‌باشد که نشان دهنده فرآیند مناسب نیست. می‌وان اثربخش‌ترین فرضیه بر روی هزینه‌ها را فرضیه دوم (متانول ۵۰٪) و اثربخش‌ترین فرضیه بر روی سطح

طراحی ذاتاً ایمن مورد نظر می‌باشد. در ماتریس ISDC هزینه مرتبط با هر خانه نوشته می‌شود که این مقدار برابر با مجموع تمامی هزینه‌های طراحی، خرید، نصب، عملیات، تعمیر و نگهداری مرتبط با خانه مورد نظر می‌باشد.

جدول ۴ شرایط عملیاتی فرضیات مطرح در ISD را به نمایش می‌گذارد. همان‌طور که قابل ملاحظه می‌باشد، فرضیه سوم ابزار کاربری، تجهیزات ورودی، طول لوله کشی و مواد بیش‌تری مصرف می‌نماید.

در جدول ۵ نحوه ارتباط ابعاد مختلف ماتریس‌های ISD و ISDC در سه مرحله نشان داده شده است، به طوری که می‌توان در مرحله اول، عناصر نمود ISD (حذف خطر، کاهش نتیجه و کاهش احتمال) را در مقابل عناصر لغت راهنمای ISD (جایگزینی، کوچک سازی، اعتدال و ساده سازی) و در مرحله دوم عناصر لغت راهنمای ISD را در مقابل عناصر نشان‌گر ISD (دستگاه‌های ۱ تا ۷) و نیز در مرحله سوم عناصر نشان‌گر ISD را در مقابل عناصر متغیر ISD (دما، فشار، غلظت، توان، جریان و سمیت) مشاهده نمود.



شکل ۳. مقایسه فرضیه‌های طراحی ذاتاً ایمن برای محاسبه ISD و ISDC در فرآیند تولید استیک اسید



برای فرضیات سه گانه به ترتیب برابر با ۵۵، ۷۰ و ۱۳۵ بوده و هزینه غیر ریالی کل فرضیات سه گانه به ترتیب برابر با ۸۵۸,۰۰۰، ۷۴۶,۰۰۰ و ۸۰۳,۰۰۰ دلار برآورد شده است، به طوری که این ابزار تاثیر سناریوهای مختلف در طراحی ذاتاً ایمن را نشان می‌دهد و همچنین می‌تواند تضاد بین چهار اصل طراحی ذاتاً ایمن و تاثیر آن بر روی عوامل ایمنی و هزینه، با استفاده از یک سیستم جایگزینی تامین کننده متانول را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد که در مقایسه بین فرضیه‌های کاربردی این تحقیق اثبات شده است.

از طرفی، در بررسی فرضیه‌های این تحقیق می‌توان فرضیه دوم را بر روی هزینه‌های طراحی ذاتاً ایمن فرآیند موثرترین فرضیه و نیز فرضیه سوم را موثرترین فرضیه بر روی سطح شاخص ایمنی ذاتی فرآیند معرفی نمود، به گونه‌ای که نتایج و نگاه جدید این تحقیق می‌تواند توسط تحلیل گران خطر فرآیندی، در رسیدن به الگویی بهینه برای تحلیل شاخص طراحی ذاتاً ایمن و هزینه طراحی ذاتاً ایمن در بخش‌های مختلف تمامی صنایع فرآیندی به کار گرفته شود.

شاخص ایمنی ذاتی را فرضیه سوم (دو فرآیند با ظرفیت اسمی نصف فرآیند فرضیه اول) دانست.

### نتیجه گیری

هر چند که فلسفه طراحی ذاتاً ایمن تر در صنایع فرآیندی به تنهایی یک روش دستیابی بنیادی به تجهیزات فرآیندی و ماشین آلات ایمن تر می‌باشد، ولی اختلاف بین اصول اساسی صنایع فرآیندی می‌تواند اهداف اصلی این فلسفه را دچار تغییر نماید. این تحقیق یک روند نظام مند برای بازبینی یک فرآیند جایگزین با استفاده از ترکیب ابزار ماتریس سه مرحله ای ISD و روش لغت راهنما است که مشتمل بر اقدامات اساسی طراحی ذاتاً ایمن یعنی جایگزینی، کوچک سازی، اعتدال و ساده سازی می‌باشد، به طوری که از میان رویه‌های پیشنهاد شده در این تحقیق، پارامتر وابسته با هر روش معین شناسایی شده و با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مرتب گردیده اند که بسیار با اهمیت می‌باشند. در این ارزیابی‌ها امتیاز کل شاخص ایمنی ذاتی

### REFERENCES

1. Sarkheil H, Tavakoli J. Inherent Safety (Inherently safer design in the process industries), ACER Publication, Amirkabir University of Technology Branch, 2016; p.151. (Persian)
2. Edwards DW. Export inherent safety {NOT} risk. J. Loss Prev. Process Ind. 2005; 18: 254–260, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp>.
3. Khan FI, Abbasi SA. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. J. Loss Prev. Process Ind. 1999; 12: 361–378, [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230\(98\)00062-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230(98)00062-X).
4. Mannan S. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification Assessment and Control, 3rd ed. Elsevier Science & Technology Books, Oxford. 2004.
5. Sanders RE. Designs that lacked inherent safety: case histories. J. Hazard. Mater. 2003; 104: 149–161, [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00241-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00241-3).
6. Kletz TA. Learning from Accidents, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford. 2001.
7. Kletz TA. The constraints on inherently safer design and other innovations. Process Saf. Prog. 1999; 18: 64–69, <http://dx.doi.org/10.1002/prs.680180112>.
8. Moore DA, Hazzan M, Rose M, Heller D, Hendershot DC, Dowell AM. Advances in inherent

- safety guidance. *Process Saf. Prog.* 2008; 27: 115–120, <http://dx.doi.org/10.1002/prs.10238>.
9. Amyotte PR, Pegg MJ, Khan FI. Quantification of inherent safety aspects of the Dow indices. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2002; 15: 477–487, [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)v00039-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230(02)v00039-6).
  10. Center for Chemical Process Safety. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York. 2011.
  11. Jafari MJ, Askarian A, Omidi L, Miri Lavasani MR, Taghavi L, Ashori A. The assessment of independent layers of protection in gas sweetening towers of two gas refineries, *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention*, 2014; 2(2): 103-112. (persian)
  12. Jafari MJ, Nourian S, Zendehtdel R, Massoudinejad MR, Sarbakhsh P, Rahmati AR, Mofidi AA. The performance of a spray tower in scrubbing H2S from air, 2014; 2(4): 321-328. (persian)
  13. Hurme M, Rahman M. Implementing inherent safety throughout process lifecycle. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005; 18: 4–6, p. 238-244.
  14. Lajevardi SS, Jafari MJ, MohammadFam I. Determining Safety Integrity Level on a Hy-drogen Production Unit with Application of the Layers of Protection Analysis Method. *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention*. 2014. 2(1):23-30. (persian)
  15. Edwards DW, Lawrence D. Assessing the inherent safety of chemical process routes: Is there a relation between plant costs and inherent safety. *Chemical Engineering Research & Design*, 1993; 71: p. 252–258.
  16. Palaniappan C. *Expert system for design of inherently safer chemical processes*. National University of Singapore. 2002.

## Development of a three-step hierarchical screening matrix to optimize inherently safety design index and inherently safety design cost (A case study in Acetic acid production process)

Hamid Sarkheil<sup>1,\*</sup>, Shahrokh Rahbari<sup>2</sup>, Mahyar Habibi Rad<sup>2</sup>, Javad Tavakoli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Human Environment, University College of Environment, Karaj, Iran

<sup>2</sup> M.Sc., Department of Human Environment, University College of Environment, Karaj, Iran

### Abstract

**Introduction:** Application of inherently safety principle in the early phase of the design process is very efficient, as this approach is an economic and high efficiency method. While a complete information is not available in the initial phases of the process, the use of valid index to evaluate inherently safety can be efficient. In this case, the best route to design safer process can be selected by comparing the quantitative results.

**Material and Method:** The comprehensive index to evaluate the inherently safety design (ISD) and cost evaluation of the implementing inherently safety design (ISDC) were studied using a three-step hierarchical matrix screening in this research. Utilizing the proposed inherently safety index, Acetic acid production process and cost resulting from ISD were evaluated. Dimensions of the Matrix for ISD and ISDC included: 1) quadrature inherently safety design vector, 2) location vector of inherently safety design and 3) quantity parameter vector of inherently safety design.

**Result:** In order to optimize the implementation of inherently safety design and its cost, three hypotheses were used. From them, the idea of using two processes with half capacity and also using 50% Methanol were selected as a design with the highest level of inherently safety and a design with the lowest-cost process, respectively.

**Conclusion:** In these evaluations the total score for the assumptions of the inherently safety index 1, 2 and 3, were 55,70 and 135, respectively. And the total cost assumptions 1, 2 and 3, have been estimated 858,000, 746,000 and 803,000 US dollars, respectively. Therefore, this tool could show the impact of various scenarios in inherently safety design and also the contrast between the four principles of ISD and its impact on safety and cost factors can be analyzed using an alternative system supplier of methanol.

**Key words:** *ISD and ISDC Three-Step Matrixes, Process Design, Acetic Acid, Inherently Safety*

\* Corresponding Author Email: [sarkheil\\_h@yahoo.co.uk](mailto:sarkheil_h@yahoo.co.uk)