منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

دور التحول الرقمي في تعزيز منظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في صناعتي التكرير والبتروكيماويات

OAPEC Oapec Oapec
@OAPEC1 OAPEC1 OAPEC ORG

الكويت: نوفمبر / تشرين الثاني 2024
إدارة الشؤون الفنية

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

دور التحول الرقمي في تعزيز منظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في صناعتي التكرير والبتروكيماويات

إعداد
د. ياسر محمد بغدادي
خبير أول صناعات نفطية

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز نسخ أو اقتباس اي جزء من هذه الدراسة أو ترجمتها أو إعادة طباعتها أو نشرها باي صورة دون إذن خطي مسبق من المنظمة، إلا في حالات الاقتباس القصير، مع وجوب ذكر المصدر.

2024

توجه جميع المراسلات على العنوان التالي:

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف: 24959000 (965+) - فاكسميلي: 24959755 (965+)

P.O Box 20501, Safat- Kuwait, 13066

Tel.: (+965) 24959000 - Fax. (+965) 24959755

البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

الموقع الإلكتروني: www.oapecorg.org

مقدمة

في ظل عصر التحول الرقمي السريع، أصبحت التقنيات الرقمية جزءاً أساسياً في إدارة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في المنشآت الصناعية عالية المخاطر، مثل صناعتي التكرير والبتروكيماويات. تتيح حلول السلامة المدعومة بتطبيقات الذكاء الاصطناعي والتقنيات الرقمية المتقدمة إمكانية تحديد وتحليل ملفات المخاطر المرتبطة بالحوادث المسجلة، بالإضافة إلى دمج البيانات الضخمة المتعلقة بالسلامة المجمعة من تطبيقات وبرامج متعددة على منصة إلكترونية واحدة. هذا يعزز من قدرة مسؤولي السلامة والبيئة على إدارة الإجراءات بفعالية واتخاذ قرارات سريعة ومبنية على بيانات دقيقة للحد من المخاطر المحتملة. أصبحت الصناعات الأكثر عرضة للمخاطر الآن مجهزة بتدابير تضمن لها مستوى أعلى من السلامة كما لم يحدث من قبل. فالسلامة المهنية لم تعد مقتصرة على المعدات والتجهيزات، أو الالتزام بتعليمات سلامة الأفراد والعمليات والأصول فقط، بل أصبحت تشمل أيضاً تعزيز ثقافة سلوك السلامة بين العاملين، وهو ما ينعكس بشكل إيجابي على حماية الممتلكات والأرواح، بالإضافة إلى استقرار بيئة العمل.

وفي الوقت نفسه، يفرض التحول الرقمي في هذا المجال تحديات ومخاطر قد تؤثر سلباً على سير العمل إذا لم يتم التعامل معها بعناية. لذا من الضروري وضع أنظمة احتياطية لضمان استمرارية التشغيل، وتبني استراتيجيات وخطط فعالة للتخفيف من المخاطر وتقليل العواقب السلبية المحتملة.

تهدف الدراسة إلى تسليط الضوء على أهمية التحول الرقمي في تعزيز منظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في صناعتي التكرير والبتروكيماويات، وذلك من خلال توفير بيئة عمل آمنة والحفاظ على المعدات والبيئة في مواقع الإنتاج والمناطق العمرانية المجاورة.

تتكون الدراسة من أربعة فصول رئيسية:

- **الفصل الأول**: استعرض تطور مفهوم إجراءات السلامة مع تقدم الثورات الصناعية، وصولاً إلى المفاهيم الحديثة للسلامة، والتي تركز على رفع الكفاءة وتحقيق الأداء الأمثل في المجالات الصناعية.
- **الفصل الثاني**: سلط الضوء على دور التحول الرقمي في تعزيز منظومة سلامة العمليات، من خلال استخدام الأدوات والبرامج الرقمية المتقدمة لتحليل المخاطر واتخاذ قرارات سليمة. كما تناول هذا الفصل مساهمة التحول الرقمي في مساعدة المؤسسات على الانتقال من الأنظمة التقليدية إلى

الأنظمة الرقمية المتطورة، مع التركيز على دور الأمن الصناعي في إدارة سلامة العمليات وحماية المنشآت والعاملين وفقاً للمعايير الدولية والمحلية.

- **الفصل الثالث** :تناول أهمية تنفيذ برامج تحديد المخاطر في صناعتي التكرير والبتروكيماويات، حيث يعتمد الإنتاج في هذه الصناعات على عمليات معقدة لتحويل المواد الخام إلى منتجات ذات قيمة اقتصادية عالية. كما استعرض هذا الفصل طرق تقييم المخاطر باستخدام تقنيات الاتصال الحديثة وأنظمة الربط البيني، إضافة إلى دور الأمن السيبراني في حماية الأنظمة الصناعية. كما تم التركيز على أهمية دراسات تقييم الأثر البيئي والاجتماعي وضرورة رقمنة نتائجها، مما يساعد في اتخاذ قرارات متوازنة بشأن جدوى مشاريع التنمية الصناعية الجديدة.
- **الفصل الرابع** :قدم لمحة عن دور التحول الرقمي في تعزيز منظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في دول منظمة أوابك، مستعرضًا بعض دراسات الحالة وقصص النجاح في منشآت صناعتي التكرير والبتروكيماويات.

وفي ختام الدراسة، تم تقديم مجموعة من الاستنتاجات والتوصيات التي تهدف إلى تعزيز فعالية التحول الرقمي في تعزيز السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في هذه الصناعات الحيوية.

تأمل الأمانة العامة لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول من خلال هذه الدراسة في التعريف بأهمية دور التقنيات الحديثة والتحول الرقمي في تعزيز منظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في صناعتي التكرير والبتروكيماويات، وتوفير المعلومات والبيانات اللازمة للمختصين لتطبيق هذه المفاهيم بشكل فعال، وذلك للحفاظ على المكتسبات التي حققتها الصناعة، وحماية المنشآت والأصول الرأسمالية، وضمان سلامة العاملين والبيئة المحيطة.

والله الموفق،،،

الأمين العام

جمال عيسى اللوغاني

المحتويات

	الموضـوع	رقم الصفحة
	مقدمة	3
	قائمة المحتويات	5
	قائمة الأشكال	8
	قائمة الجداول	8
	المصطلحات والمختصرات	9
	ملخص تنفيذي	11
	الفصل الأول: **تكامل تطور منظومة السلامة مع التطورات الصناعية**	17
	مقدمة	18
.1.1	التسلسل الزمني للثورات الصناعية	19
.2.1	تطور مفهوم السلامة	20
.3.1	الدروس المستفادة	31
.4.1	تكامل الثورة الصناعية 4.0 ومفهوم السلامة 4.0	33
	الفصل الثاني: **التحول الرقمي وتعزيز سلامة العمليات**	34
	مقدمة	35
.1.2	سلامة العمليات	36
.2.2	سلامة التخطيط الهندسي	38
.3.2	أساليب مبتكرة لسلامة العمليات الكيميائية	41
.1.3.2	تكثيف العمليات **Process Intensification**	42
.2.3.2	التحكم المتقدم في العمليات **Advanced Process Control**	43
.3.3.2	الروبوتات	45
.4.3.2	" الروبوت التعاوني" كوبوت **COBOT**	47
.5.3.2	الأجهزة الخارجية المساعدة	49
.4.2	تقنيات الاتصال والربط البيني	49
.1.4.2	تطبيقات الشبكات " الويب " والهواتف المحمولة	50
.2.4.2	إنترنت الأشياء	51
.3.4.2	إنترنت الأشياء الصناعية **The Industrial Internet of Things (IIoT)**	51
.4.4.2	إنترنت الذكاء الاصطناعي	51
.5.4.2	الواقع المعزز **Augmented reality**	52
.6.4.2	الواقع الافتراضي **Virtual Reality**	53
.7.4.2	التوأم الرقمي **Digital twin**	54
.8.4.2	الطائرات بدون طيار "المسيرة"	57

تابع قائمة المحتويات

	الموضـوع	رقم الصفحة
.5.2	أنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الرقمية	60
.1.5.2	المخاطر الصحية والسلامة البدنية	60
.2.5.2	المخاطر النفسية الاجتماعية	62
.6.2	إدارة البيانات	62
.1.6.2	الحوسبة السحابية **Cloud Computing**	62
.2.6.2	أنظمة الأمن السيبراني **Cybersecurity Systems**	63
.7.2	الأمن الصناعي **Industrial Safety**	64
.1.7.2	أدوار الأمن الصناعي في حماية المنشأة	64
.2.7.2	دور التحويل الرقمي في تحسين إدارة الأمن الصناعي	65
	الفصل الثالث: **تطبيقات التحول الرقمي في تحديد مخاطر السلامة، وتقييم الأثر البيئي في صناعتي التكرير والبتروكيماويات**	67
	مقدمة	68
.1.3	برامج تحديد المخاطر في سلامة العمليات	69
.1.3.3	تحليل الأسباب الجذرية Root Causes Analysis	71
.2.3.3	دراسة المخاطر وقابلية التشغيل HAZOP	76
.3.3.3	دراسات تقييم المخاطر Risk Assessment Studies	78
.4.3.3	مصفوفة المخاطر Risk Matrix	81
.3.3.3	دراسات تقييم الأثر البيئي والاجتماعي	87
	الفصل الرابع: **نماذج مشروعات التحول الرقمي لمنظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في الدول الأعضاء في منظمة أوابك**	89
	مقدمة	90
.1.4	دولة الإمارات العربية المتحدة	90
.2.4	مملكة البحرين	93
.3.4	المملكة العربية السعودية	94
.1.3.4	الامتثال Compliance	94
.2.3.4	الاستدامة	95
.3.3.4	التمويل	96
.4.3.4	سلسلة التوريد	96
.5.3.4	القوى العاملة	96
.6.3.4	العمليات	96
.7.3.4	الابتكار	97
.4.4	دولة قطر	98

تابع قائمة المحتويات

	الموضـوع	رقم الصفحة
.5.4	دولة الكويت	**99**
.6.4	جمهورية مصر العربية	101
	الاستنتاجات والتوصيات	102
	المراجع	103
	الملخص التنفيذي باللغة الإنجليزية	110
	الملخص باللغة الإنجليزية	117

قائمة الأشكال

رقم الشكل	الشكل	رقم الصفحة
الشكل (1-1):	حجم الدمار الناتج عن كارثة مصنع فليكسبورو في المملكة المتحدة	24
الشكل (1-2):	بقايا مصنع " يونيون كاربيد" للمبيدات الحشرية في الهند عام 1984	25
الشكل (1-3):	انفجار خزانات الغاز في محطة PEMEX لغاز البترول المسال في المكسيك عام 1984	26
الشكل (1-4):	كارثة اشتعال النيران في منصة Piper Alpha البحرية	28
الشكل (1-5):	التطور المفصلي للسلامة في الصناعات البترولية	29
الشكل (1-6):	مخطط إطار عمل التكامل بين المصنع الذكي، وإدارة السلامة 4.0	32
الشكل (2-1):	المسببات الرئيسية لحالات الحوادث الخطرة لسلامة العمليات	38
الشكل (2-2):	مراحل تخطيط وتصميم المنشآت الصناعية الكبرى خلال فترة عمر المشروع	41
الشكل (2-3):	مزايا تكثيف العمليات في الصناعة	43
الشكل (2-4):	الثعابين الروبوتية المستخدمة لإعمال الصيانة تحت الماء	46
الشكل (2-5):	الروبوتات المستخدمة في أعمال التفتيش والفحص في الصناعات التكميلية	47
الشكل (2-6):	استخدام الروبوت التعاوني في تعبئة القناني البلاستيكية	48
الشكل (2-7):	السلامة المهنية وتطبيقات التوأم الرقمي في تنفيذ مبادرات التميز التشغيلي	56
الشكل (2-8):	استخدام الطائرات المسيرة في عمليات الفحص والمراقبة في صناعة البتروكيماويات	59
الشكل (3-1):	نموذج ريزن " الجبن السويسري" لتحليل المشاكل او تحليل المخاطر	71
الشكل (3-2):	مخطط تحليل شجرة الأخطاء	73
الشكل (3-3):	مخطط " مفاتيح الأسئلة الخمسة" لتحليل الأسباب الجذرية للحوادث	74
الشكل (3-4):	إطار تقييم المخاطر، في ضوء إرشادات السلامة الصادرة عن هيئة الصحة والسلامة البيئية	80
الشكل (3-5):	نموذج رقمي لتحليل مصفوفة المخاطر	86
الشكل (4-1):	منصة الصيانة التنبؤية لشركة أدنوك	91

قائمة الجداول

رقم الجدول	عنوان الجدول	رقم الصفحة
جدول (1-1)	تسلسل الفترات الزمنية للثورات الصناعية	30
جدول (2-1)	لمحة تاريخية عن تطور معايير السلامة	31
جدول (3-1)	مصفوفة تحليل المخاطر	84

المصطلحات والمختصرات

المصطلح	Term	Abbreviation
الذكاء الاصطناعي	Artificial Intelligence	**AI**
الذكاء الاصطناعي للأشياء	Artificial Intelligence of Things	**AIoT**
أدنى حد معقول يمكن تحقيقه	As Low as Reasonably Achievable	**ALARA**
أدنى مستوى ممكن عمليا	As Low as Reasonably Practicable	**ALARP**
الوكالة الوطنية للأمن السيبراني لنظم المعلومات	National Agency for The Cybersecurity of Information Systems	**ANSSI**
إنترنت الأشياء الصناعية	Industrial Internet of Things	**IIoT**
معايير العمل الدولية للسلامة والصحة	International Labor Standards on Safety and Health	**ILO-OSH**
مؤشر الصحة المهنية المتأصل	Inherent Occupational Health Index	**IMPULSE**
إنترنت الأنظمة	Internet of Systems	**IoS**
انترنت الأشياء	Internet of Things	**IoT**
نظام معلومات	Information System	**IS**
التحكم المتقدم في العمليات	Advanced Process Control	**APC**
شجرة الهجوم	Attack Tree	**AT**
تحليل شجرة الهجوم	Attack Tree Analysis	**ATA**
سلسلة عمليات ماركوف	Markov Processes	**MPs**
نظام التحكم الأساسي في العمليات	Basic Process Control System	**BPCS**
أفضل أسوء الطرق	Best Worst Method	**BWM**
مركز الحدث الحرج (الحدث الأعلى)	Center Critical Event (Top Event)	**CCE**
مركز سلامة العمليات الكيميائية	Center For Chemical Process Safety	**CCPS**
مخاطر الحاسوب وتحليل قابلية التشغيل	Computer Hazards and Operability Analysis	**CHAZOP**
النظام السيبراني المادي	Cyber-Physical System	**CPS**
نظام الإنتاج السيبراني المادي	Cyber-Physical Production System	**CPPS**
مفاعل الخزان بالتقليب المستمر	Continuous Stirred Tank Reactor	**CSTR**
الأمن السيبراني المادي	Cyber-Physical Security	**CYPSec**
الاتحاد الأوروبي للهندسة الكيميائية	European Federation of Chemical Engineering	**EFCE**
المركز الأوروبي لسلامة العمليات	European Process Safety Centre	**EPSC**
تخطيط موارد المشاريع	Enterprise Resource Planning	**ERP**
تحليل شجرة الحدث	Event Tree Analysis	**ETA**
نموذج الفشل وتحليل التأثير	Failure Mode and Effect Analysis	**FMEA**
نماذج الفشل، والتأثيرات، وتحليل مستوى الخطورة	Failure Modes, Effects, And Criticality Analysis	**FMECA**
تحليل شجرة الخطأ	Fault Tree Analysis	**FTA**
تحليل المخاطر	Hazard Analysis	**HAZAN**
تحليل المخاطر وقابلية التشغيل	Hazard and Operability Analysis	**HAZOP**
العامل البشري	Human Factor	**HF**
المجلس الدولي للجمعية الكيميائية	International Council of Chemical Association	**ICCA**
معهد المملكة المتحدة للمهندسين الكيميائيين	UK Institution of Chemical Engineers	**IChemE**
نظام كشف التسلل	Intrusion Detection System	**IDS**

تابع المصطلحات والمختصرات

Abbreviation	Term	المصطلح
ISA	International Society of Automation	الجمعية الدولية للأتمتة
ISC	IChemE Safety Center (UK)	مركز السلامة التابع للمعهد الدولي للهندسة الكيميائية (المملكة المتحدة)
ISD	Inherently Safer Design	تصميم أكثر أمانًا بطبيعته
ISHE	Indicators for Safety, Health, and Environment	مؤشرات السلامة والصحة والبيئة
IT	Information Technology	تكنولوجيا المعلومات
ITU	International Telecommunication Union	الاتحاد الدولي للاتصالات
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development	منظمه التعاون الاقتصادي والتنمية
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series	سلسلة تقييم الصحة والسلامة المهنية
OPR	Open Plate Reactor	مفاعل اللوحة المفتوحة
OSH	Occupational Safety and Health	السلامة والصحة المهنية
OSHA	Safety And Health Administration	إدارة السلامة والصحة المهنية
OT	Operational Technology	تكنولوجيا تشغيلية
OVI	Operator of Vital Importance	عامل ذو أهمية حيوية
OV	Targeted Objective	الهدف المستهدف
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon	هيدروكربون عطري متعدد الحلقات
PHA	Preliminary Hazard Analysis	تحليل المخاطر الأولية
RMM	Risk Management Measures	إجراءات إدارة المخاطر
RRF	Risk Reduction Target Factor	العامل المستهدف للحد من المخاطر
SIL	Safety Integrity Level	مستوى سلامة النزاهة
SIS	Safety Instrumented System	نظام السلامة المجهز
SL	Security Level	مستوى الأمان
SMS	Safety Management System	نظام إدارة السلامة
SR	Source of Risk	مصدر المخاطر
STAMP	Systems-Theoretic Accident Modeling and Process	نمذجة الحوادث والعمليات النظرية للأنظمة
STPA	Systems-Theoretic Process Analysis	تحليل العمليات النظرية للنظم
UD	Unique Document	وثيقة فريدة من نوعها
VOC	Volatile Organic Compounds	المركبات العضوية المتطايرة

ملخص تنفيذي

في ظل عصر التحول الرقمي السريع، أصبحت التقنيات الرقمية جزءاً أساسياً في إدارة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في المنشآت الصناعية عالية المخاطر، مثل صناعات التكرير والبتروكيماويات. تتيح حلول السلامة المدعومة بتطبيقات الذكاء الاصطناعي والتقنيات الرقمية المتقدمة إمكانية تحديد وتحليل ملفات المخاطر المرتبطة بالحوادث المسجلة، بالإضافة إلى دمج البيانات الضخمة المتعلقة بالسلامة المجمعة من تطبيقات وبرامج متعددة على منصة إلكترونية واحدة. هذا يعزز من قدرة مسؤولي السلامة والبيئة على إدارة الإجراءات بفعالية واتخاذ قرارات سريعة ومبنية على بيانات دقيقة للحد من المخاطر المحتملة. أصبحت الصناعات الأكثر عرضة للمخاطر الآن مجهزة بتدابير تضمن لها مستوى أعلى من السلامة كما لم يحدث من قبل. فالسلامة المهنية لم تعد مقتصرة على المعدات والتجهيزات، أو الالتزام بتعليمات سلامة الأفراد والعمليات والأصول فقط، بل أصبحت تشمل أيضاً تعزيز ثقافة سلوك السلامة بين العاملين، وهو ما ينعكس بشكل إيجابي على حماية الممتلكات والأرواح، بالإضافة إلى استقرار بيئة العمل.

تكامل تطور منظومة السلامة مع التطورات الصناعية

دائماً ما كان يسبق الثورات الصناعية تطورات، وابتكارات علمية، وتكنولوجية وتنظيمية. حيث بدأت الثورة الصناعية الأولى عام 1750، واعتمدت على استخراج الفحم والمعادن وظهور صناعة النسيج وابتكار المحرك البخاري . ثم تأسست الثورة الصناعية الثانية في عام 1840، واعتمدت على إنتاج الكهرباء والنفط، وبداية ظهور الصناعات الميكانيكية والكيميائية. واستخدمت السكك الحديدية كوسيلة للنقل العام. ثم تلتها الثورة الصناعية الثالثة مع ظهور الإلكترونيات "الترانزستورات، والدوائر المتكاملة"، وعلوم الحاسوب، والاتصالات السلكية واللاسلكية، والصناعات السمعية والبصرية في عام 1960. ثم ظهرت الثورة الصناعية الرابعة في عام 2010، واعتمدت على الدمج بين نظام جديد يجمع ما بين الإنترنت وبرامج وأجهزة الاستشعار ووسائل الاتصال لإدارة العمليات المعقدة. وتأثر الإنتاج الصناعي بشكل خاص بالأتمتة والروبوتات، وتوقع الأعطال قبل حدوثها. ولأول مرة يتم ربط الموارد والمعلومات والآلات والأدوات والعمال في شبكة واحدة، وأطلق عليها إنترنت الأشياء الصناعي **Industrial Internet of Things- IIoT**. وما أن بدأ العالم يتوسع في تطبيق الثورة الصناعية الرابعة، وما

تبعها من التوسع في تطبيقات تقنيات الأتمتة، والذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، حتى بدأ مفهوم أو حقبة جديدة عام 2020، لتمثل "الثورة الصناعية الخامسة"، وهي ثورة توازن ما بين الجانبين العلمي والبشري.

وعلى التوازي مع التطورات الصناعية وتوسع مجالاتها وتنامي الأخطار المرافقة لها ظهرت الحاجة إلى مفاهيم السلامة. وفي عام 1802 بدأ ظهور وصفات السلامة الأولى " السلامة 1.0"، مع نشر أول قانون في المملكة المتحدة بشأن "صحة وأخلاق المتدربين". كما شكلت المراسيم الإمبراطورية التي نشُرت في فرنسا بين عامي 1810 و1811 أولى القواعد التنظيمية المتعلقة بالمخاطر البشرية. حيث تطرق المرسوم الإمبراطوري الصادر عام 1810 إلى المصانع وورش العمل التي كانت تطلق روائح كريهة أو مزعجة.

تميزت مرحلة "السلامة 2.0" بالتركيز على منع الحوادث الجسيمة، نظراً لأن التكنولوجيا المتاحة حينها لم تكن متوافقة بعد مع الاحتياجات المطلوبة للصناعة، وكان تصميم المعدات في كثير من الأحيان غير مناسب، وقد ساهمت نتائج تحليل أسباب تلك الحوادث الكارثية في تطوير تصاميم أكثر أماناً للعمليات، والنجاح في استنباط وتطوير العديد من المعايير الدولية للسلامة والبيئة. أما فترة السلامة 3.0 الممتدة من الستينيات حتى الثمانينيات من القرن الماضي فقد شهدت انخفاضاً كبيراً في معدلات الحوادث بشكل كبير. ومع ذلك، حدثت أنواع مختلفة من الحوادث المأساوية ذات الآثار السلبية والكارثية على سلامة الإنسان والممتلكات والبيئة، مما أدى إلى إعادة التفكير في ممارسات إدارة المخاطر، والتحول إلى عصر "أنظمة إدارة الصحة والسلامة والبيئة".

وفي أعقاب سلسلة الحوادث الكيميائية الخطيرة في جميع أنحاء العالم، بدأت الحكومات والشركات الصناعية في تركيز جهودها على مجال تحسين التكنولوجيا والعوامل البشرية للوقاية من الحوادث، وتطوير السياسات ونشر المعايير لتسريع اعتماد نهج أنظمة "الإدارة لسلامة العمليات"، ومنذ بداية القرن الحادي والعشرين، تم توجيه الجهود البحثية في الصناعة نحو تطوير الأساليب التي تعزز الدافع نحو السلوك الآمن.

التحول الرقمي وتعزيز سلامة العمليات

تساعد تقنيات التحول الرقمي المؤسسات على التحول من الأنظمة التقليدية إلى الأنظمة الرقمية المتطورة، باستخدام البيانات الذكية ودمج الأدوات والبرامج الرقمية في استراتيجيات السلامة لتحليل المخاطر وفقا للمعايير الدولية. كما يُعتمد على هذه التقنيات في تعزيز ثقافة السلامة وتطوير المهارات لتأمين بيئة عمل أكثر أماناً. ومن جانب آخر يعتمد الإنتاج في صناعتي التكرير والبتروكيماويات، وخاصة مجمعات البتروكيماويات على مجموعة من الإجراءات والعمليات المُعقدة لتحويل المواد الخام الأولية إلى منتجات ذات قيمة اقتصادية عالية.

تشكل سلامة العمليات ضمانة للشركات لتقليل الحوادث الصناعية. وقد تطورت إدارة سلامة العمليات جنباً إلى جنب مع تطور التكنولوجيا التي تدعمها، حيث قدمت التكنولوجيا مجموعة من الحلول لتعزيز سلامة العمليات، وتمكين المشغلين من توقع الأعطال المحتملة من خلال مراقبة تشغيل المعدات بشكل مستمر ومقارنتها بنظيراتها الافتراضية. كما ساهم إدخال البيانات التشغيلية التاريخية وتطبيق طرق التحليل المتقدمة للبيانات وتعلم الآلة، في إحداث ثورة في كيفية التنبؤ بمخاطر سلامة العمليات وإدارتها، كتقليل احتمالية حدوث تسربات كيميائية عرضية وغيرها من الحوادث. وتم استخدام إنترنت الأشياء (IoT) في أنشطة المراقبة على العمليات الصناعية. وتمكنت أجهزة الاستشعار في الأنظمة والمعدات من تتبع العمليات الحيوية، كمراقبة الضغط ودرجة الحرارة وتركيز المواد الكيميائية. كما يمكن تطبيق تقنية "التوائم الرقمية" باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في الصيانة التنبؤية ليعمل كنظام إنذار مبكر، وفيه يعتمد مديرو سلامة العمليات على مجموعة من الأدوات البرمجية تسمح لهم بنمذجة البيئات الصناعية ومحاكاة العمليات الصناعية للحصول على صورة أكثر شمولاً ودقة لجميع نقاط الضعف في النظام والتعرف على المخاطر المحتملة[1]، وبما يسمح لموظفي السلامة باكتشاف الانحرافات عن ظروف التشغيل العادية واتخاذ الإجراءات الفورية التصحيحية.

[1] 5 Ways to Enhance Process Safety Management (PSM) Using Technology,2024.

تطبيقات التحول الرقمي في تحديد مخاطر السلامة، وتقييم الأثر البيئي في صناعتي التكرير والبتروكيماويات

تهدف استراتيجية التحول الرقمي في مجال السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة إلى تحويل العمليات والأنشطة التقليدية إلى عمليات رقمية باستخدام التكنولوجيا الحديثة لتحسين الكفاءة وزيادة الإنتاجية والحفاظ على سلامة العاملين، وتعزيز ثقافة السلامة لديهم. يتحقق ذلك من خلال تطوير وتحسين البرمجيات والأنظمة واستخدام التحليلات البيانية والذكاء الاصطناعي والحوسبة السحابية. ومن جانب آخر فإن التحول الرقمي يفرض تحديات ومخاطر إذا لم يتم التعامل معه بعناية أو إذا لم يتم وضع أنظمة احتياطية لضمان استمرارية التشغيل، ووضع استراتيجيات وخطط للتخفيف من المخاطر أو لتقليل العواقب السلبية لها. بالإضافة إلى ذلك، قد تتعطل التقنيات الرقمية الذكية المستخدمة، في حال عدم فاعلية البطاريات أو توقفها عن العمل، أو اشتعال النيران بها أو انفجارها. كما يمكن للماء أن يتسلل إلى بعض الأجزاء الكهربائية، مسبباً حدوث ماس كهربائي أو صدمات كهربائية [2].

ويعد تحديد المخاطر أمراً أساسياً لضمان التصميم والتشغيل الآمن على مختلف المستويات الإنتاجية لتحسين السلامة في منشآت البتروكيماويات التي تنطوي على عمليات تشغيلية معقدة. والقضاء على أي أسباب يمكن أن تؤدي إلى حوادث كبيرة، سواء كانت حرائق أو انفجارا، أو انبعاثات سامة. تستخدم البرامج الرقمية، مثل إنترنت الأشياء الصناعي، والذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة في تعزيز برتوكولات وبرامج السلامة، بينما تسهم تطبيقات تكنولوجيا الاستشعار ومساهمات التوائم الرقمية في تحسين السلامة [3]. وعلى الرغم من أن إجراء تقييم المخاطر قد يكون أمراً شاقًا، إلا أن التطور السريع للتحول الرقمي وتوفر مجموعة من الأدوات الرقمية، فضلاً عن تطبيقات الذكاء الاصطناعي يمكن أن يجعل المهمة أسهل نظراً لقدرتها على تحويل المعلومات الضخمة والأكثر تنوعاً إلى شكل رقمي قابل للتخزين والتصنيف والتحليل، واكتشاف علاقات سببية جديدة في الأنظمة المعقدة، لتقييم وتحليل المخاطر، والحصول على تنبؤات سريعة وأكثر دقة[4].

2 EU-OSHA – European Agency for Safety and Health at Work, Artificial intelligence for worker management: an overview, 2022. h
3 Hossien Abedsoltan, Future of process safety: Insights, approaches, and potential developments, Scienceirect, 2024.
4 SprengerLink, **The Digitalization of Risk Assessment: Fulfilling the Promises of Prediction?2023.**

ومن جانب آخر نظراً لإمكانية خلق تأثير سلبي على البيئة نتيجةً لأنشطة صناعتي التكرير والبتروكيماويات، فإن لدراسات تقييم التأثير البيئي والاجتماعي، والذي يشار إليها أيضاً بإسم تقييم الأثر البيئي **(EIA)** أو التقييم البيئي المتكامل **(IEA)**، أهميةً في اتخاذ قرار تطوير تلك المشروعات من خلال تحديد ومعالجة المخاطر البيئية والاجتماعية والاقتصادية المحتملة للمشاريع. ساهم تطبيق تقنيات التحويل الرقمي لدراسات تقييم الأثر البيئي في إحداث تحول جذري في توفير نظام بيئي عالمي افتراضي من خلال ربط كل المعلومات البيئية المتاحة بنظام معلومات جغرافية مفصل، وضمان توفرها على شبكة الإنترنت ثم دمجها في أرشيف يمكن البحث فيه بسهولة[5]، لاتخاذ القرارات البيئية الحاسمة والتي تعتمد على البيانات والتحليل.

نماذج التحول الرقمي لمنظومة السلامة والصحة والبيئة في الدول الأعضاء في منظمة أوابك

تولي شركات التكرير والبتروكيماويات في الدول الأعضاء في منظمة أوابك أولوية قصوى لتقليل الحوادث الصناعية من خلال تنفيذ مشروعات التحول الرقمي وخطط متطورة للحفاظ على سلامة العاملين، وسلامة العمليات الصناعية طبقا للقوانين والأنظمة وأصول الممارسات المهنية والإجراءات والمعايير المحلية والدولية المعتمدة، بما يضمن التحسين المستمر والحد من الخسائر البشرية أو المالية أو المنشآت والمعدات والمهمات، وباتباع استراتيجيات الوقاية والتخفيف والتأكد من كفاءة الاستخدام الأمثل لها. ولتعظيم الاستفادة والاطلاع على تجارب الآخرين في مجال تنفيذ مبادرات التحول الرقمي لمنظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة استعرضت الدراسة بعض دراسات الحالة وقصص النجاح في الدول العربية الأعضاء في منظمة أوابك والفوائد المحققة من تطبيقها. حيث شهدت بعض الدول العربية عدداً من المبادرات نحو تطبيق التقنيات الرقمية في صناعتي التكرير والبتروكيماويات في عدة مجالات كالمراقبة عن بعد واستخدام الروبوتات والذكاء الاصطناعي وعمليات الصيانة الدورية والتخطيط والبرمجة وتنظيم الدورات التدريبية الافتراضية، وذلك بهدف تحسين كفاءة العمليات الإنتاجية، وخفض الانبعاثات الملوثة للبيئة، وتحسين مستوى الالتزام بمتطلبات الصحة والسلامة المهنية، وعمليات صيانة المعدات الحرجة.

5 Daniel A. Farber, Bringing Environmental Assessment into the Digital Age,2016.

الاستنتاجات والتوصيات

- خلصت الدراسة إلى الاستنتاجات والتوصيات التالية:
- أصبحت التقنيات الرقمية جزءًا لا يتجزأ من إدارة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في المنشآت الصناعية عالية المخاطر، وخاصة صناعة البتروكيماويات.
- مستقبل سلامة العمليات الرقمية مشرقاً، بفضل الأساليب المبتكرة والتقدم الملحوظ الذي تم إحرازه في هذا المجال لمعالجة تحديات الصناعة بشكل مباشر.
- تطبيق التقنيات الرقمية يحقق مكاسب في السلامة والكفاءة، وتقليل التأثير البيئي للصناعة والقدرة على اتخاذ القرارات الفعالة من خلال تعزيز قدرات التكنولوجيا والبيانات.
- تقنيات الذكاء الاصطناعي في برامج الصيانة التنبؤية يتيح الكشف المبكر عن أي أعطال محتملة، وتقليل حالات التوقف غير المخطط لها وتحسين سلامة المعدات والأفراد والبيئة.
- مع تزايد الاعتماد على الأنظمة الرقمية، أصبحت حماية البيانات والمعلومات، والأمن السيبراني ذات أهمية قصوى.
- يضمن التدريب المستمر على التقنيات الرقمية الذكية لمنظومة السلامة، مثل استخدام واقع افتراضي للتدريب على إجراءات الإخلاء والطوارئ، جاهزية العاملين للتعامل مع أي حوادث محتملة.
- تشجيع تنفيذ التحول الرقمي لتحسين دورات وأنظمة العمل ورفع كفاءة العمليات وتحسين الأداء.
- إنشاء منظومة رقمية متكاملة لتحقيق الترابط المطلوب بين أنشطة المنشآة، وإتاحة البيانات لدعم وسرعة اتخاذ القرار والمساعدة في مواجهة الأزمات.
- تطوير استراتيجيات وقائية فعالة عبر التقنيات الرقمية المتقدمة وتطوير استراتيجيات سلامة مبتكرة تعتمد على البيانات والتقنيات الذكية، وتحليل أداء السلامة باستخدام الحلول الرقمية الذكية.
- ضرورة تطوير وتنفيذ إجراءات تشغيل رقمية تضمن تعليمات واضحة وآمنة لإجراء الأنشطة المتعلقة بكل عملية، بما يتوافق مع معلومات سلامة العملية، بالإضافة إلى تصميم استراتيجيات ومبادرات مناسبة للحد من المخاطر، وتنفيذ خطط التخفيف لمواجهة التهديدات السيبرانية وتقليل الاضطرابات التشغيلية ومنعها.

الفصل الأول

تكامل تطور منظومة السلامة مع التطورات الصناعية

الفصل الأول

تكامل تطور منظومة السلامة مع التطورات الصناعية

مقدمة

في ظل التحول الرقمي السريع، أصبحت التقنيات الرقمية عنصرًا أساسيًا في إدارة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة. هذا التقدم يسهم في تمكين الشركات من تطوير استراتيجيات أكثر فعالية وكفاءة للحفاظ على سلامة العاملين وتحسين بيئة العمل. على مر العصور الصناعية، تطورت مفاهيم السلامة من الممارسات التقليدية إلى المفاهيم الحديثة التي تعرف بـ "السلامة 4.0"، وهو تطور ترافق مع مراحل الثورة الصناعية المتعاقبة، بدءًا من الثورة الصناعية الأولى 1.0، مرورًا بالثورتين الثانية والثالثة، وصولاً إلى الثورة الصناعية الرابعة 4.0. هذا التقدم التكنولوجي أدى إلى ظهور جيل جديد من المصانع، التي أُطلق عليها أسماء متعددة مثل "مصانع المستقبل، المصانع الذكية، المصانع الرقمية، المصانع السيبرانية، المصانع المتكاملة، المصانع المبتكرة، ومصانع الجيل الرابع". ومع هذا التوسع التكنولوجي، دخلنا في حقبة جديدة، تعرف بالثورة الصناعية الخامسة 5.0.

تُعتبر صناعة البتروكيماويات من الصناعات المعقدة من حيث التقنيات المستخدمة في العمليات الإنتاجية، سواء كانت كيميائية أو فيزيائية، حيث تتزايد المخاطر الجوهرية[6] والمحتملة[7] نتيجة لظروف التشغيل والإنتاج، بالإضافة إلى الطبيعة الخطرة للمواد الخام الأولية المستخدمة، خاصةً مع تقادم المعدات، وتزايد المتطلبات التكنولوجية والبيئية.

وحيث أن الحوادث الكيميائية، حتى وإن كانت صغيرة، يمكن أن تكون لها عواقب وخيمة تؤدي إلى أضرار جسيمة في الممتلكات والأفراد والبيئة، يصبح من الضروري ضمان توفير بيئة تشغيل آمنة، وتحسين سلامة العمليات، وحماية البيئة، وتقليل المخاطر، والحفاظ على الأصول وصيانتها، والعمل على وضع الحواجز الوقائية (Barriers) والإرشادات والخطط الاستباقية وفقًا لأعلى معايير السلامة العالمية. إضافة إلى استخدام المعدات المتخصصة للتعامل مع المخاطر المرتبطة بالمواد الخطرة القابلة للاشتعال أو المتفجرة، أو التي تتعامل مع ضغوط عالية، بهدف منع أو تقليل تكرار الحوادث الكبرى، أو التخفيف من آثارها في حال حدوثها.

---

[6] "كل ما من شأنه أن يتسبب في إحداث ضرر"
[7] "احتمالية حدوث امر ما، أو ضرر نتيجة الخطر"

1.1. التسلسل الزمني للثورات الصناعية

دائماً ما كان يسبق الثورات الصناعية المختلفة تطورات، وابتكارات علمية وتكنولوجية وتنظيمية. حيث بدأت **الثورة الصناعية الأولى** عام 1750، واعتمدت على استخراج الفحم والمعادن وظهور صناعة النسيج وابتكار المحرك البخاري . ثم تأسست **الثورة الصناعية الثانية**، حوالي عام 1840، واعتمدت على إنتاج الكهرباء والنفط، وبداية ظهور الصناعات الميكانيكية والكيميائية. وظهرت خلالها وسائل الاتصال، ومنها أول خط تلغراف في عام 1833، وظهور الهاتف في عام 1876. كما أصبحت السكك الحديدية وسيلة للنقل العام، وبدأ تشغيل أول خط لتجميع السيارات في عام 1911. ثم بدأت **الثورة الصناعية الثالثة**، حوالي عام 1960 مع ظهور الإلكترونيات "الترانزستورات، والدوائر المتكاملة"، وعلوم الحاسوب، والاتصالات السلكية واللاسلكية، والصناعات السمعية والبصرية. وظهرت **الثورة الصناعية الرابعة** في عام 2010، واعتمدت على الدمج بين نظام جديد يجمع ما بين الإنترنت وبرامج وأجهزة الاستشعار ووسائل الاتصال لإدارة العمليات المعقدة. وتأثر الإنتاج الصناعي بشكل خاص بالأتمتة والروبوتات، وتوقع الأعطال قبل حدوثها، والتعامل معها في الوقت المناسب. ولأول مرة تم ربط الموارد والمعلومات والآلات والأدوات والعمال في شبكة واحدة، وأطلق عليها إنترنت الأشياء الصناعي **Industrial Internet of Things- IIoT**، وما إن بدأ العالم يتوسع في تطبيق الثورة الصناعية الرابعة، وما تبعها من التوسع في تطبيقات تقنيات الأتمتة، والذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، حتى بدأ مفهوم أو حقبة جديدة عام 2020، لتمثل **"الثورة الصناعية الخامسة"**، وهي ثورة توازن ما بين الجانبين العلمي والبشري. وتعتمد على استخدام الذكاء الاصطناعي، والبيانات الضخمة **Big Data**، وإنترنت الأشياء بشكل متزايد مع التركيز على الذكاء البشري بشكل كبير، وفيه يتم توزيع الأدوار ما بين الإنسان والآلة، اعتماداً على التعاون وتنظيم العمل وكافة الأنظمة بينهما. حيث يختص الذكاء الاصطناعي "التكنولوجي" بالأعمال الأكثر تكراراً، ويختص الإنسان بالإبداع البشري. فنجد الروبوتات التعاونية يرتكز عملها على المهام المتكررة أو التي تتطلب مجهوداً عضلياً، وتقليل الأخطاء، وزيادة الإنتاجية، فيما يقوم الإنسان بمهام اتخاذ القرارات والابتكار، والاهتمام بالجانب الفكري والذكاء الاجتماعي، والتميز في المجالات الخدمية، والعمل على تحسين الاستدامة من خلال تحسين العمليات وخفض نسب النفايات المتولدة، مع تنفيذ حلول موفرة للطاقة، فضلاً عن خفض البصمة الكربونية. يبين الجدول (1-1) تسلسل الفترات الزمنية للثورات الصناعية.

الجدول (1-1)

تسلسل الفترات الزمنية للثورات الصناعية

الثورة الصناعية الأولى 1.0	الثورة الصناعية الثانية 2.0	الثورة الصناعية الثالثة 3.0	الثورة الصناعية الرابعة 4.0	الثورة الصناعية الخامسة 5.0
الصناعات الميكانيكية.	الإنتاج بكميات ضخمة، وظهور خطوط التجميع.	الإنتاج التلقائي " الأوتوماتيكي".	التكنولوجيات الحديثة.	التعاون بين الإنسان والروبوت
إنتاج الطاقة البخارية من الفحم.	الطاقة الكهربائية، واستخراج النفط.	ظهور الإلكترونيات، وأنظمة الحاسوب.	إنترنت الأشياء، تكنولوجيا المعلومات، البيانات. السحابية الكبيرة.	النظام المعرفي Cognitive System، والتخصيص
1763 أول محرك بخاري.	1859 اكتشاف أول حقل نفطي في الولايات المتحدة.	1969 أول برمجيات. 1973 الهاتف الجوال. 1989 شبكة الويب العالمية.	علم الروبوتات.	
منتصف 1784، أول ماكينة خياطة.	ظهور الهاتف.	1994 الهاتف الجوال الذكي.	2011 المصانع الذكية.	
1750	1840	1960	2010	2020

المصدر: Ander Laurent, Towards Process safety 4.0 in the factory of the Future,2023.

2.1. تطور مفهوم السلامة

تطور مفهوم السلامة على مر العصور تماشياً مع تقدم الثورات الصناعية، حيث بدأت أولى مفاهيم السلامة المعروفة بـ "السلامة 1.0" في عام 1802 مع إصدار أول قانون في المملكة المتحدة يتعلق بـ "صحة وأخلاق المتدربين". كما أسهمت المراسيم الإمبراطورية الفرنسية الصادرة بين عامي 1810 و1811 في وضع القواعد التنظيمية الأولى المتعلقة بالمخاطر البشرية في المصانع. تناول مرسوم عام 1810 تنظيم مصانع وورش العمل التي كانت تطلق روائح كريهة أو مزعجة، واعتُمد تصنيف للمصانع إلى ثلاث فئات بناءً على نوع النشاط الذي تقوم به. الفئة الأولى ضمت نحو 11 صناعة، مثل صناعة التذهيب وصناعة الصابون، التي تم تصنيفها على أنها تتماشى مع المنشآت الحضرية. أما الفئة الثانية فقد شملت 23 نوعاً من الصناعات التي تتطلب بعض المراقبة الإدارية فقط، مثل صناعة الشموع

والرصاص، إلى جانب المسابك ومصاهر الحديد. أما الفئة الثالثة فشملت الصناعات الخطرة أو غير الصحية التي تتم في مناطق بعيدة عن التجمعات السكنية، مثل مصانع رماد الصودا، والورنيش، وأملاح الأمونيوم، وحمض الكبريتيك، حيث شملت 31 نشاطاً.

في عام 1811، تم إصدار مرسوم إمبراطوري آخر لتشكيل فرقة "إطفاء باريس" لمكافحة الحرائق. وبذلك، كانت هذه المراسيم بمثابة الأساس للعديد من اللوائح والإجراءات التي سيتم وضعها لاحقاً لتنظيم السلامة في المنشآت الصناعية.

أما مرحلة "السلامة 2.0"، فقد شهدت وقوع العديد من الحوادث الكبرى نتيجة لتطور التكنولوجيا التي لم تكن بعد متوافقة مع احتياجات الصناعات، حيث كانت المعدات في كثير من الأحيان مصممة بشكل غير ملائم. أدى ذلك إلى وقوع حوادث كارثية بسبب فشل في أوعية الضغط أو الآلات الدوارة. من أبرز هذه الحوادث كانت كارثة منجم "كوريير" في 1906، التي تعد أكبر كارثة في مجال التعدين في أوروبا، وكذلك الانفجارات التي وقعت في مصانع الأسمدة في ألمانيا عام 1921، وكارثة "ميناماتا" الصحية بسبب التسمم بالزئبق في 1932، بالإضافة إلى حادثة مصنع البارود في تكساس عام 1947.

ساهمت نتائج تحليل أسباب هذه الحوادث الكارثية في تطوير تصميمات عمليات أكثر أماناً، وفي تطوير معايير وتقنيات أمان جديدة. من بين هذه التطورات كانت معايير التوحيد القياسي في صناعة البتروكيماويات التي وضعها "معهد البترول الأمريكي(API) "، والتي قدمت لوائح لتصميم المعدات والأجهزة الأكثر أماناً في الصناعة. بذلك، بدأ يظهر عصر التكنولوجيا المتقدمة والمعايير المنظمة للسلامة، حيث تم التركيز بشكل أكبر على ضمان سلامة العمليات والمعدات.

نظرًا لصعوبة منع الحوادث دون فهم عميق لأسبابها، أدركت الصناعة أهمية العامل البشري في هذا السياق. ومن هنا ظهرت عدة نظريات تناولت أسباب الحوادث وعواملها، أبرزها **نظرية السبب الواحد للحوادث** التي ظهرت في عام 1931. هذه النظرية أكدت على أن "العامل البشري هو السبب الوحيد لأي إصابة أو حادث"، مشيرة إلى أن التصرفات البشرية غير السليمة هي المسئولة بشكل رئيسي عن الحوادث.

كما ظهرت **نظرية التعرض للحوادث** التي تنص على أنه في أي مجموعة من العمال، هناك فئة فرعية هي الأكثر عرضة للتعرض للحوادث. وتبنت هذه النظرية فكرة أن بعض الأفراد يكونون أكثر عرضة للوقوع في الحوادث نتيجة لخصائص معينة في سلوكهم أو بيئتهم.

وفي نفس العام، تم تطوير **قوانين هاينريش** التي سلطت الضوء على أهمية تحديد المخاطر المحتملة قبل وقوع الحوادث الكبيرة. وقد نصت هذه القوانين على أن "كل حادث كبير يتسبب في إصابات قوية يقابله 29 حادثًا صغيرًا يؤدي إلى إصابات طفيفة، وحوالي 300 حادثة على وشك الوقوع"، وهذه الحوادث الأخيرة تُعرف بالحوادث "التي كادت أن تحدث" أو **Near Misses**، وهي الحوادث التي لم تؤدي إلى إصابات، ولكن كان من الممكن أن تتسبب فيها.

في نفس السياق، ظهرت **نظرية الدومينو** في عام 1931، التي تعد نموذجًا لفهم تسلسل الأسباب والنتائج في الحوادث. تفترض هذه النظرية أن الحوادث تحدث نتيجة لتفاعل تسلسلي، حيث يؤدي تغيير صغير إلى حدوث تغييرات مماثلة في العناصر المجاورة، مما يؤدي إلى سلسلة من الأحداث المؤدية إلى الحادث. وبالتالي، فإن منع الحوادث يتطلب القضاء على العوامل المسببة على طول هذه السلسلة، حيث يمكن لكل تغيير صغير أن يتسبب في تأثيرات كبيرة.

أما **نظرية السببية المتعددة**، فهي امتداد لنظرية الدومينو، حيث تفترض أن الحادث الواحد يمكن أن يحدث نتيجة لتضافر العديد من العوامل والأسباب الفرعية. وبالتالي، فإن الحوادث ليست نتاجًا لعامل واحد فقط، بل هي نتيجة تفاعل عدة أسباب قد تكون ظاهرة أو خفية.

أخيرًا، ظهرت **نظرية التسلسل الهرمي للحوادث**، التي تسلط الضوء على العلاقة بين الحوادث الكبيرة والصغيرة. هذه النظرية تشير إلى أنه غالبًا ما تكون الحوادث الصغيرة) مثل الحوادث التي تُصنف على أنها إصابات طفيفة أو ("Near Misses" هي إشارات تحذيرية لوجود مشاكل أكبر قد تؤدي إلى حوادث أكبر في المستقبل إذا لم يتم معالجتها.

غَير عام 1970 بشكل جذري تاريخ سلامة العمال وصحتهم بشكل عام، بالإضافة إلى دور مدير السلامة بشكل خاص. ففي هذا العام، تم إقرار "قانون السلامة والصحة المهنية "الذي أسس الإدارة الفيدرالية للسلامة والصحة المهنية(OSHA) ، والتي مُنحت السلطة لتحديد معايير إلزامية تساهم في تحسين بيئة العمل والحفاظ على سلامة العمال. كان لهذا القانون تأثير كبير على دور مدير السلامة في

ذلك الوقت، حيث أصبح مسؤولي السلامة ملزمين بتنفيذ هذه المعايير وضمان الامتثال لها داخل المنشآت.

كما عملت العديد من المراكز والمنظمات العالمية على وضع المعايير والأنظمة التي تهدف إلى الحد من المخاطر والإصابات وتعزيز سلامة العمليات. من بين هذه المنظمات كان المعهد الأمريكي للمهندسين الكيميائيين(AIChE) ، الذي اعتبر "سلامة العمليات" أحد الركائز الأساسية في مجال الهندسة الكيميائية. وبفضل هذا التوجه، تم تأسيس قسم "السلامة والصحة المهنية وسلامة العمليات "في المعهد عام 1979، مما عزز الاهتمام بسلامة العمليات في الصناعات الكيميائية وأدى إلى تحسين ممارسات السلامة بشكل عام في هذا القطاع.

في فترة السلامة 3.0، التي امتدت من الستينيات حتى الثمانينيات من القرن الماضي، شهدت معدلات الحوادث انخفاضًا كبيرًا مقارنة بالفترات السابقة. رغم ذلك، وقعت العديد من الحوادث المأساوية التي كانت لها آثار سلبية وكارثية على سلامة الإنسان والممتلكات والبيئة. هذه الحوادث دفعت إلى إعادة النظر في ممارسات إدارة المخاطر، مما أدى إلى التحول نحو "أنظمة إدارة الصحة والسلامة والبيئة(HSE) "، التي بدأت تحظى باهتمام كبير على الصعيدين المحلي والدولي.

أحد أبرز الحوادث التي حدثت في تلك الفترة كان حادث مصنع "Nypro" في "فليكسبورو " (Flixborough)بالمملكة المتحدة عام 1974. وقع انفجار كارثي نتيجة لتسرب كميات ضخمة من الهكسان الحلقي، تراوحت بين 25 - 50 طنًا، وهو ما شكّل خليطًا قابلًا للاشتعال. أدى هذا التسرب إلى انفجار ضخم مصحوب بعدد من الحرائق التي استمرت لمدة 10 أيام. أسفر الحادث عن خسائر فادحة في الأرواح والممتلكات داخل الموقع وخارجه. تضرر نحو 1821 منزلًا و167 محلًا تجاريًا ومصنعًا بدرجات متفاوتة، ووصلت قيمة الخسائر إلى نحو 232مليون دولار في ذلك الوقت.

ساهم هذا الحادث في تعزيز الحاجة لتطبيق معايير أكثر صرامة في إدارة السلامة والبيئة، وأدى إلى تطور أنظمة الصحة والسلامة المهنية، خاصة في الصناعات ذات المخاطر العالية مثل الصناعة الكيميائية [8]. يبين الشكل (1-1) حجم الدمار الناتج عن كارثة مصنع فليكسبورو في المملكة المتحدة.

[8] K S N Raju, Chemical Process Industry Safety,2014.

الشكل (1-1)

حجم الدمار الناتج عن كارثة مصنع فليكسبورو في المملكة المتحدة

المصدر: Major Industrial Accidents

في منتصف الثمانينيات، وبعد سلسلة من الحوادث الكيميائية الخطيرة التي وقعت في مختلف أنحاء العالم، وقع حادث كارثة انفجار مصنع المبيدات لشركة يونيون كاربيد في الهند عام 1984، والذي يعد من أسوأ الحوادث الصناعية في التاريخ. كانت الكارثة نتيجة لتسرب نحو 40طنًا من غازات سيانيد الهيدروجين والفوسجين، وهي غازات شديدة السُمية وأثقل من الهواء، مما أدى إلى استقرارها على ارتفاعات منخفضة بالقرب من سطح الأرض.

تسبب هذا التسرب في وفاة حوالي 16ألف شخص، بينما أصيب ما بين 150إلى 600 ألف شخص بإصابات متعددة نتيجة تعرضهم للغازات السامة. كانت آثار الكارثة بعيدة المدى، حيث دمرت البيئة المحيطة بالمصنع وتسببت في مشكلات صحية مستمرة للسكان. كما قدرت الخسائر المالية الناجمة عن الحادث بحوالي **مليار دولار**. يبين الشكل (1-2) بقايا مصنع " يونيون كربيد" للمبيدات الحشرية في الهند عام 1984.

الشكل (1-2)

بقايا مصنع " يونيون كاربيد" للمبيدات الحشرية في الهند عام 1984

المصدر: Major Industrial Accidents

في عام 1984، وقع **انفجار محطة PEMEX لغاز البترول المسال** في **مكسيكو سيتي** بالمكسيك، بعد 25 عامًا من تشغيل المحطة. وعلى الرغم من أن المحطة كانت قد صُممت وفقًا للمواصفات العالمية **API** في ذلك الوقت، إلا أنها كانت تعاني من مشاكل كبيرة تتعلق بصيانة المعدات وتنظيمها. فقد كانت عمليات الصيانة ضعيفة، وكان هناك تكدس في المعدات بسبب سوء التنظيم، بالإضافة إلى ضعف تدريب الفنيين والمختصين الذين كانوا مسؤولين عن تشغيل وصيانة المنشأة.

بدأ الحادث بكسر غير ملحوظ في أنبوب يمتد بطول حوالي 20 سم ويربط بين محطة معالجة الغاز الطبيعي وعدد من الخزانات. أدى هذا الكسر إلى تسرب غاز البترول المسال لمدة تراوحت بين **5 إلى 10 دقائق**، مما نتج عنه تكوّن **سحابة غازية** بارتفاع حوالي **2 متر** تغطي مساحة تُقدر بحوالي **200 × 150 م**. وعندما وصلت السحابة الغازية إلى **برج الشعلة**، وقع الانفجار الأول.

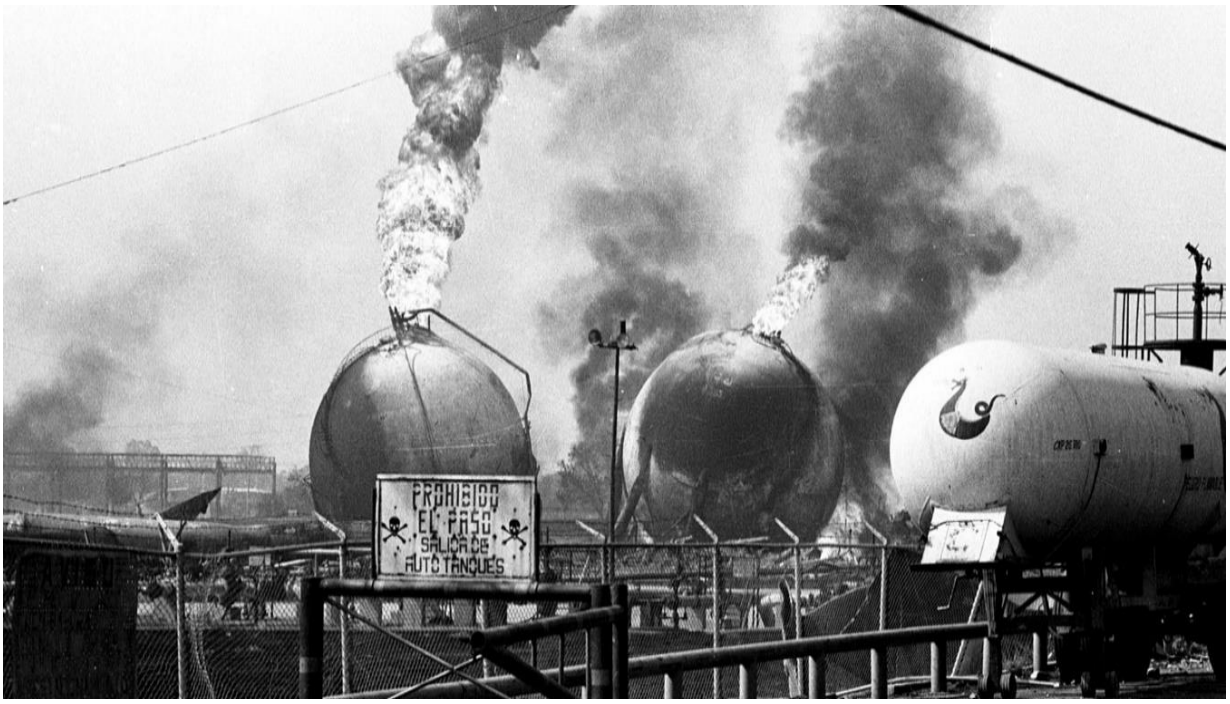
ومع تأخر إجراءات الإغلاق الطارئ، تفاقم الوضع بسرعة. أدى التسرب والانفجارات المتوالية إلى سلسلة من الانفجارات في مجموعة من الخزانات **Vessels** بطريقة متتابعة على غرار **"سلسلة الدومينو"**، مما ساهم في زيادة انتشار الغاز المحترق. استمرت الانفجارات لمدة تقارب **ساعة ونصف**،

مما أسفر عن **مقتل حوالي 550 شخصًا** وإصابة **حوالي 10 آلاف شخص** بإصابات متنوعة. كما تم إجلاء حوالي **200ألف شخص** من المنطقة المحيطة بالموقع.

كان هذا الحادث من أبرز الكوارث الصناعية التي سلطت الضوء على أهمية تحسين **أنظمة الصيانة، تدريب العاملين**، و **إجراءات الاستجابة للطوارئ** في المنشآت الصناعية، لا سيما في صناعات الغاز والنفط، حيث يمكن أن تكون الحوادث الكارثية ذات تأثيرات كبيرة على الأرواح والممتلكات. يبين الشكل (3-1) انفجار خزانات الغاز في محطة **PEMEX** لغاز البترول المسال في المكسيك عام 1984.

الشكل (3-1)

انفجار خزانات الغاز في محطة PEMEX لغاز البترول المسال في المكسيك عام 1984



المصدر: https://ejatlas.org/conflict/explosiones-de-san-juan-ixhuatepec-de-1984-mexico

بدأت الحكومات والشركات والصناعات في تركيز جهودها في مجال تحسين التكنولوجيا والعوامل البشرية للوقاية من الحوادث، وعملت على تحديد "أنظمة الإدارة" باعتبارها السبب الرئيسي وراء الحوادث الصناعية. كما عملت الشركات الصناعية على تطوير السياسات ونشر المعايير لتسريع اعتماد نهج أنظمة "الإدارة لسلامة العمليات"، حيث ركزت الممارسات السابقة بشكل كبير على الإجراءات التصحيحية التي تعتمد بشكل كبير على تاريخ الحوادث، والدروس المستفادة منها. وأدى تحليل

الحوادث إلى وضع لوائح السلامة وقواعد الممارسة. كما أنشئ مركز سلامة العمليات الكيميائية "**Center of Chemical Process Safety- CCPS**"[9] التابع للمعهد الأمريكي للمهندسين الكيميائيين في عام 1985، كتحالف صناعي يُعنى بنشر وتطوير المعلومات الفنية لاستخدامها في الوقاية من الحوادث الكيميائية الكارثية وتجنبها أو التخفيف من آثارها، بما في ذلك سلامة العمليات لمجموعة المرافق التي تشمل أنشطة مناولة، أو تخزين أو استخدام أو معالجة، أو نقل مواد كيميائية خطرة، مع العمل على تحديد، وتطوير متطلبات وإرشادات وتوجيهات لها تطبيقات مفيدة ومجربة في الصناعة. وبدأ نهج جديد يتضمن توقع الحوادث الخطرة قبل وقوعها، كما ساهم زيادة الوعي بمخاطر المنشآت الصناعية من قبل المجتمع والإدارات في تحسين معايير السلامة إلى حد كبير.

وعلى الرغم من وجود معايير الصحة والسلامة المهنية، وأنظمة وأدوات إدارة المخاطر، إلا أنها لم تطبق بشكل علمي وفعال، فقد وقعت حوادث متعددة مثل حادثة انفجار الغاز في مصنع Esso للغاز الطبيعي في عام 1988 في مدينة "لونغفورد" في أستراليا. كما وقع حدث انفجار في منصة **Piper Alpha** البحرية في المملكة المتحدة عام 1988، والذي يعتبر أسوأ كارثة نفطية بحرية في العالم. حيث قام الفنيون بفحص أكثر من 100 صمام أمان ضمن أعمال الصيانة الدورية، إلا انه لم يتم استبدال صمام واحد فقط على سبيل الخطأ. ثم تم تشغيل مضخات الغاز السائل، وفي غضون ساعتين، اشتعلت النيران في المنصة التي يبلغ ارتفاعها 200 قدم وانهارت، مما أسفر عن وفاة حوالي 167 عاملاً. وتسبب في خسائر وأضرار بقيمة حوالي 3.4 مليار دولار. بالإضافة إلى حادثة انفجار مصفاة "تكساس سيتي" في عام 2005، وحادثة انفجار منصة حفر "ديب ووتر هورايزون" في عام 2010. يبين الشكل (1-4) كارثة اشتعال النيران في منصة **Piper Alpha** البحرية.

[9] يضم المركز في عضويته أكثر من 150 شركة "عضو" حول العالم.

الشكل (1-4)

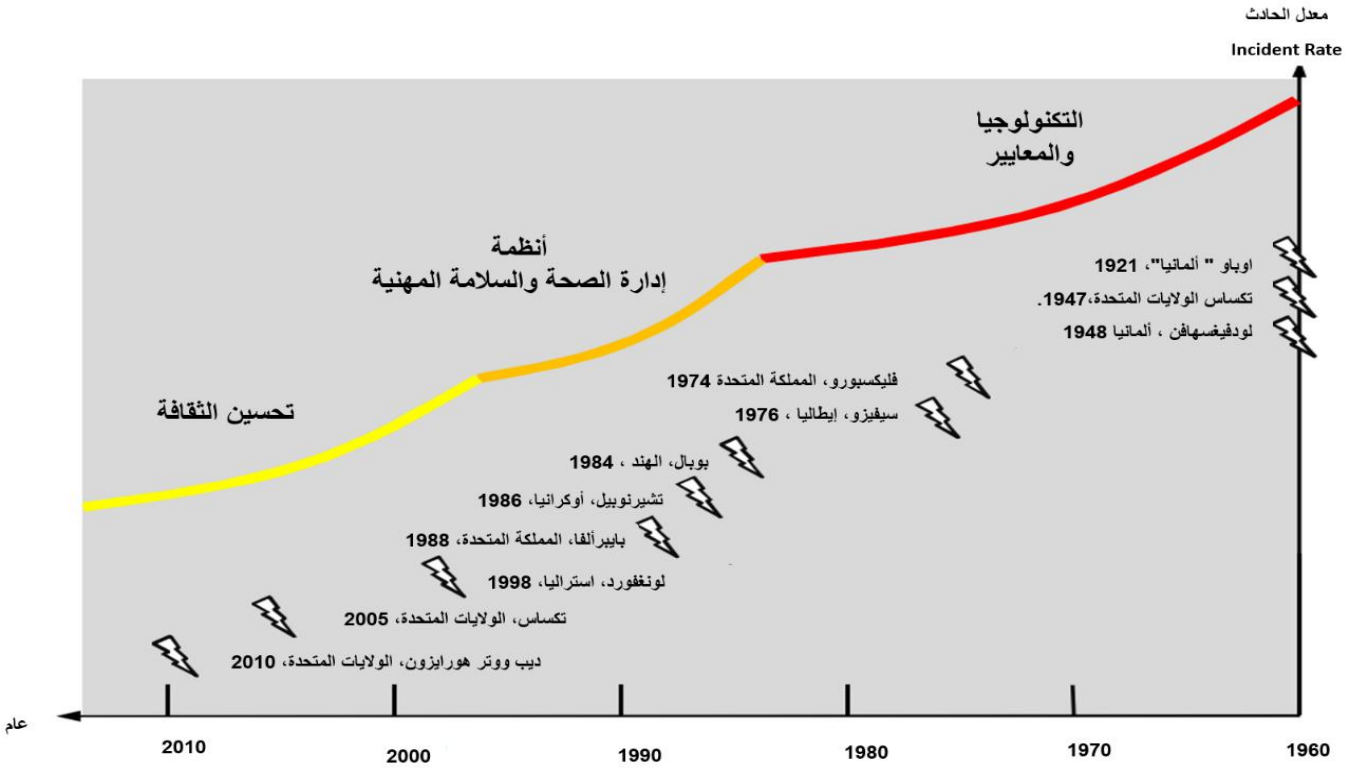
كارثة اشتعال النيران في منصة Piper Alpha البحرية

المصدر: Offshore Technology,2019

تبين من خلال تلك الحوادث أن مخاطر سلوك العاملين هي جزء من صورة أكبر ولا يمكن تجنبها بمجرد وجود نظام إدارة الصحة والسلامة والبيئة. وبالتالي، منذ بداية القرن الحادي والعشرين، تم توجيه الجهود البحثية في الصناعة نحو تطوير الأساليب التي تعزز الدافع الجوهري للسلوك الآمن. وتعترف هذه الجهود بأن تفعيل نظام إدارة الصحة والسلامة والبيئة يتطلب أكثر من مجرد إجراءات مكتوبة، ويتطلب نهجاً نظامياً "**لتحسين ثقافة السلامة**". كما يجب على المنشأة أن تتفهم أساسيات السلوك البشري لتوفير بيئة يتصرف فيها الموظفون بأمان ويطبقون تقنيات إدارة المخاطر المتاحة. كان نتاج ذلك أحد أهم التطورات في هذا المجال وهو برنامج "القلوب والعقول **Hearts and Minds**، التابع لشركة**Shell Dutch Royal**، والذي يقدم مجموعة متنوعة من الأدوات لتعليم أساسيات تغيير و**تحسين ثقافة السلامة**، بمراحله المختلفة بدءاً من التصميم إلى التنفيذ والمراجعة. يبين الشكل (1-5) التطور المفصلي للسلامة في الصناعات البترولية.

الشكل (1-5)

التطور المفصلي للسلامة في الصناعات البترولية



المصدر: Adapted from (Zijker, 2004, p. 1). Similar graphical representations are provided by (Hollnagel, 2004, p. 46), (Hudson, 2001, p. 15) and (Kettering & Pasman, 2009, p. 165).

فشل تطبيق التكنولوجيا، والأخطاء البشرية، وفشل نظام الإدارة، إلى جانب الظروف الخارجية والظواهر الطبيعية، تُعد من أبرز الأسباب الرئيسية للحوادث في المنشآت الصناعية. ومع تحول العالم نحو الثورة الصناعية الرابعة (4.0)، التي تعتمد على التحول الرقمي، ظهر مفهوم "المصانع المستقبلية" أو مصانع الجيل الرابع، التي تدمج التقنيات الرقمية في العمليات الإنتاجية. هذا التحول الرقمي لا يقتصر فقط على تطوير العمليات الجديدة أو إعادة هيكلة العمليات القائمة، بل يتضمن أيضًا تحسين طرق جمع البيانات ومعالجتها، مما يساعد في تقليل المخاطر وتحسين سلامة العمليات. من خلال هذا التكامل الرقمي، يمكن تحديد الوحدات الإنتاجية الأكثر عرضة للمخاطر، التنبؤ بالأعطال المستقبلية، والاستعداد بالسيناريوهات الاستباقية لتجنب الحوادث.

من جهة أخرى، في إطار التحول الرقمي وتعزيز السلامة الصناعية، أصدرت المفوضية الأوروبية في 2012 توجيهًا جديدًا تحت اسم "سيفيسو 3(Seveso III) "، الذي دخل حيز التنفيذ في 2014، للسيطرة على أخطار الحوادث الكبرى الناجمة عن المواد الخطرة. يساهم هذا التوجيه في تحسين آليات

الوقاية والتحكم في الحوادث الصناعية الكبرى من خلال تكنولوجيا المعلومات والبيانات الرقمية، بما يعزز قدرة المنشآت الصناعية على التنبؤ بالمخاطر والتعامل معها بكفاءة أكبر. كما تم نشر "قواعد ومعايير الرابطة الوطنية للحماية من الحرائق" للحد من آثار الحوادث الكبرى على صحة الإنسان والبيئة، بما يتماشى مع الأهداف الرقمية الحديثة في تعزيز الأمن الصناعي وتقليل التلوث.

لضمان سلامة العمليات في ظل الاعتماد المتزايد على الإنترنت في عمليات التشغيل والمراقبة والعمليات الحيوية الأخرى، عملت الشركات والمنشآت على حماية أعمالها من الاختراقات والتهديدات الخارجية المدمرة من خلال تطبيق وتفعيل منظومة الأمن السيبراني ودمجها في برامج السلامة والصحة المهنية .(Occupational Safety and Health - OSH) وفي هذا السياق، اعتمدت منشآت الجيل الرابع أو "مصانع المستقبل" على نهج جديد ومتطور للسلامة، يعتمد على التقنيات الرقمية الحديثة المستخدمة في الصناعة 4.0، وظهور مفهوم "المصنع الذكي"، الذي أصبح بديلاً عن النهج التقليدي.

يتضمن هذا النهج الجديد توظيف التقنيات المبتكرة، مثل تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، لرقمنة المعلومات ودمج النظام في جميع مراحل دورة حياة المنتج، مما يساهم في ربط الآلات والمنتجات والأشخاص داخل المنشأة، وكذلك ربط الشركة بالعملاء والموردين. كما يعتمد هذا النموذج على المحاكاة والنمذجة الافتراضية في عمليات التصميم والإنتاج، بالإضافة إلى جمع البيانات وتحليل البيانات الضخمة وتطبيقها داخل أنظمة السحابة.

من جانب آخر، تم تقييم حلول الواقع الافتراضي كأداة لتعزيز سلامة المصانع الكيميائية، حيث أظهرت التجارب أن هذه التكنولوجيا توفر بيئة آمنة وفعّالة للتدريب والمحاكاة. إلى جانب ذلك، أظهرت الحلول القائمة على الواقع المعزز أن المشاركين ينظرون إلى التكنولوجيا بشكل إيجابي، مع إمكانية تحسين هذه الحلول بشكل كبير باستخدام مفهوم "إنترنت الأشياء(IoT) "، مما يعزز القدرة على مراقبة العمليات بشكل دقيق، وتحقيق استجابة أسرع في مواجهة المخاطر المحتملة.

تم الإشارة إلى عصر "**السلامة 4.0**" لأول مرة عام 2019 في هولندا خلال الندوة الدولية السادسة عشرة التي عقدها الاتحاد الأوروبي للهندسة الكيميائية "**EFCE**" لمنع الخسائر، وعُرفت بأنها تغيير استباقي في علم سلامة العمليات والعمل، الذي يركز على مرونة الأنظمة وإدارة المخاطر الديناميكية. يبين الجدول (1-2) لمحة تاريخية عن تطور السلامة.

الجدول (1-2)

لمحة تاريخية عن تطور معايير السلامة

السلامة 1.0	السلامة 2.0	السلامة 3.0	السلامة 4.0
1802 " صحة واخلاق المتدربين)، بريطانيا	1931 نظرية سببية الحوادث- قوانين هاينريش- مفهوم هرم الحوادث	HAZOP 1965 US OSHA1969 HAZAN 1971 ALARP 1974	أسلوب منهجي Systemic Approach التعقيد Complexity الصمود Resilience
1810 المرسوم الإمبراطوري بشأن الروائح الكريهة.	1620-1940 مبدأ السببية البسيطة	ICEP1976 ISD 1978 SMS1989	HOF
1811 تكوين فرق الإطفاء في فرنسا	1950 نموذج الدومينو	LOPA 2000 Seveso I 1982 Seveso II 1989 PPRT 2003	2012 سيفيسو III

1750		1800		1840		1960		2010
	1800		1900		2000			2050

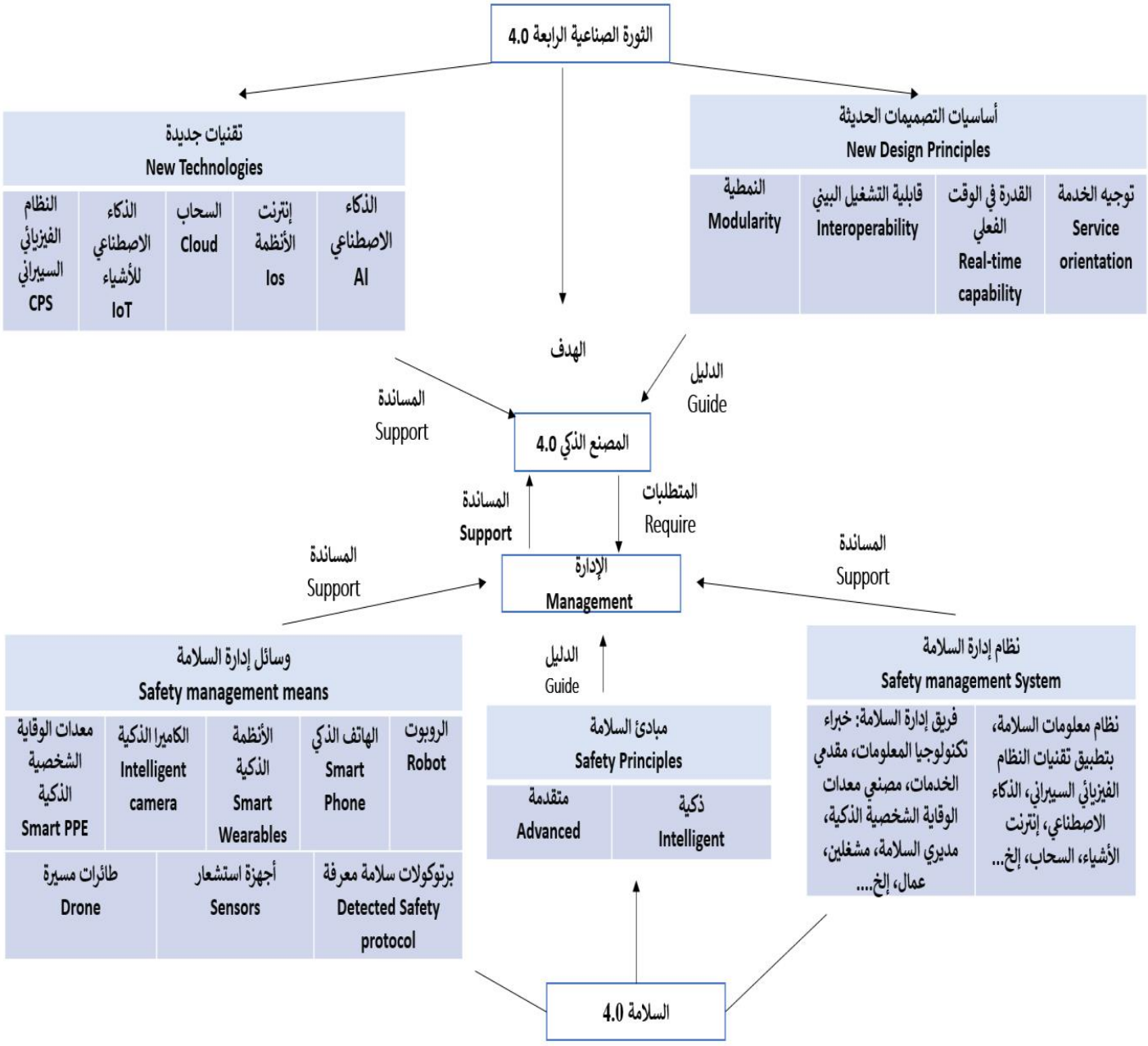
المصدر: Ander Laurent, Towards Process safety 4.0 in the factory of the Future,2023.

3.1. تكامل الثورة الصناعية 4.0 ومفهوم السلامة 4.0

هناك العديد من الأدبيات التي تناولت وأشارت إلى الثورة الصناعية الرابعة ودور التقنيات الرقمية الجديدة كمحرك رئيسي لها. إلا أن هناك عدداً قليلاً من الأدبيات التي تناولت مفهوم السلامة 4.0، وعدداً محدوداً أشار إلى السلامة ضمن سياق الثورة الصناعية الرابعة من وجهة نظر السلامة والصحة المهنية وسلامة العمليات. ولدمج مفهومي الثورة الصناعية الرابعة، والسلامة 4.0، اقترح المفكر والعالم" ليو" وآخرون في عام 2020، إطاراً لدمج المفهومين معاً بحيث تُدمج التقنيات الرقمية الحديثة، مع مبادئ ونظام ووسائل إدارة السلامة، مع التركيز على الجوانب الرقمية المتقدمة والذكية كنموذج جديد لإدارة السلامة، كما هو مبين في الشكل (1-6).

الشكل (1-6)

مخطط تكامل إطار عمل بين المصنع الذكي وإدارة السلامة 4.0



المصدر: Ander Laurent, Towards Process safety 4.0 in the factory of the Future,2023.

إن استخدام التقنيات الرقمية الجديدة لا يخلو من المخاطر، ويجب إجراء تقييم ودراسة المخاطر القائمة وإمكانية زيادتها أو احتمالات ظهور مخاطر جديدة. وهناك العديد من تدابير الحماية التقليدية المعمول بها في المنشآت الصناعية لمنع المخاطر المحتملة، خاصة أنظمة التحكم المتقدم في العمليات **Advanced Process Control -APC**، وأنظمة ضبط الضغوط المستخدمة، وأنظمة التشغيل التلقائي. ومع ذلك، لا تزال هناك حوادث تتعلق بسلامة العمليات، وقد تكون أكثر تكراراً أثناء مراحل بدء التشغيل

للمنشأة، أو ما قبل التشغيل، حيث يتم خلال هذه الفترات إلغاء تنشيط معظم أنظمة التحكم المتقدمة، نظراً لإتمام العمليات التشغيلية يدويا. وقد يتم إيقاف تفعيل الإنذارات أو تجاهلها، خاصةً أن تصميم هذه التحذيرات تكون لمراقبة الأعطال بعد العمليات التشغيلية المستمرة، وبعد الانتهاء من فترات التجارب التشغيلية.

4.1. الدروس المستفادة

أسفرت نتائج التحقيقات في الحوادث الكارثية عن عدة عوامل مشتركة، منها غياب ثقافة السلامة والأمن الصناعي لدى العاملين، وعدم كفاية البرامج التدريبية المتخصصة، وغياب منظومة تحليل مخاطر العمليات، فضلاً عن سوء أعمال الصيانة والفحص الروتيني للمعدات الحيوية، والاعتماد على أنظمة تحكم غير موثوقة، بالإضافة إلى نقص في الخطط الاستباقية للاستجابة السريعة في حالات الطوارئ. هذه العوامل أدت إلى ضرورة إعادة التفكير في تطوير ممارسات إدارة المخاطر، مما ساهم في ظهور "أنظمة إدارة الصحة والسلامة والبيئة (HSE) "كإطار شامل ومنظم لتحديد معايير السلامة وتقييم المخاطر وإدارتها.

وفي ظل التحول الرقمي، أصبح من الضروري دمج التقنيات الحديثة في أنظمة الصحة والسلامة والبيئة لتحسين الكفاءة والفعالية. فالتكنولوجيا الرقمية، مثل تحليل البيانات الضخمة، وإنترنت الأشياء (IoT)، والذكاء الاصطناعي، توفر أدوات قوية لرصد وتحليل المخاطر بشكل مستمر، وتحسين أداء أنظمة التحكم. كما أن تطبيق أنظمة متكاملة لإدارة الصحة والسلامة والبيئة باستخدام الحلول الرقمية يساعد في تحديد السياسات والمعايير التي تحدد كيفية التعامل مع المخاطر، ويعزز القدرة على الاستجابة السريعة للطوارئ من خلال تنبؤات دقيقة ومحاكاة للمخاطر.

الفصل الثاني

التحول الرقمي وتعزيز سلامة العمليات

الفصل الثاني
التحول الرقمي وتعزيز سلامة العمليات

مقدمة

في ظل تسارع التحول الرقمي، أصبحت التقنيات الرقمية جزءًا أساسيًا من تعزيز فعالية العمليات وسلامتها. تساهم هذه التقنيات في تمكين المؤسسات من الانتقال بسلاسة من الأنظمة التقليدية إلى الأنظمة الرقمية المتطورة، عبر الاستفادة من البيانات الذكية ودمج الأدوات والبرمجيات الرقمية ضمن استراتيجيات السلامة. وبالتالي، يتم تحليل المخاطر وفقًا للمعايير الدولية، مما يعزز الكفاءة والقدرة على التكيف مع التحديات المستقبلية. كما يُعتمد على هذه التقنيات في تعزيز ثقافة السلامة وتطوير المهارات لتأمين بيئة عمل أكثر أماناً. ومن جانب آخر يعتمد الإنتاج في صناعتي التكرير والبتروكيماويات، وخاصة مجمعات البتروكيماويات على مجموعة من الإجراءات والعمليات المُعقدة لتحويل المواد الخام الأولية إلى منتجات ذات قيمة اقتصادية عالية. وتشكل سلامة العمليات ضمانة للشركات لتقليل الحوادث الصناعية. تطورت إدارة سلامة العمليات جنباً إلى جنب مع تطور التكنولوجيا التي تدعمها. حيث قدمت التكنولوجيا مجموعة من الحلول لتعزيز سلامة العمليات، وتمكين المشغلين بتوقع الأعطال المحتملة من خلال مراقبة تشغيل المعدات بشكل مستمر ومقارنتها بنظيراتها الافتراضية. حيث ساهم إدخال البيانات التشغيلية التاريخية وتطبيق طرق التحليل المتقدمة للبيانات والتعلم الآلي، في إحداث ثورة في كيفية توقع المخاطر في سلامة العمليات وإدارتها، كتقليل احتمالية حدوث تسربات كيميائية عرضية وغيرها من الحوادث. وتم استخدام إنترنت الأشياء (IoT) في أنشطة المراقبة على العمليات الصناعية. وتمكنت أجهزة الاستشعار في الأنظمة والمعدات من تتبع العمليات الحيوية، كمراقبة الضغط ودرجة الحرارة وتركيزات المواد الكيميائية. كما يمكن تطبيق تقنية "التوائم الرقمية" باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في الصيانة التنبؤية. ليعمل كنظام إنذار مبكر، وفيه يعتمد مديرو سلامة العمليات على مجموعة من الأدوات البرمجية بدلاً من الطرق التقليدية المستخدمة تسمح لهم بنمذجة البيئات الصناعية ومحاكاة العمليات الصناعية للحصول على صورة أكثر شمولاً ودقة لجميع

نقاط الضعف في النظام والتعرف على المخاطر المحتملة[10]. وبما يسمح لموظفي السلامة باكتشاف الانحرافات عن ظروف التشغيل العادية واتخاذ الإجراءات الفورية التصحيحية، واتباع نهج استباقية للصيانة وتخفيف المخاطر. هذا ويعد الأمن الصناعي جزءًا أساسياً من إدارة سلامة العمليات الصناعية الفعالة، وهو عبارة عن مجموعة من التدابير والسياسات لحماية العمال والمعدات والموارد، ولتقليل المخاطر والحوادث وضمان السلامة واستمرارية العمليات الصناعية، وحماية البيئة.

1.2. سلامة العمليات

تعد حوادث سلامة العمليات من الحوادث الكارثية التي تتضمن تسرب أو فقدان مواد خطرة، ما يؤدي إلى تداعيات صحية وبيئية خطيرة، بالإضافة إلى الإصابات أو الوفيات وفترات توقف في الإنتاج. أحد التحديات الرئيسية في الوقاية من هذه الحوادث في المصانع هو غياب نظام متكامل يأخذ في اعتباره المخاطر الناتجة عن أوجه القصور أو الانحرافات في حواجز السلامة"**Safety Barriers**" ، مما يعرقل اتخاذ قرارات تشغيلية فعّالة. وقد أظهرت دراسات وتقارير التحقيق في الحوادث الكبرى أن المصانع التي تعرضت لهذه الحوادث كانت تعاني من ضعف في حواجز السلامة أثناء عمليات التشغيل، حيث تجاهل المشغلون إما العلامات التحذيرية أو تعاملوا معها بشكل غير صحيح. في العديد من الحالات، تتراكم مخاطر سلامة العمليات تدريجيًا قبل وقوع الحوادث الكبرى، إلا أن مشغلي المصانع لا يدركون تأثير هذه الانحرافات على "المخاطر التراكمية"، وذلك بسبب نقص الأنظمة الاستباقية لمراقبة وإدارة حواجز السلامة المعيبة.

إن غياب نظام يضمن توفير معلومات كافية للإدارة العليا حول المخاطر، ويتيح اتخاذ القرارات التشغيلية التصحيحية في الوقت المناسب، يشكل أحد العوائق الرئيسية في تجنب حوادث سلامة العمليات الكبرى. إضافة إلى ذلك، يؤدي تداخل عمليات الصيانة إلى تغيّر في بيانات الإضرار بحواجز السلامة مع مرور الوقت، مما يعني أن مستويات المخاطر ليست ثابتة. هذا يقتضي وجود برامج ذكية، مثل الذكاء الاصطناعي، التي تتيح جمع الأضرار تلقائيًا وتقييم البيانات بشكل مستمر لتقديم تصور دقيق للمخاطر التراكمية في الوقت الفعلي.

[10] 5 Ways to Enhance Process Safety Management (PSM) Using Technology,2024.

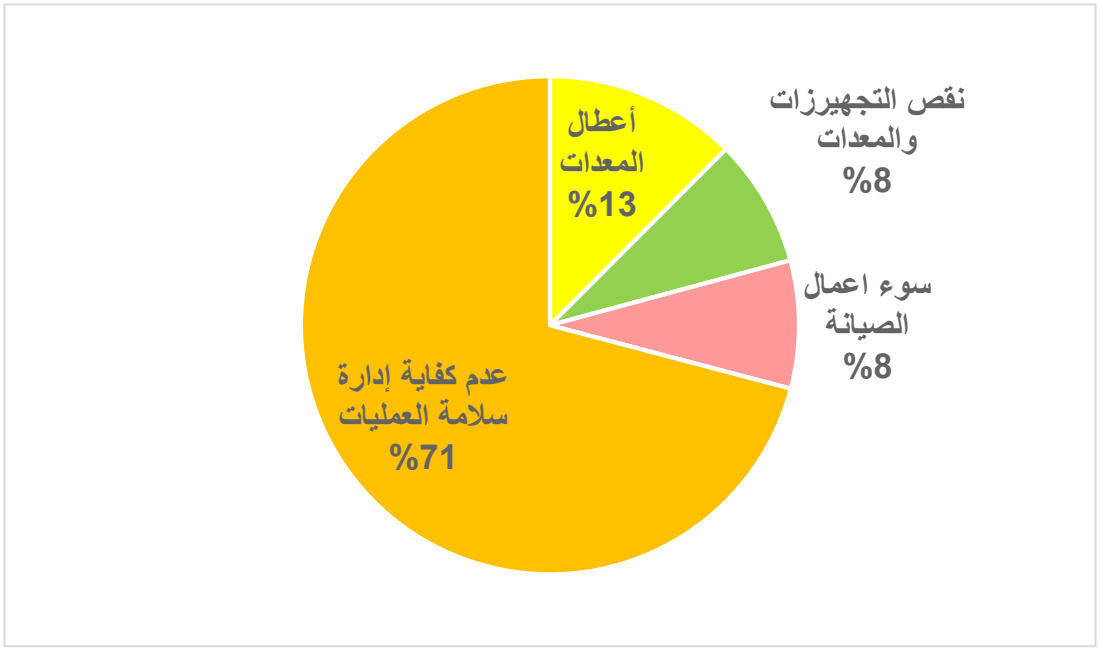
يتمتع الذكاء الاصطناعي بقدرة كبيرة على استخدام تقنيات الرؤية الحاسوبية لمراقبة بيئة العمل وتنبيه الإدارة بشأن أي انحرافات تنظيمية متعلقة بالسلامة. كما يمكنه تحليل البيانات من مصادر متنوعة، مثل أجهزة الاستشعار والبيانات التاريخية، لاكتشاف الأنماط والتنبؤ بالمخاطر المحتملة من خلال التحليلات التنبؤية. هذه القدرات تتيح اتخاذ تدابير استباقية لتقليل فرص وقوع الحوادث والإصابات قبل حدوثها.

علاوة على ذلك، يمكن للذكاء الاصطناعي مراقبة سلوك العمال والمعدات بشكل مستمر، مما يساعد في التنبيه الفوري للمسؤولين والعمال بشأن مشكلات السلامة المحتملة قبل أو أثناء وقوعها. هذه التقنية تسهم بشكل كبير في تمكين العمال من الاستجابة السريعة للمخاطر، مما يعزز الوقاية من الحوادث والإصابات ويحسن مستوى السلامة في بيئة العمل.

في هذا السياق، أظهرت دراسة أجرتها إدارة الصحة والسلامة البريطانية (HSE) أن الإدارة غير الكافية لسلامة العمليات تُعد العامل الأبرز في وقوع العديد من الحوادث الخطرة، حيث تصل نسبتها إلى نحو 71%. تليها الأعطال المتعلقة بالمعدات بنسبة 13%، التي تشمل فشل التصنيع أو أخطاء التصميم أو المواصفات غير الصحيحة. كما يمثل عدم توفر المعدات والتجهيزات الضرورية في المصنع نحو 8%، بينما تشكل الحوادث الناجمة عن سوء الصيانة نسبة تقدر بنحو 8% أيضًا. يمكن للذكاء الاصطناعي المساهمة في تقليل هذه المخاطر من خلال التحليل المستمر والفعال للمعدات وسلوك العمال، مما يساهم في تحسين إدارة سلامة العمليات وتقليل الحوادث، يبين الشكل (2-1) المسببات الرئيسية لحالات الحوادث الخطرة لسلامة العمليات.

الشكل (2-1)

المسببات الرئيسية لحالات الحوادث الخطرة لسلامة العمليات



المصدر: Safety Lifecycle Management in The Process Industries The development of a qualitative safety-related information analysis technique,2002.

2.2. سلامة التخطيط الهندسي

تبدأ سلامة التخطيط منذ مرحلة تحديد واختيار الموقع الأنسب لإقامة المشروع، حيث يُعد تخطيط المنطقة الصناعية والاعتبارات البيئية أمراً بالغ الأهمية في اختيار الموقع المثالي. غالباً ما يكون تخطيط موقع المصنع نتاجاً لحل وسط يجمع بين عدة عوامل رئيسية، أهمها: القيود الجغرافية للموقع مثل تحديد أقصر المسافات وأفضل الطرق لنقل وتداول المواد الخام الأولية والمنتجات النهائية بين وحدات التخزين، وذلك لتقليل التكاليف والمخاطر. كما يُؤخذ في الاعتبار التكامل مع المصانع المجاورة، والتنسيق مع المرافق الحالية أو المستقبلية المخطط لها، وضمان تأمين إمدادات الطاقة والمياه الصناعية، إلى جانب توفير حلول لعمليات الصرف الصناعي.

من الجوانب المهمة أيضًا دراسة اتجاهات الرياح وتأثيرها على المصانع المجاورة، بالإضافة إلى توفير المساحات الكافية لتخزين المواد الخطرة والقابلة للاشتعال، والحد من احتمالية تراكم وانتشار السوائل والغازات القابلة للاشتعال بهدف تقليل عواقب الحرائق والانفجارات. يشمل ذلك الفصل بين المناطق الخطرة وغير الخطرة لتقليل أو منع تصعيد الحوادث (تأثير الدومينو) من خلال اتخاذ تدابير

وقائية. بالإضافة إلى توفير خدمات الطوارئ وطرق الإخلاء للعاملين في الموقع، مع ضمان الحفاظ على سلامة المباني داخل الموقع وخارجه [11،12].

لذلك، فإن اتخاذ القرارات المتعلقة بموقع المنشأة وتخطيطها في المراحل المبكرة من إعداد التصاميم الهندسية يعد أحد العوامل الحاسمة في تحديد مستوى المخاطر المحتملة في المنشأة. يشمل ذلك تقييم المخاطر المحتملة وتحديد حلول التصميم المناسبة خلال مراحل تشييد المصنع، أو نقله، أو تركيبه، أو تشغيله، أو استخدامه، أو صيانته، أو إخراجه من الخدمة، أو تفكيكه، أو التخلص منه أو إعادة تدويره، بهدف القضاء على أي مخاطر قد تهدد الصحة والسلامة. [13]

في حال لم يكن من الممكن القضاء على المخاطر بشكل كامل، يجب السعي لتقليصها خلال جميع مراحل عمر المنشأة. من الضروري أيضًا أن تكون العمليات التشغيلية في المصانع مرنة بما يكفي للتعامل مع الانحرافات والحيود عن الظروف التشغيلية القياسية، سواء كانت نتيجة لأخطاء بشرية أو أعطال ميكانيكية ناتجة عن تعطل المعدات. كما يجب أن تُؤخذ اعتبارات الصيانة الدورية والطوارئ في الحسبان، بحيث لا تؤثر هذه الأنشطة على السلامة أو الإنتاج أو الكفاءة التشغيلية.

وفي هذا الإطار، ساهمت التقنيات الرقمية بشكل كبير في تسريع تحقيق أهداف سلامة العمليات، خاصة من خلال تطبيقات "التوأم الرقمي المتكامل (Integrated Digital Twin)." هذه التطبيقات تُستخدم في جميع مراحل دورة حياة المصنع، بدءًا من التصميم والهندسة الأساسية وحتى تنفيذ المشروع. يوفر التوأم الرقمي نموذجًا افتراضيًا للمصنع يساعد في تحديد استراتيجية المحاكاة الحركية، والتي تشمل موازنات الطاقة والكتلة، ومخطط سير العمليات، وبيانات الوحدات والأجهزة، فضلاً عن مراجعة تصاميم العمليات. كما يُتيح التوأم الرقمي تحليل أسلوب التحكم الأمثل في النظام وتوزيع المعدات في المصنع، مما يعزز القدرة على التنبؤ بالمشاكل المحتملة وتحسين سلامة العمليات. من خلال هذه الأدوات الرقمية، يمكن تحسين استجابة المصانع للانحرافات عن الظروف التشغيلية القياسية وتسهيل اتخاذ قرارات استباقية لتحسين السلامة والكفاءة.

[11] Layout Safety Review. https://ifluids.com/layout-safety-review/
[12] Frank Lees, Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, 3rd Edition - December 27, 2004
[13] GUIDE FOR SAFE DESIGN OF PLANT,2014

أما بالنسبة لمحاكاة التشغيل الافتراضي، فهي تُنفذ بعد اكتمال تصميم معدات المصنع، حيث يتم بناء نموذج نظام التشغيل الآلي. تتضمن نماذج المحاكاة هذه تمثيل سلوك جميع الأجهزة المتصلة بنظام التشغيل الآلي، مما يسمح بنمذجة سلوك العملية بين نقاط التشغيل المختلفة. هذه المحاكاة تساعد في تصميم عمليات بدء التشغيل أو إيقافه بشكل أكثر فعالية، فضلاً عن اختبار برنامج التشغيل الآلي المستخدم في العمليات الفعلية لضمان تشغيل المصنع بشكل آمن وفعال.

في مرحلة التشغيل الفعلي، يُستخدم التوأم الرقمي لمحاكاة العمليات ومراقبتها بشكل مستمر. يشمل ذلك إدارة وتشغيل مجمعات البتروكيماويات من خلال الأنشطة اليومية لضمان إنتاج آمن وفعال على مدار الساعة. يتم التحكم في عمليات التشغيل والصيانة عبر المعدات، أجهزة الاستشعار، صمامات التحكم، وأنظمة التشغيل الآلي لمراقبة وتنظيم المتغيرات الحيوية مثل درجة الحرارة، الضغط، ومعدلات التدفق، بما يضمن الحفاظ على ظروف التشغيل المثلى.

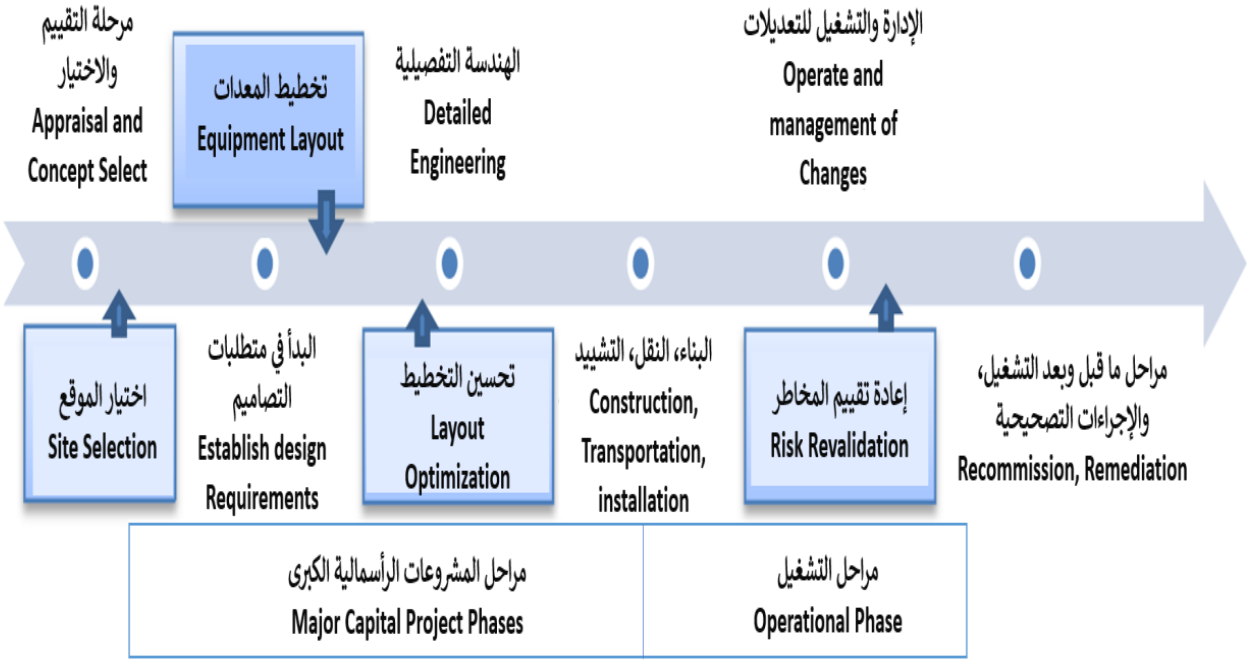
في هذا السياق، من الضروري تطوير وتنفيذ إجراءات التشغيل الرقمية التي توفر تعليمات واضحة ودقيقة لكل عملية. لا تقتصر هذه التعليمات على الخطوات الخاصة بالعمليات الروتينية، بل تشمل أيضًا كيفية التعامل مع الظروف الاستثنائية والعمليات المؤقتة، بالإضافة إلى ممارسات العمل الآمنة وحالات الطوارئ. يجب أن تتماشى هذه الإجراءات مع تعليمات السلامة المعتمدة، مما يعزز من القدرة على الاستجابة السريعة لأي مواقف طارئة ويحسن من كفاءة وأمان العمليات التشغيلية في المصانع.

مع مرور الوقت، وخلال فترة عمر المشروع وعمر الوحدات الإنتاجية، قد تنحرف ظروف الأنشطة التشغيلية أو تنحرف عن الإجراءات الأصلية. في هذه الحالة، من الضروري تحديد ما إذا كانت هذه الانحرافات تقع ضمن الحدود الآمنة أم أنها تمثل خطرًا على سلامة العمليات أو سلامة العاملين. لضمان الحفاظ على السلامة والكفاءة التشغيلية، يجب أن تتم مراجعة وتحديث إجراءات التشغيل بشكل دوري من قبل المختصين. هذه المراجعات المنتظمة تساعد في ضمان الاستجابة الفعّالة لأي تغييرات أو ظروف غير متوقعة قد تؤثر على أمان العمليات وكفاءتها، مما يساهم في الحفاظ على بيئة

عمل آمنة ومستدامة طوال دورة حياة المنشأة..[14]-[15]. يبين الشكل (2-2) مراحل تخطيط وتصميم المنشآت الصناعية الكبرى خلال دورة عمر المشروع.

الشكل (2-2)

مراحل تخطيط وتصميم المنشآت الصناعية الكبرى خلال دورة عمر المشروع



المصدر: R Naira,*, Jim Salter ,Layout - A Cost Effective and Powerful Design Step in Risk Management,2019,

3.2. أساليب مبتكرة لسلامة العمليات الكيميائية

يبدو أن مستقبل سلامة العمليات الكيميائية يحمل آفاقًا واعدة بفضل التقدم الملحوظ في التقنيات الرقمية والابتكارات المتسارعة في هذا المجال. من بين أبرز هذه الابتكارات تقنيات تكثيف العمليات، وتقنيات التحكم المتقدم في العمليات، والتوائم الرقمية، والروبوتات والأتمتة، التي تسهم جميعها في تعزيز سلامة وكفاءة العمليات الكيميائية[16]. هذه التقنيات لا تقتصر فقط على تحسين أداء العمليات وتقليل المخاطر، بل تساهم أيضًا في حماية العاملين في هذه الصناعات، بالإضافة إلى الحفاظ

[14] https://www.osha.gov/Publications/osha3132.pdf

[15] Digital Refining, Evolution of a digital twin Part 2: Use of the digital twin,2020.

[16] العمليات الكيميائية، وهي العمليات التي تتم لتحويل المادة الخام الأولية على منتجات ذات قيمة.

على البيئة والمجتمعات المحيطة. بفضل هذه الأساليب المبتكرة، أصبح من الممكن مراقبة العمليات بشكل أكثر دقة وكفاءة، مما يتيح الاستجابة السريعة للحوادث المحتملة وتقليل تأثيرها بشكل كبير[17].

1.3.2. تكثيف العملية Process Intensification

تكثيف العمليات هو مبدأ مبتكر في هندسة التفاعلات الكيميائية وتصميم العمليات، تم تعريفه لأول مرة في عام 2000 [18]. ويشمل مجموعة من الأساليب المتقدمة التي تهدف إلى تحويل معدات العمليات الكيميائية التقليدية إلى معدات أصغر حجمًا، وأكثر انتقائية، وأكثر كفاءة في استخدام الطاقة، مع تقليل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون. وقد حقق هذا المبدأ نجاحًا كبيرًا عند تطبيقه في العديد من الصناعات، بما في ذلك صناعة البتروكيماويات، حيث ساعد على تحسين الكفاءة وتقليل التكاليف في الوحدات الإنتاجية الجديدة.

على مدار العشرين سنة الماضية، شهدت تقنيات تكثيف العمليات تطورًا كبيرًا ساهم في خفض تكلفة المواد الخام، وتقليل الإنفاق الرأسمالي والتشغيلي، وتقليل معدلات استهلاك الطاقة، بالإضافة إلى خفض مخاطر السلامة. يعتمد هذا المجال على تحسين سلامة وكفاءة العمليات الكيميائية من خلال دمج تقنيات متعددة لتحسين تصميم وتشغيل المعدات، مما يؤدي إلى تقليص المساحة الإجمالية "**Overall Footprint**"أو "البصمة" للوحدات الكيميائية وزيادة إنتاجيتها[19].

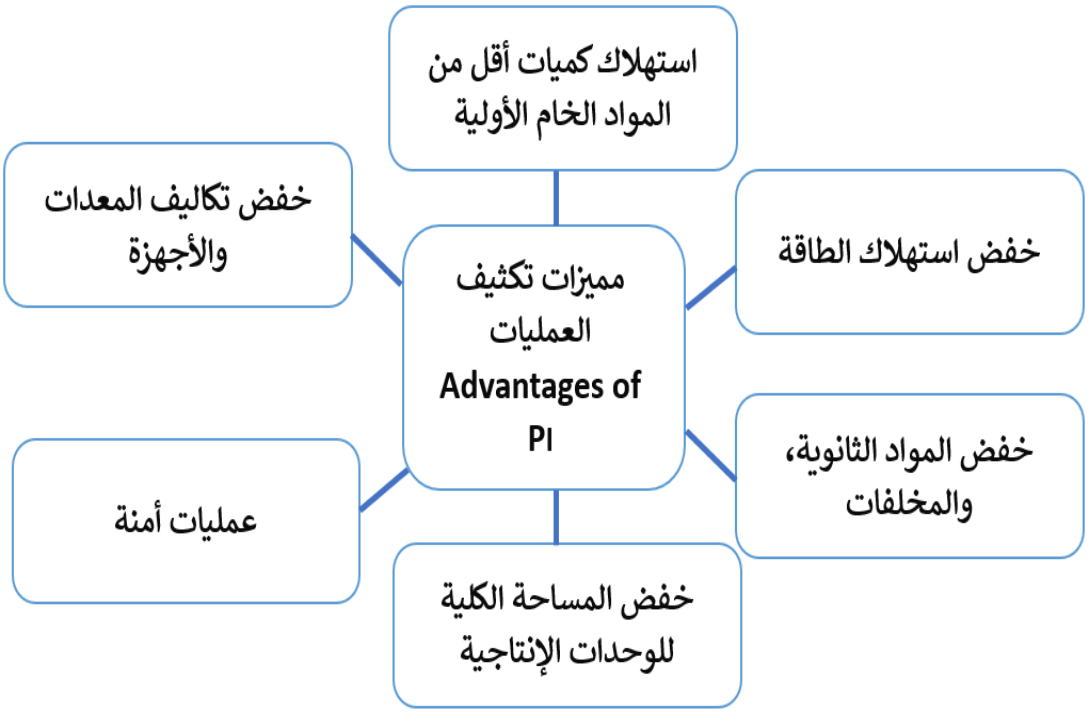
يتيح هذا النهج تحكمًا أفضل في معايير العمليات التشغيلية، مما يقلل من المخاطر المحتملة المرتبطة بالتعامل مع المواد الخطرة. لتحقيق ذلك، تُستخدم خوارزميات تعتمد على البيانات لفهم العمليات الفيزيائية والكيميائية المعقدة، مما يسهم في تحسين تصميم المعدات، وتطبيق أساليب التحكم التنبؤي، وتحقيق تحسينات مستمرة في الأداء[20].

علاوة على ذلك، تمثل تقنيات الذكاء الاصطناعي، وخاصة تعلم الآلة، عنصرًا حيويًا في تسريع عملية تصميم المعدات وتحسين العمليات، ويمكن تبسيط وتحسين عمليات التصميم والتشغيل بشكل

[17] Chemical Process Safety Innovations and Best Practices,2023
[18] Stefan Haase, Process Intensification in Chemical Reaction Engineering< MDPI, 2022.

مستمر، مما يعزز الكفاءة ويقلل من التكاليف والمخاطر التشغيلية[21]. يبين الشكل (2-3) مزايا تكثيف العمليات في الصناعة.

الشكل (2-3)
مزايا تكثيف العمليات في الصناعة



المصدر: **Raghu Krishna , Process Intensification - An Insight , ResearchGate,2018**

2.3.2. التحكم المتقدم في العمليات Advanced Process Control

تعرف برامج أنظمة التحكم المتقدمة والمعقدة، التي تهدف إلى تبسيط وتحسين العمليات الصناعية، باسم **برامج التحكم المتقدم في العمليات** .وعلى الرغم من أن مفهوم التحكم المتقدم في العمليات موجود منذ أكثر من ثلاثة عقود، إلا أنه اكتسب أهمية متزايدة في السنوات الأخيرة، بالتوازي مع التطورات التكنولوجية، بما في ذلك تقنيات التعلم الآلي، الذكاء الاصطناعي، وتحليلات البيانات الضخمة.[22]

[22] Global Advanced Process Control (APC) Software Market by Type (Advanced Regulatory Control, Multivariable Model Predictive Control), By Application (Oil and Gas, Petrochemicals), By Geographic Scope and Forecast,2023

يعد الطلب المتزايد على حلول الأتمتة هو المحرك الرئيسي لتوسع تطبيق هذه البرامج في الصناعات المختلفة. تمكن أنظمة التحكم المتقدم في العمليات من توقع الانحرافات المحتملة في العمليات الصناعية، وتحديد حالات الانحراف في الوقت الفعلي، ووصف الإجراءات التصحيحية اللازمة للحفاظ على استقرار العملية، وزيادة موثوقيتها وكفاءتها. كما تساهم هذه الأنظمة في تحسين الأداء العام للعمليات وتقليل التكاليف التشغيلية، مما يجعل العائد على الاستثمار عادةً أقل من ستة أشهر[23].

وقد تم تقدير حجم السوق العالمي لبرامج التحكم المتقدم في العمليات بحوالي 2.74 مليار دولار أمريكي في عام 2024، ومن المتوقع أن يصل إلى 4.10 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2029، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 8.38% خلال الفترة من 2024 إلى 2029. كما يُظهر قطاع النفط والغاز حصة سوقية كبيرة في هذا السوق، حيث يتم تطبيق تقنيات التحكم المتقدم بشكل واسع لتحسين كفاءة وأمان العمليات في هذا القطاع الحيوي.

تعتمد مصانع البتروكيماويات بشكل كبير على أنظمة التحكم المتقدم في العمليات لضمان التشغيل الفعال والآمن للمصانع. على سبيل المثال، يتسم تشغيل مصنع الإيثيلين بدرجات عالية من التعقيد، حيث يبدأ الإنتاج بمجموعة من أفران التكسير التي تختلف في تصاميمها وأشكالها. تعمل هذه الأفران في درجات حرارة مرتفعة وضغوط منخفضة، يليها استخدام أعمدة التقطير لفصل نفايات المفاعل **Reactor Effluent**. كما تتم التفاعلات الكيميائية في المفاعلات تحت ظروف تشغيل متنوعة تشمل درجات حرارة منخفضة وضغوط مرتفعة لفصل المواد الخام الأولية من الهيدروكربونات الخفيفة.

يعد التشغيل الآمن والمستقر لأفران التكسير أحد العوامل الأساسية لضمان إنتاج مستمر وآمن للإيثيلين .يتطلب ذلك التحكم الدقيق في شدة التفاعل (التكسير)، والحفاظ على درجة حرارة الأفران، وتنظيم معدلات حقن البخار، بالإضافة إلى التكيف مع التغيرات في معدلات تغذية المادة الخام الأولية. وهذا كله يتطلب استخدام نموذج حركي صارم للتفاعل **Rigorous Kinetic Model of the Reaction** لتحقيق التوازن المطلوب في العملية.

[23] AAB, Advanced Process Control, the Proven way to process optimization, 2023.

إذا لم تتم إدارة هذه العوامل بشكل صحيح، فقد تحدث تشققات أو ترسب الفحم على جدران الأنابيب، مما يؤدي إلى تقليص فترة عمر خدمة الأنابيب بشكل كبير، ويؤثر سلبًا على إنتاج الإيثيلين وكفاءة العملية الإنتاجية بشكل عام[24]. وللتغلب على هذه التحديات، يعتبر استخدام تقنيات التحكم المتقدم في العمليات أمرًا بالغ الأهمية، حيث تساعد في الحفاظ على استقرار العملية، وتقليل المخاطر المرتبطة بتشغيل الأفران، وتعزيز كفاءة الإنتاج وتقليل التكاليف الناتجة عن الأعطال والتوقفات غير المخطط لها[25].

3.3.2. الروبوتات

على الرغم من وجود الاحتياطات والبروتوكولات الصارمة في صناعات التكرير والبتروكيماويات، إلا أن الحوادث قد تحدث في ظل الظروف الخطرة التي تتم فيها العمليات، مثل درجات الحرارة المرتفعة، الضغوط العالية، والتعامل مع مواد كيميائية شديدة الخطورة والسُمية. لذا، يتم اللجوء إلى الروبوتات كأداة حيوية لتحسين السلامة والكفاءة في هذه الصناعات، حيث يتم استخدامها للوصول إلى أماكن يصعب على الإنسان الوصول إليها، وأداء مهام تتجاوز قدرات البشر، بما في ذلك العمل في ظروف خطرة مثل البيئات الملوثة أو المشعة أو الظروف الجوية القاسية.

تتميز الروبوتات بقدرتها على العمل على مدار الساعة دون الحاجة إلى فترات راحة، مما يجعلها أداة فعالة لتعزيز كفاءة التشغيل وتقليل الأخطاء البشرية، مما يساهم في تحقيق متطلبات السلامة .كما تعمل الروبوتات على تقليل مخاطر السلامة بطرق موثوقة، خصوصًا عندما يتعلق الأمر بتنفيذ المهام الخطرة مثل التفتيش والصيانة في البيئات التي قد تكون خطيرة على الإنسان.

تُستخدم الروبوتات عادةً للتحكم عن بُعد ومزودة بكاميرات مراقبة، ويمكنها أيضًا العمل باستخدام نظام الموجات الصوتية لتحديد حجم الضرر الداخلي للأنابيب أو تحديد الحجم والتآكل في المواد. كما يمكن تجهيز الروبوتات بجهاز لقياس الشَقوق والتآكل في الأنابيب أو الهياكل الأخرى. ومن خلال استخدام المغناطيس، يمكن للروبوتات التسلق والتغلب على العوائق، حيث يقوم المشغل بتسجيل البيانات وتحليلها ومراقبتها في الوقت الفعلي.

[24] MDPI, ABC-ANFIS-CTF: A Method for Diagnosis and Prediction of Coking Degree of Ethylene Cracking Furnace Tube,2019.
[25] Petrrocotrol, Advanced Control & Optimization, Advanced Control of Ethylene Plants: What Works, What Doesn't and Why, 1999.

تعتبر الروبوتات إحدى التقنيات الرائدة في تعزيز السلامة والكفاءة في صناعات التكرير والبتروكيماويات. على سبيل المثال، طورت **شركة Eelume** للنفط والغاز، بالتعاون مع شركة أبحاث نرويجية، **"الثعابين الروبوتية"**، وهي روبوتات مصممة خصيصًا للعيش بشكل دائم تحت الماء، مما يتيح لها أداء مهام الصيانة في بيئات خطرة، وبالتالي تقليل المخاطر على العمال[26].

كما تستخدم **شركة Diakont** روبوتات متخصصة في أعمال التفتيش لتقييم جودة وسلامة الخزانات، خطوط الأنابيب، والبنية التحتية الأخرى. وتتم هذه العمليات باستخدام كاميرات عالية الدقة وأجهزة مسح بالليزر للكشف عن الشقوق والتآكلات التي قد تُسبب مشاكل صحية أو تهدد السلامة إذا تم تجاهلها أو لم تجر عليها الصيانة المناسبة. يبين الشكل (2-4) الثعابين الروبوتية المستخدمة لإعمال الصيانة تحت الماء. ويبين الشكل (2-5) الروبوتات المستخدمة في أعمال التفتيش والفحص في الصناعات التكميلية.

الشكل (2-4)

الثعابين الروبوتية المستخدمة لإعمال الصيانة تحت الماء

المصدر: www.kongsberg.com/maritime/feature_articles/2020/12/eelume-robot

[26] EDI, How Robotics is Revolutionizing Safety and Efficiency in Oil and Gas Operations: A Comprehensive Analysis

الشكل (2-5)

الروبوتات المستخدمة في أعمال التفتيش والفحص في الصناعات التكميلية

المصدر:Guide to Industrial Inspection Robots: Choosing the Solution for Your Industrial Environment ,2023

4.3.2. الروبوت التعاوني - الكوبوت COBOT

الكوبوت هو مصطلح حديث يجمع بين كلمتي "التعاون" و"الروبوتات"، ويتميز بقدرته على التفاعل المباشر مع الإنسان. يُطلق عليه أيضًا اسم "الروبوت التعاوني" بسبب قدرته على العمل جنبًا إلى جنب مع المشغلين البشريين في بيئات العمل، مما يعزز الإنتاجية ويتيح أداء المهام الأكثر تعقيدًا بكفاءة ودقة. من السمات المميزة للكوبوت أنه **روبوت صغير وخفيف**، مما يتيح له التفاعل مباشرة مع الأشخاص دون الحاجة إلى حواجز فاصلة، وهو ما يجعله أداة مثالية للعمل المشترك بين البشر والروبوتات.

يعتمد الكوبوت على الذكاء الاصطناعي (AI) وأنظمة تعلم الآلة **Machine Learning** ، مما يتيح له تحسين إدراكه لمحيطه وفهمه للتغيرات في البيئة المحيطة. هذه التقنيات تمكّنه من أداء مجموعة واسعة من المهام، مثل التجميع، مناولة المواد، والمساعدة في العديد من الأنشطة الصناعية مثل التفتيش، الخدمة، والأمن .كما أصبح الكوبوت جزءًا أساسيًا في مصانع المستقبل، حيث يمكن

للمشغلين زيادة الإنتاجية باستخدامه دون تعريض سلامتهم للخطر. فعلى سبيل المثال يُمكن للكوبوت أن يؤدي مهام عديدة في صناعة البلاستيك، بما في ذلك:

- **عملية القولبة بالحقن** :حيث يمكنه المشاركة في عمليات تفريغ آلة التشكيل أو **تغيير أجزاء القالب**.
- **المعالجة اللاحقة** :مثل **التلميع** أو **الطلاء** للمنتجات.
- **فحص الجودة** :يمكن للكوبوت إجراء عمليات فحص دقيقة للمنتجات للتأكد من جودتها.
- **فرز المنتجات** :القدرة على فرز المنتجات حسب معايير محددة.
- **الربط واللصق آليًا** :يمكنه تنفيذ عمليات الربط واللصق بأتمتة عالية الدقة.

إن قدرة الكوبوت على العمل جنبًا إلى جنب مع الإنسان دون تهديد للسلامة، وزيادة الإنتاجية، وتحسين الجودة، تجعله من التقنيات الرائدة في المستقبل الصناعي، سواء في قطاع البلاستيك أو غيره من الصناعات. يبين الشكل (2-64) استخدام الروبوت التعاوني في تعبئة القناني البلاستيكية.

الشكل (2-6)
استخدام الروبوت التعاوني في تعبئة القناني البلاستيكية

المصدر: Cobot relieves operators of a tedious task

5.3.2. الأجهزة الخارجية المساعدة

الأجهزة الخارجية المساعدة (Exoskeletons) هي أجهزة ميكانيكية قابلة للارتداء تهدف إلى تعزيز الأداء البشري من خلال زيادة القوة والتحمل وتحسين القدرات البدنية للمستخدم. لا تقتصر فوائد هذه الأجهزة على تحسين الإنتاجية فقط، بل تساهم أيضًا بشكل كبير في تقليل مخاطر الإصابات المرتبطة بالعمل، خاصة في بيئات العمل التي تتطلب جهداً بدنياً كبيراً.

تتميز هذه الأجهزة بوجود أجهزة استشعار متطورة وقدرات حسابية دقيقة، مما يسمح لها بمراقبة حركة الجسم بشكل مستمر وتوفير دعم ديناميكي يتناسب مع احتياجات المستخدم في الوقت الفعلي. تُعتبر هذه التكنولوجيا من أدوات الحماية الشخصية المتقدمة التي تساهم في تقليل الإرهاق البدني وتحسين السلامة في أماكن العمل، لا سيما في العمليات التي تتضمن رفع الأثقال الثقيلة أو العمل في أوضاع مجهدة.

من خلال استخدام هذه الأجهزة، يمكن للعاملين أداء مهامهم بشكل أكثر فعالية وأمانًا، مما يقلل من الحوادث والإصابات الناتجة عن الإجهاد البدني أو الحركات المتكررة. وبذلك، تُعد الأجهزة الخارجية المساعدة حلاً مبتكرًا يعزز الصحة والسلامة في بيئات العمل الصعبة، كما تساهم في تحسين إنتاجية العمال وزيادة كفاءتهم.

4.2. تقنيات الاتصال والربط البيني

تتمتع تقنيات الاتصال والربط البيني بالعديد من الفوائد التي تعزز إدارة الأعمال التشغيلية وتحسن كفاءة العمليات، مما يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة والسلامة، وتقليل التأثيرات البيئية وخفض الانبعاثات. وتُعد هذه التقنيات أساسًا في دعم التحول الرقمي داخل العديد من الصناعات، خاصة في مجمعات البتروكيماويات.

يعد مرخصو العمليات وموّردو المحفزات (Catalysts) من اللاعبين الرئيسيين في هذا التحول، حيث يقدمون حلولًا رقمية فعّالة ومنخفضة التكلفة وسهلة الاستخدام، مما يسهل تطبيقها في المنشآت القائمة والجديدة على حد سواء. علاوة على ذلك، يوفرون خدمات دعم فني مستمرة تشمل التحديثات التقنية وحلول الصيانة والتطوير، مما يضمن استمرارية العمليات دون انقطاع.

من الجوانب المهمة لهذه التقنيات هو قدرتها على مراقبة وتحليل أداء عناصر التحكم المتقدمة في العمليات ذات الحلقة المغلقة(Closed-Loop Advanced Process Controls) ، مما يسمح بإجراء التعديلات اللازمة لضمان استمرارية العمليات بأعلى كفاءة. كما تتيح الأنظمة الرقمية مثل أجهزة التحليل الرقمية التي تُركب مباشرة على خطوط أنابيب الإنتاج، وأجهزة قياس التدفق والحرارة، إمكانية مراقبة العمليات في الوقت الفعلي بشكل دقيق.

بالإضافة إلى ذلك، تساهم هذه الأنظمة في تحسين الأمان السيبراني من خلال ضمان سرية تبادل البيانات وحماية قواعد البيانات، مما يحد من المخاطر الإلكترونية ويعزز استقرار العمليات التشغيلية[27].

1.4.2. تطبيقات الشبكات " الويب " والهواتف المحمولة

تشمل تقنيات الاتصال والربط البيني مجموعة من التطبيقات المتطورة التي تعتمد على الشبكات الإلكترونية (الويب)، مثل الهواتف المحمولة، الهواتف الذكية، الأجهزة اللوحية، أجهزة الحاسوب المحمولة، بالإضافة إلى الطائرات المسيرة .ساهمت هذه التقنيات بشكل كبير في تسريع التحول الرقمي، ودفع صناعة الجيل الرابع 4.0 في مجالات التكرير والبتروكيماويات، مما ساعد على تسهيل الاتصال بين الأنظمة والعمليات الصناعية، وزيادة التكامل بين مختلف الأجزاء في البيئة الصناعية.

ومع هذا التقدم التقني، أصبح من الضروري تطوير وتنفيذ حلول فعّالة لضمان أمن الأنظمة الرقمية على المدى الطويل. يُعد الأمن السيبراني في هذه الصناعات أمرًا بالغ الأهمية، خاصة في ظل تزايد التهديدات الداخلية والخارجية التي قد تؤدي إلى الاختراقات أو الهجمات الإلكترونية .لذلك، يجب أن تشمل الاستراتيجيات المُعتمدة حماية البيانات والأنظمة من المخاطر الرقمية المحتملة، مع ضمان سرية وسلامة المعلومات التشغيلية.

تشمل هذه الاستراتيجيات استخدام أنظمة أمان متقدمة لحماية الشبكات الصناعية من التهديدات الخارجية، بالإضافة إلى مراقبة التفاعل الداخلي بين الأنظمة لتقليل المخاطر الناشئة عن الأنشطة غير المصرح بها أو الأخطاء البشرية. كما يجب أن تكون هناك آليات لتحديث الأنظمة الأمنية بشكل دوري

[27] Digital Refining, Petrochemical complex digitalization for greater efficiency and emissions reduction,2023

لمواكبة أساليب الهجوم الجديدة وضمان الحماية الكافية ضد الهجمات الإلكترونية التي قد تؤثر على استقرار العمليات وكفاءتها.

2.4.2. إنترنت الأشياء

انترنت الأشياء، " **IoT**"، هو عبارة عن شبكة من الأجهزة المترابطة، لربط البيانات وتبادلها مع أجهزة إنترنت الأشياء الأخرى والسحابة **Cloud**. وعادةً ما تُزود الأجهزة، والآلات الميكانيكية والرقمية المستخدمة بأجهزة استشعار او حساسات **Sensors** من خلال استخدام برامج متخصصة، وقد عَرف "الاتحاد الدولي للاتصالات" إنترنت الأشياء بأنه عبارة عن "بنية تحتية عالمية لمجتمع المعلومات، تتيح تقديم خدمات متقدمة من خلال ربط الأشياء (المادية والافتراضية) اعتماداً على تكنولوجيا المعلومات والاتصالات القابلة للتشغيل البيني الحالية والمستقبلية المتطورة.

3.4.2. إنترنت الأشياء الصناعية The Industrial Internet of Things (IIoT)

يشير "إنترنت الأشياء الصناعية"، أو ما يعُرف بإسم "الإنترنت الصناعي"، إلى استخدام إنترنت الأشياء في القطاعات والتطبيقات الصناعية من خلال شبكة من الأجهزة المترابطة بما يضمن كفاءة وموثوقية أفضل في عملياتها. يستخدم لذلك الآلات الذكية، والاتصالات بتقنيات آلة إلى آلة **M2M**. يمكن الاستفادة من البيانات التي تسجلها وتقرأها الآلات في العمليات الصناعية لفترات طويلة وتحليلها. ومن الجدير بالذكر أن تطبيقات إنترنت الأشياء الصناعية تهتم بتحسين الكفاءة والصحة والسلامة أكثر من تطبيقات إنترنت الأشياء التي تركز على المستخدم فقط. ويمكن أن يؤدي فشل النظام أو توقفه في عمليات إنترنت الأشياء الصناعية إلى حوادث عالية الخطورة.

4.4.2. إنترنت الذكاء الاصطناعي

تساعد تقنيات إنترنت الذكاء الاصطناعي، الشركات على تحسين الكفاءة والسلامة والربحية وأعمال التحكم والمراقبة في جميع المراحل الإنتاجية، وتحديد المشكلات من خلال تحليل البيانات في وقت مبكر قبل أن تتسبب في فشل العمليات التشغيلية. فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي لمراقبة مستويات الاهتزاز في المضخات والمحركات، وعند ارتفاع مستويات الاهتزاز، يمكن

للذكاء الاصطناعي إرسال رسائل تنبيه تلقائية إلى فريق الصيانة لاتخاذ الإجراءات التصحيحية، ومنع وقوع الحوادث. كما يمكن استخدامه في جدولة أعمال الصيانة الدورية بناءً على تحليل بيانات حالة المعدات، مما يساعد في ضمان إجراء الصيانة في الوقت المناسب، ومن ثم تقدير الوقت المحتمل لتعطل المُعدة، وجدولة صيانتها تلقائياً قبل حدوث العطل.

5.4.2. الواقع المعزز Augmented reality

الواقع المعزز هو تقنية تتيح تصور الأشياء أو البيئات المادية بشكل مباشر بطريقة محسّنة باستخدام الدعم الرقمي، مثل النظارات الذكية والأجهزة اللوحية والهواتف المحمولة. في صناعة البتروكيماويات، تواجه الشركات تحديات كبيرة بسبب الطبيعة المعقدة والديناميكية لهذه الصناعة، حيث يعتمد العاملون في العديد من الأحيان على الأساليب التقليدية لتسجيل البيانات وتبادل المعلومات باستخدام الأجهزة المحمولة في بيئات عمل خطرة. هذه الظروف قد تجعل التواصل ومشاركة البيانات أمرًا صعبًا في كثير من الأحيان، خاصة في المواقع التي تتطلب التدخل السريع أو الصيانة.

تعتبر تقنية الواقع المعزز (AR) من الأدوات المبتكرة التي يمكن أن تلعب دورًا حيويًا في تحسين العمليات داخل الصناعات ذات البيئة الخطرة مثل صناعة البتروكيماويات. تتيح هذه التقنية تحسين الاتصال وتبادل البيانات في الوقت الفعلي، مما يسهل عمليات الصيانة ويعزز سلامة العمل. على سبيل المثال، يمكن للخرائط المعززة بالواقع والرسوم البيانية على الأجهزة المحمولة توجيه موظفي الصيانة إلى المواقع التي تحتاج إلى تدخل فوري، مما يساهم في تقليل الوقت المستغرق في تحديد المشكلات وحلها، وبالتالي تسريع استجابة الفرق الفنية.

أظهرت بعض الدراسات أن شركات البتروكيماويات التي اعتمدت تقنيات الواقع المعزز شهدت زيادة في ربحيتها تتراوح بين 3-5%. وهذا يعكس الفوائد الاقتصادية الكبيرة لهذه التقنيات في تعزيز الكفاءة التشغيلية وتقليل الأخطاء. ومع ذلك، لتحقيق هذه الفوائد بالكامل، من الضروري أن تلتزم الشركات بتدريب مستمر لعمالها على استخدام هذه التكنولوجيا الحديثة. يشمل ذلك تدريبهم على التعامل مع التعقيدات المتزايدة في العمليات التشغيلية والصناعية، مثل الصيانة اليومية وضمان

الجودة، مما يساعد في استثمار كامل إمكانيات الواقع المعزز لتحقيق فعالية أكبر في العمل وزيادة الإنتاجية.

6.4.2. الواقع الافتراضي Virtual Reality

يعد **التدريب على الواقع الافتراضي (VR)** من الأساليب الحديثة والمبتكرة التي أصبحت تشكل أداة حيوية في تحسين سلامة العمليات في صناعة البتروكيماويات، حيث توفر تجارب تدريبية تفاعلية تساهم بشكل فعال في فهم المخاطر وتقليل أخطار الحوادث في بيئات العمل الخطرة. تعتبر صناعة البتروكيماويات من الصناعات التي تتسم بدرجات عالية من المخاطر نتيجة التعامل مع مواد كيميائية خطرة مثل الأبخرة السامة، والسوائل القابلة للاشتعال، والمواد المسببة للتآكل، فضلاً عن مخاطر الحرائق والانفجارات. كما يشكل التعامل مع الآلات والمعدات بطرق غير آمنة تهديدًا إضافيًا على سلامة العمال.

في هذا السياق، يمثل التدريب على الواقع الافتراضي حلًا مبتكرًا وفعّالًا لهذه المخاطر، حيث يتيح للعاملين ممارسة إجراءات السلامة والاستجابة للطوارئ في بيئة افتراضية خاضعة للرقابة، مما يساعدهم على اكتساب المهارات اللازمة للتعامل مع الظروف الخطرة دون التعرض لأي خطر حقيقي. ومن خلال هذه التقنية، يمكن للعاملين التدريب على:

1. الاستجابة للطوارئ :من خلال محاكاة سيناريوهات طارئة مثل حرائق، انفجارات، أو تسريبات كيميائية، مما يتيح للعاملين تعلم كيفية التصرف بسرعة وفعالية في مثل هذه الحالات.
2. إجراءات الإخلاء :يمكن تدريب العاملين على كيفية إخلاء المنشأة بأمان في حال وقوع حادث طارئ، مما يقلل من احتمالات الإصابة أو الوفاة.
3. التعامل مع المواد الخطرة :يمكن استخدام الواقع الافتراضي لتدريب العمال على التعامل مع السوائل القابلة للاشتعال والمواد المسببة للتآكل والأبخرة السامة، بطريقة آمنة ومراقبة.
4. التدريب على الآلات والمعدات :يتيح التدريب على الواقع الافتراضي للعاملين تعلم كيفية تشغيل الآلات والمعدات بكفاءة وأمان، مما يقلل من الأخطاء البشرية ويحسن من أداء المعدات في الواقع.

5. تجاوز الحواجز اللغوية والمعلومات غير الدقيقة :يمكن استخدام التدريب الافتراضي لتوفير بيئة تدريب موحدة، مما يسهل على العاملين من مختلف الخلفيات الثقافية أو اللغوية فهم الإجراءات بشكل صحيح.

إضافة إلى هذه الفوائد العملية، يساعد التدريب على الواقع الافتراضي في تقليل توقفات العمل، حيث يتيح للعمال التدريب في أي وقت ومن أي مكان دون الحاجة إلى تعطيل العمليات الفعلية أو تعريضهم لمخاطر حقيقية. كما يُعتبر من الحلول الفعّالة في تحسين المهارات التقنية وإجراءات السلامة بشكل مستمر، مما يساهم في الحد من الحوادث والحفاظ على بيئة عمل آمنة وفعالة.

7.4.2. التوأم الرقمي Digital twin

التوأم الرقمي هو تقنية مبتكرة تقوم على إنشاء نسخة افتراضية أو "مرآة" موازية من المصنع أو المنشأة بأكملها، تشمل جميع مكوناتها ووحداتها الإنتاجية، بما في ذلك مرافقها، المواد الخام الأولية، والمنتجات النهائية. تتيح هذه التقنية متابعة العمليات الصناعية بشكل دقيق، بدءًا من مرحلة التصميم وصولاً إلى نهاية عمر المصنع، مما يساعد في تعزيز قدرة المراقبة والصيانة التنبؤية وبالتالي تحسين سلامة العمليات وضمان الأداء المستمر للمصنع

يعد التوأم الرقمي خطوة استراتيجية نحو تحقيق التميز التشغيلي وتعزيز سلامة العمليات في صناعة البتروكيماويات. من خلال توظيف هذه التقنية، يمكن تحسين الصيانة التنبؤية، زيادة الكفاءة التشغيلية، وتقليل المخاطر المرتبطة بالعمليات الصناعية. توفر هذه التقنية إمكانيات كبيرة لتحسين الإنتاجية وتقليل التكاليف مع ضمان الحفاظ على سلامة العاملين واستدامة العمليات.

فوائد التوأم الرقمي في صناعة البتروكيماويات:

1. **المراقبة والتحكم في العمليات:**

- يمكن للتوأم الرقمي توفير رؤية شاملة لجميع خطوط الإنتاج في المصنع بشكل مباشر، مما يسهم في مراقبة الأداء وتحليل الأنماط التشغيلية. يساعد ذلك في الكشف المبكر عن أي انحرافات أو مشاكل قد تحدث، مما يسمح باتخاذ إجراءات تصحيحية قبل تطورها إلى حوادث خطيرة.

2. **الصيانة التنبؤية:**

- الصيانة التنبؤية هي أحد المجالات التي يستفيد منها التوأم الرقمي، حيث يمكن من خلال جمع وتحليل البيانات من الحساسات وأجهزة القياس في المصنع التنبؤ بمواعيد احتياج المعدات أو الأنظمة إلى صيانة قبل حدوث الأعطال. هذا يسهم في تقليل التوقفات غير المخطط لها وتحسين الكفاءة التشغيلية.

3. **تحسين الأداء التشغيلي:(OpX)**

- يعزز التوأم الرقمي التميز التشغيلي (OpX) عبر تحليل البيانات التاريخية والتشغيلية لمختلف مكونات المصنع. يمكن محاكاة عمليات التشغيل باستخدام النماذج الافتراضية لتحديد أوجه القصور أو الفرص لتحسين الأداء. كما يوفر إمكانية تحليل السيناريوهات المختلفة للتوصل إلى حلول مثلى لتحسين الإنتاجية.

4. **التصميم والابتكار:**

- يمكن استخدام التوأم الرقمي في مراحل التصميم الهندسي للمصنع بشكل أكثر كفاءة، حيث يتيح تحليل الأداء الافتراضي للمكونات والأنظمة قبل بناء أو تنفيذ أي تغييرات في المصنع. يساعد ذلك في التقليل من المخاطر وضمان أن التصاميم تفي بمتطلبات الأداء والسلامة.

5. **استكشاف الأخطاء وإصلاحها:**

- من خلال التوأم الرقمي، يمكن للفنيين والمشغلين استكشاف الأخطاء في العمليات أو المعدات بشكل افتراضي قبل أن يتم تنفيذ الحلول على أرض الواقع. يمكن فحص مختلف التعديلات في البيئة الافتراضية وتجربة حلول مختلفة، مما يسهم في تحسين الكفاءة وتقليل الوقت والتكلفة.

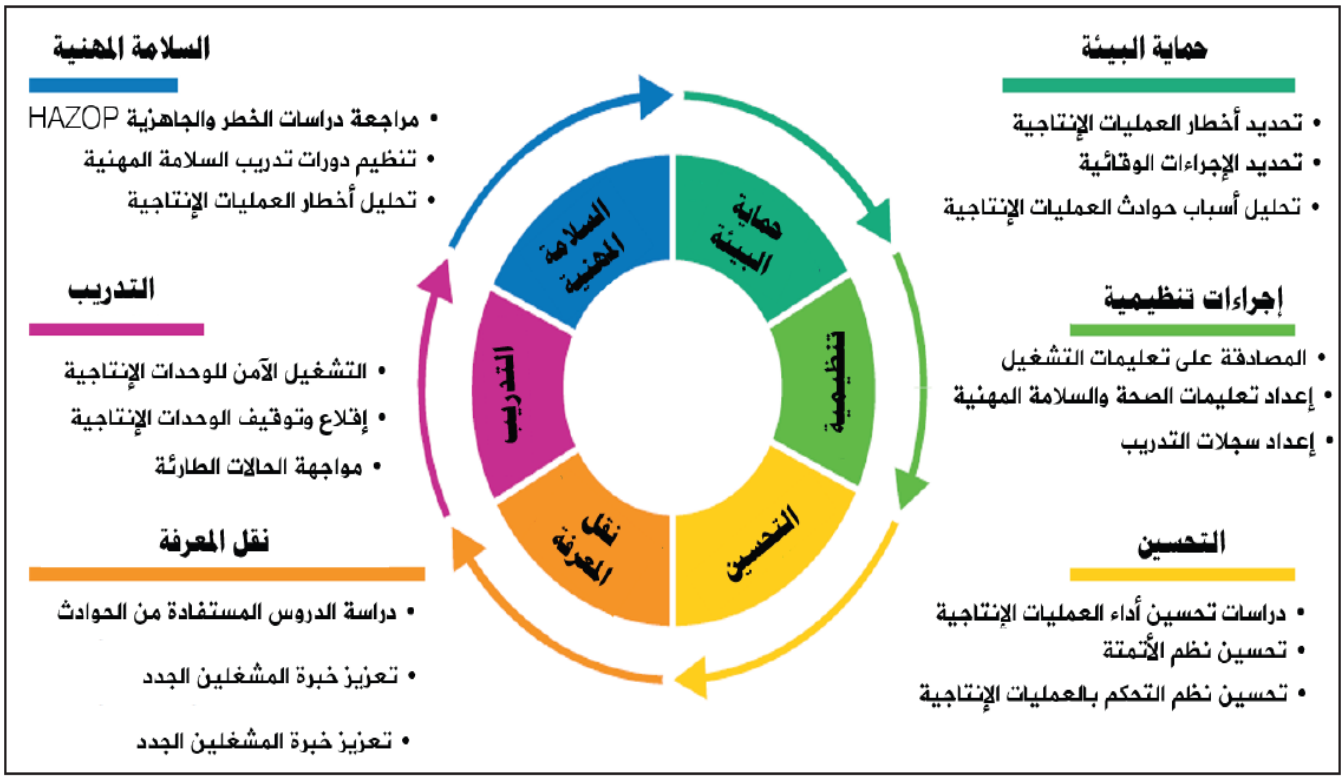
6. **التحليل في السحابة:(Cloud)**

- يمكن أن توفر التقنيات السحابية لتطبيقات التوأم الرقمي القدرة على مراقبة وتحليل البيانات من جميع العمليات على مدار الساعة، مما يسهم في تحسين الوصول إلى المعلومات ويسمح بتحليل شامل. يمكن مشاركة البيانات في الوقت الفعلي عبر السحابة مع الأطراف المختلفة، مثل الفرق الهندسية أو فرق الصيانة، مما يسهل اتخاذ القرارات السريعة والمبنية على معلومات دقيقة.

كيف يعمل التوأم الرقمي في المصانع؟

- نقل البيانات في الوقت الفعلي :من خلال أجهزة استشعار منتشرة في المصنع، يتم جمع البيانات المتعلقة بالضغط، الحرارة، التدفق، والمكونات الأخرى بشكل دائم.
- التحليل والتمثيل الرقمي :يتم تحويل هذه البيانات إلى نماذج رقمية تمثل حالة المصنع، مما يوفر للمشغلين تصورًا دقيقًا للمصنع وعملية التشغيل.
- التحسين المستمر :من خلال التحليلات المتقدمة مثل الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي، يتمكن النظام من التكيف والتحسين استنادًا إلى البيانات المُجمعة، مما يسمح بتحقيق تحسين مستمر في الإنتاجية والأداء [28]. يبين الشكل (2-7) السلامة المهنية وتطبيقات التوأم الرقمي في تنفيذ مبادرات التميز التشغيلي.

الشكل (2-7)
السلامة المهنية وتطبيقات التوأم الرقمي في تنفيذ مبادرات التميز التشغيلي



المصدر: عماد نصيف مكي، " دور التحول الرقمي في تحسين أداء صناعة التكرير والبتروكيماويات"، أوابك، 2021.

[28] https://www.yokogawa.com/library/resources/media-publications/combining-the-power-of-digital-twins-with-cloud-based-collaboration-assures-optimal-refinery-performance

8.4.2. الطائرات بدون طيار "المسيرة"

تعتبر الطائرات المسيرة من الأدوات الحديثة التي تقدم مزايا متعددة في المراقبة والصيانة، مما يعزز الكفاءة ويقلل من المخاطر. بعض الفوائد الرئيسية التي توفرها الطائرات المسيرة في هذه الصناعة:

1. تعزيز السلامة

- فحص المناطق الصعبة أو الخطرة :في صناعة البتروكيماويات، هناك العديد من الأماكن التي يصعب الوصول إليها أو التي تمثل خطرًا على السلامة مثل الشعلات، الأبراج، والمعدات التي تعمل في بيئات عالية الحرارة أو الضغط. الطائرات بدون طيار قادرة على فحص هذه المواقع بشكل آمن ودقيق دون الحاجة إلى إرسال العمال إلى أماكن خطرة.
- تقليل التعرض للمخاطر :من خلال استخدام الطائرات المسيرة، يتم تقليل الحاجة لإرسال الأشخاص إلى المناطق ذات المخاطر العالية، مما يقلل من الحوادث والإصابات المهنية ويحسن بيئة العمل.

2. تحسين الكفاءة التشغيلية

- إجراء التفتيش بشكل أسرع وأكثر دقة :الطائرات بدون طيار مزودة بكاميرات عالية الدقة وأجهزة استشعار لالتقاط صور وتسجيل البيانات بسرعة وبدقة تفوق الطرق التقليدية مثل التفتيش اليدوي. يمكن للطائرات أن تقوم بعملية التفتيش بشكل أسرع مما يساهم في تقليل فترات التوقف للمصانع، وبالتالي تحسين الكفاءة التشغيلية.
- جمع البيانات في الوقت الحقيقي :يمكن للطائرات أن تقدم تحديثات في الوقت الفعلي حول حالة المعدات أو العملية الصناعية، مما يسهل اتخاذ قرارات سريعة وأكثر دقة.

3. تقليل التكاليف التشغيلية

- تقليل الحاجة إلى التفتيش اليدوي :الطائرات بدون طيار تقلل من الحاجة إلى إرسال فرق التفتيش إلى مواقع العمل الخطرة، مما يقلل من التكاليف المرتبطة بالتفتيش اليدوي .كما أن استخدام الطائرات يقلل أيضًا من الحاجة إلى التوقفات الطويلة لتنفيذ فحوصات دورية.

- تحقيق وفورات في التكاليف :من خلال تقليل فترة التوقف وزيادة سرعة ودقة عمليات التفتيش، يمكن تقليل التكاليف التشغيلية بشكل ملحوظ. هذه الوفورات يمكن توجيهها إلى مناطق أخرى من العمليات التي تحتاج إلى استثمارات مثل الصيانة أو التطوير التكنولوجي.

4. بيانات عالية الجودة وفي الوقت المناسب

- التقنيات المتقدمة في جمع البيانات :الطائرات المسيرة الحديثة مزودة بـأجهزة استشعار متطورة مثل الأشعة تحت الحمراء، والكاميرات الحرارية، وأجهزة الكشف عن التسريبات، مما يمكنها من جمع بيانات عالية الجودة عن العمليات.
- دعم اتخاذ القرار :يمكن استخدام هذه البيانات في الوقت الحقيقي من قبل الفرق الفنية والإدارية لتحديد المشكلات قبل أن تتفاقم، وبالتالي اتخاذ قرارات أفضل بشأن الصيانة التنبؤية وتحسين الأداء العام للمصانع.

5. المراقبة البيئية والامتثال

- تساهم الطائرات المسيرة بشكل فعال في تحسين إدارة البيئة والسلامة في المنشآت الصناعية من خلال مراقبة **الانبعاثات والتسريبات** .حيث تساعد في الكشف المبكر عن أي تسريبات أو مشاكل بيئية، مثل الغازات السامة أو المواد القابلة للاشتعال، مما يسهم في الوقاية من المخاطر البيئية. بالإضافة إلى ذلك، تتيح الطائرات بدون طيار **دعم الامتثال البيئي** من خلال تقديم بيانات دقيقة وموثوقة تضمن التزام المصانع بالمعايير البيئية وتقليل التأثيرات السلبية على البيئة. كما توفر هذه التقنية توثيقًا يدعم الامتثال للمعايير التنظيمية المحلية والدولية، مما يساعد المنشآت على تحقيق أهدافها البيئية بشكل أكثر فعالية.. يبن الشكل (2-8) استخدام الطائرات المسيرة في عمليات الفحص والمراقبة في صناعة البتروكيماويات.

الشكل (2-8)

استخدام الطائرات المسيرة في عمليات الفحص والمراقبة في صناعة البتروكيماويات

المصدر: Teradron, Elevating Petrochemical Operations: The Role of Drones in the Industry,2023

5.2. أنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الرقمية

لا يوجد تعريف عام ومشترك أو تعريف واضح ومميز لأنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الجديدة، بسبب طبيعتها المتنوعة والخطوط غير الواضحة بين مراقبة الصحة والسلامة المهنية ومراقبة الأداء .لذلك من المقترح أن يكون التعريف لأنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الجديدة، استناداً إلى التعريفات الحالية للصحة والسلامة المهنية وأنظمة المراقبة الأخرى، كما يلي: "تستخدم أنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الجديدة التكنولوجيا الرقمية لجمع وتحليل البيانات من أجل تحديد وتقييم المخاطر، ومنع و/أو تقليل الضرر، وتعزيز السلامة والصحة المهنية"[29].

تشمل الأنظمة والتقنيات الرقمية التي تدعم أنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الجديدة، تكنولوجيا المعلومات والاتصالات (أجهزة وخدمات تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، الكاميرات، الذكاء الاصطناعي، الواقع المعزز و/أو إنترنت الأشياء، البيانات الضخمة)، الأجهزة القابلة للارتداء، الملابس الذكية، الأجهزة الخارجية المساعدة، الطائرات بدون طيار ومعدات الحماية الشخصية [30]. لذا فإنه يمكن لتحليلات الفيديو المدعومة بالذكاء الاصطناعي والأجهزة القابلة للارتداء التي تدعم إنترنت الأشياء مراقبة سلوك العمال والظروف البيئية، وتحديد المخاطر المحتملة للسلامة ومنع الحوادث. فيمكن على سبيل المثال، لخوارزميات الذكاء الاصطناعي اكتشاف ما إذا كان العمال لا يرتدون معدات السلامة المناسبة أو يدخلون مناطق محظورة. وبالمثل، يمكن لأجهزة استشعار إنترنت الأشياء مراقبة تسرب الغاز ومخاطر الحرائق والمخاطر البيئية الأخرى، مما يؤدي إلى تشغيل أجهزة الإنذار وتمكين الاستجابة السريعة.

1.5.2. المخاطر الصحية والسلامة البدنية

وفقًا لمنظمة العمل الدولية، يمكن لحلول السلامة التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي تقليل حوادث مكان العمل بنسبة تصل إلى 50٪. من خلال إعطاء الأولوية للسلامة والتخفيف من المخاطر

[29] European Agency for Safety and Health at Work, Smart digital monitoring systems for occupational safety and health: workplace resources for design, implementation and use, 2022.

[30] Ball, K. (2021). Electronic monitoring and surveillance in the workplace. Literature review and policy recommendations. Publications Office of the European Union.

بشكل استباقي [31]. وعلى الرغم من أن أنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الجديدة توفر مجموعة واسعة من فرص السلامة والأمان، إلا أنها تحتوي على مخاطر وتحديات ومخاطر نفسية اجتماعية، وبعض القيود المتعلقة بالتدريب. قد يكون لأنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الجديدة تأثيرات سلبية في بعض الأحيان، على سبيل المثال، قد تشكل الأجهزة الخارجية المساعدة عددًا من المخاطر المحتملة، حيث عدم ضمان قدرتها توزيع الضغط بالتساوي على كل الجسم، يمكن أن يسبب الضغط في بعض أجزاء الجسم دون زيادته على أجزاء أخرى، مما يتسبب في التوزيع السلبي للضغوط على كل الجسم.

كما يمكن أن تعيق الأجهزة الخارجية المساعدة الحركة وتؤدي إلى الاصطدامات بسبب بنيتها الضخمة، وقد تسبب عدم الراحة أو تهيج الجلد أو زيادة الحمل والإجهاد القلبي. كما أن الاعتماد على ارتداء الأجهزة الخارجية المساعدة قد يؤدي إلى شعور العمال بالثقة الزائدة نتيجة شعورهم بالأمان مما يؤدي إلى إصابتهم بالأذى أو وقوع الحوادث. وقد يتسبب تطبيق الواقع الافتراضي والواقع المعزز في الارتباك ودوار الحركة **Motion Sickness** (يُطلق عليه أيضًا دوار الإنترنت)[32] وإجهاد العين. كما قد تسهم كذلك برامج الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي والتعلم العميق في بعض التأثيرات الضارة. على سبيل المثال، عندما يكون هناك حادث على وشك الحدوث، ويتم تكليف الذكاء الاصطناعي بدعم عملية اتخاذ القرارات الحاسمة، وفي حال أن هذه الأنظمة لا تحتوي على بيانات موثوقة ودقيقة وغير مطابقة لمواصفات معايير التقييم، قد تكون العواقب وخيمة [33].

بالإضافة إلى ذلك، قد تواجه التقنيات الرقمية الذكية تحديات غير متوقعة في بيئات العمل الحقيقية فمثلاً، قد لا تتمكن الكاميرات الحرارية في أنظمة الطائرات بدون طيار من تحديد موقع العامل إذا لم يكن الفرق بين الشخص والمحيط واضحاً، كما يمكن أن تشكل مخاطر أمنية على العمال بسبب خلل في النظام أو بسبب الهجمات الإلكترونية. كما قد تتعطل التقنيات الرقمية الذكية، في حال أن

[31] **Digital Transformation in Petrochemicals: How AI and IoT are Revolutionizing the Industry,2024.**

[32] نوع من دوار الحركة يصيب الأشخاص الذين يقضون فترات طويلة على الشاشات الرقمية، مما يسبب الغثيان والدوار والصداع وإجهاد العين

[33] Chang, E., Kim, H. T., & Yoo, B. (2020). Virtual reality sickness: A review of causes and measurements. International Journal of Human–Computer Interaction, 36(17), 1658-1682.

البطاريات غير فعالة أو تتوقف عن العمل، أو تسخن أو تشتعل فيها النيران أو تنفجر. وأيضاً يمكن أن يخترق الماء بعض الأجزاء الكهربائية، مما قد يتسبب في حدوث ماس كهربائي أو صدمات كهربائية [34].

2.5.2. المخاطر النفسية الاجتماعية

تبرز العديد من المخاطر النفسية الاجتماعية المحتملة التي قد تترتب على استخدام أنظمة مراقبة الصحة والسلامة المهنية الجديدة، حيث يمكن أن يرتدي العمال في مختلف القطاعات الإنتاجية أجهزة إلكترونية صغيرة لقياس العلامات الحيوية مثل إيقاع القلب والنشاط الكهربائي وضغط الدم ودرجة حرارة الجسم، وقد تحتوي هذه الأجهزة على كميات هائلة من البيانات، لذا من المهم تحديد من له الحق في الاطلاع على هذه البيانات والتعامل معها، وأليات دمجها وتخزينها ونقلها إلى طرف ثالث مثل مقدمي الخدمات الخارجيين، وحمايتها من خطر الاختراق والسرقات. ، ويمكن اعتبارها بمثابة انتهاك للخصوصية، خاصةً فيما يتعلق بخصوصية البيانات وملكيتها والأمن. قد تنشأ مخاطر نفسية اجتماعية نتيجة الخوف من تعطل التكنولوجيا

6.2. إدارة البيانات

تتميز صناعة البتروكيماويات بضخامة البيانات الخاصة بالإنتاج والعمليات التصنيعية والتشغيلية، والتي يلزم تحليلها بغرض اكتشاف الخلل أو الحيود في ظروف الإنتاج والتشغيل، لضمان سلامة وسلاسة الإنتاج، فضلاً عن التنبؤات بالأعطال قبل حدوثها، بما يضمن اتخاذ القرار المناسب في الوقت المناسب. لذا، لابد من تقنيات لإدارة وتحليل هذه البيانات، ومنها:

1.6.2. الحوسبة السحابية Cloud Computing

تُشير الحوسبة السحابية إلى عمليات التخزين والمعالجة والوصول إلى البيانات والتطبيقات عبر الخوادم البعيدة من مصادر متعددة من خلال الإنترنت، وذلك بهدف تمكين تحليل البيانات بشكل تعاوني عبر فرق العمل المنتشرة جغرافياً. يعيب تطبيق الحوسبة السحابية آليات ضمان سلامة وأمن المنصة عندما يتعلق الأمر بمنع أخطار التطفل وسرقة البيانات من خلال القرصنة، فضلاً عن صلاحية

34 EU-OSHA – European Agency for Safety and Health at Work, Artificial intelligence for worker management: an overview, 2022. h

الموقع المستخدم في تخزين البيانات على المدى الطويل، نظراً للتقلبات في سوق الخدمات، مع خطر الإغلاق الذي يؤدي إلى فقدان البيانات.[35]

2.6.2. أنظمة الأمن السيبراني Cybersecurity Systems

غالباً ما يُخلط بين "الأمن السيبراني"، و "أمن المعلومات"، حيث إنهما مفهومان متشابهان، ولكنهما مختلفان في بعض الجوانب. حيث إن الأمن السيبراني هو حماية المعلومات والأنظمة الإلكترونية من الهجمات الرقمية. بينما أمن المعلومات هو حماية المعلومات من الوصول، أو الاستخدام، أو الإفشاء أو التغيير أو التدمير غير المصرح به. يعد الأمن السيبراني أمراً بالغ الأهمية للمؤسسات بمختلف أحجامها، وهو مجموعة من الممارسات والإجراءات التي تهدف إلى حماية المعلومات والأنظمة الإلكترونية من الهجمات الرقمية لتفادي العواقب الوخيمة مثل الاضطرابات التشغيلية والخسائر الاقتصادية، والإضرار بالسمعة، وحتى الأضرار بالبيئة. هناك عدد من نقاط الضعف المحتملة والتي تسهم في تسهيل الهجوم السيبراني، ولعل من أهمها:

- **الهجمات السطحية "Surface attacks"**، وفيها يستغل المهاجمون أي ثغرات بسبب طبيعة الأنظمة التي تكون متاحة لهم. وحيث إن الأنظمة في صناعة البتروكيماويات تتطلب زيادة توافر البيانات لتحسين كفاءة العمليات، فإن ذلك يزيد من المساحة السطحية للهجمات والتعرض المحتمل لنقاط ضعف الهجمات.
- **الهجمات الناجمة عن التقدم التكنولوجي**، تحدث نتيجة الأعداد الكبيرة والمتزايدة باستمرار من الهواتف المحمولة والأجهزة اللوحية، وجميع الأجهزة الأخرى التي تتمتع بإمكانية الوصول إلى أنظمة التشغيل للعمليات في مراحل الإنتاج المختلفة. مما قد تسبب ثغرات محتملة لدخول المهاجمين، والجرائم الإلكترونية.
- **الهجمات الناجمة عن خطأ بشري في العمليات**، تشير الأبحاث إلى أن حوالي 27% من الهجمات الإلكترونية في الصناعة نتيجة لخطأ بشري. وبالتالي، عندما يتعلق الأمر باستراتيجيات المؤسسة ضد انتهاكات البيانات والخصوصية، يجب أن تشمل تدريب الموظفين وتحديد أدوارهم

[35] (Zwingelstein, 2019)

ومسؤولياتهم. ويجب أن تتناول السياسات أيضاً الأجهزة الشخصية، نظراً لأن الأجهزة التي تستخدم بشكل خاطئ، تعد نقاط ضعف وأهداف سهلة.

- **الهجمات بسبب سهولة الوصول**، عندما يتعلق الأمر بصناعتي التكرير والبتروكيماويات، فإنه يجب فصل الشبكات عن منطقة العمليات، ولا ينبغي أن يكون الوصول إلى النظام بأكمله متاحاً للجميع في وقت واحد، حتى لو تم اختراق منطقة الإنتاج، فلا ينبغي أن يتم اختراق النظام بأكمله[36].

7.2. الأمن الصناعي Industrial Safety

الأمن الصناعي يعد من الركائز الأساسية في إدارة سلامة العمليات الصناعية، حيث يُعتبر الأداة الفعّالة التي تضمن حماية العمال، المعدات، الموارد، وكذلك الحفاظ على البيئة .يشمل مجموعة من التدابير، السياسات، والإجراءات التي تهدف إلى تقليل المخاطر والحوادث التي قد تهدد استمرارية العمليات الصناعية وسلامة المنشأة .تشمل هذه السياسات مجموعة من الأنظمة والخطط المصممة وفقًا للأطر المحلية والدولية للمساعدة في حماية المنشآت والعاملين من الأخطار المحتملة، بالإضافة إلى توفير استراتيجيات للحد من تأثير هذه المخاطر.

1.7.2. أدوار الأمن الصناعي في حماية المنشأة:

التخطيط والتنفيذ:

- **مخططات السلامة** :هي النماذج التي تحدد تصميم الأنظمة الأساسية لضمان السلامة وفقًا لمعايير الأمان المعترف بها. يشمل ذلك تحديد المخاطر المحتملة في بيئة العمل مثل مخاطر الحريق، التسريبات، أو التسربات الكيميائية، بالإضافة إلى وضع الإجراءات الوقائية والإطفائية للحد من هذه المخاطر.
- **أنظمة مكافحة الحريق** :أحد الجوانب الحيوية التي يقع على عاتق الأمن الصناعي. يشمل ذلك التأكد من فعالية أنظمة الإنذار، أنظمة رش المياه، أنظمة الإطفاء بالمواد الكيميائية، بالإضافة إلى خطة الاستجابة السريعة في حالة وقوع حوادث.

[36] QRC, **CYBER RESILIENCE FOR THE PETROCHEMICAL INDUSTRY**

التدريب وزيادة الوعي:

- التدريب المستمر على إجراءات السلامة يعد أحد الجوانب الأساسية في الثقافة المهنية داخل المنشآت الصناعية. يجب على الأمن الصناعي ضمان أن جميع العاملين على دراية تامة بالإجراءات الوقائية، وتدابير الطوارئ، وكيفية التعامل مع الحوادث أو المخاطر المحتملة.
- تعزيز الوعي الجماعي لدى جميع العاملين داخل المنشأة، بما في ذلك اتخاذ الإجراءات الوقائية بشكل صحيح ومتابعة الخطط التدريبية المتعلقة بمخاطر العمل.

مراقبة الأداء وتحليل المخاطر:

- تقع على إدارة الأمن الصناعي مسؤولية مراقبة العمليات وتقييم المخاطر المحتملة في المنشأة. يتطلب ذلك استخدام أدوات وتقنيات مثل تقييم المخاطر (Risk Assessment)الذي يهدف إلى تحديد المخاطر وتحليل مدى تأثيرها.
- تشمل هذه العملية تحليل كل مرحلة من مراحل الإنتاج، من المواد الأولية إلى المنتجات النهائية، مع تحديد النقاط الحساسة التي قد ترفع من احتمالية الحوادث.

2.7.2. دور التحول الرقمي في تحسين إدارة الأمن الصناعي:

على الرغم من أن إجراء تقييم المخاطر قد يبدو مهمة معقدة ويحتاج إلى وقت طويل في البيئة الصناعية، إلا أن التحول الرقمي والتقنيات المتطورة قد جعلت من هذه المهمة أكثر كفاءة ودقة. من خلال التطبيقات الذكية والذكاء الاصطناعي(AI) ، أصبح من الممكن أتمتة وتحسين عمليات تحليل المخاطر من خلال:

- **جمع وتحليل البيانات:**

توفر الأدوات الرقمية قدرة عالية على جمع البيانات من المستشعرات، الكاميرات، أنظمة مراقبة التدفق، وأجهزة القياس البيئية في الوقت الفعلي. هذه البيانات يمكن أن تتضمن درجات الحرارة، الضغط، معدلات التدفق، تركيزات المواد الكيميائية، وغيرها من البيانات الحيوية.

- **اكتشاف الأنماط والعلاقات السببية:**

من خلال تطبيقات الذكاء الاصطناعي والتحليلات المتقدمة، يمكن اكتشاف الأنماط والعلاقات السببية بين العوامل المختلفة التي قد تؤدي إلى حوادث صناعية. هذه الأنظمة قادرة على تحديد المخاطر الخفية في العمليات المعقدة التي قد تكون من الصعب ملاحظتها بالطرق التقليدية.

- **التنبؤ بالتهديدات والمخاطر المحتملة:**

يوفر التحول الرقمي القدرة على التنبؤ بالمخاطر والتهديدات المستقبلية بشكل أكثر دقة باستخدام الخوارزميات التنبؤية التي تستند إلى البيانات التاريخية والبيانات الحية .يمكن استخدام هذه التنبؤات لتخطيط الإجراءات الوقائية وتحسين الاستجابة للطوارئ.

- **تحليل البيانات الضخمة:(Big Data)**

تُعد البيانات الضخمة أحد الأعمدة الأساسية في فهم وتحليل المخاطر الصناعية. من خلال التحليل المتقدم للبيانات، يمكن تصفية وتحليل كميات ضخمة من المعلومات ذات الصلة، مما يساعد في تحديد التهديدات والأخطاء التي قد تكون قد تم تجاهلها سابقًا.

- **إدارة الاستجابة للطوارئ:**

من خلال دمج أنظمة الأمان الذكية، يمكن تحسين استجابة الطوارئ من خلال جمع البيانات في الوقت الفعلي، مما يتيح الاستجابة السريعة والتنسيق بين الفرق الأمنية وفرق الطوارئ. كما يمكن توفير إجراءات تنبيه تلقائية لفرق السلامة لتخفيف الآثار السلبية على الصحة والسلامة.

الفصل الثالث

تطبيقات التحول الرقمي في تحديد مخاطر السلامة وتقييم الأثر البيئي في صناعتي التكرير والبتروكيماويات

الفصل الثالث
تطبيقات التحول الرقمي في تحديد مخاطر السلامة وتقييم الأثر البيئي في صناعتي التكرير والبتروكيماويات

مقدمة

تحديد المخاطر يُعتبر من الخطوات الأساسية لضمان التصميم والتشغيل الآمن في منشآت التكرير والبتروكيماويات، خاصة وأن هذه المنشآت تشمل عمليات تشغيلية معقدة تتطلب أقصى درجات الدقة في إدارتها. إن تحديد المخاطر بشكل دقيق هو عامل حاسم في تحسين السلامة والحد من الحوادث التي قد تحدث نتيجة للتفاعل مع المواد الكيميائية، الحرارة العالية، أو الضغوط المرتفعة في أنظمة الإنتاج [32]، والقضاء على أي أسباب يمكن أن تؤدي إلى حوادث كبيرة، سواء كانت حرائق أو انفجارات، أو انبعاثات سامة. تستخدم البرامج الرقمية، مثل إنترنت الأشياء الصناعي، والذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة في تعزيز برتوكولات وبرامج السلامة، بينما تسهم تطبيقات تكنولوجيا الاستشعار ومساهمات التوائم الرقمية في تحسين السلامة [37]. وأما مخططات وبرامج السلامة فهي عبارة عن مجموعة من النماذج والتصميمات لأنظمة السلامة حسب المعايير الدولية والمحلية اللازمة للحفاظ على سلامة المنشأة والعاملين بها، ولتحديد المخاطر المحتملة وتحديد الإجراءات الوقائية والإطفائية اللازمة للحد من تأثير هذه المخاطر.

على الرغم من أن عملية تقييم المخاطر قد تبدو معقدة، فإن التحول الرقمي السريع وتوفر مجموعة واسعة من الأدوات الرقمية، بالإضافة إلى تطبيقات الذكاء الاصطناعي، يمكن أن تسهم بشكل كبير في تبسيط هذه المهمة. فهذه التقنيات قادرة على تحويل كميات ضخمة ومتنوعة من البيانات إلى شكل رقمي يسهل تخزينه وتصنيفه وتحليله، مما يساعد في اكتشاف العلاقات السببية الجديدة داخل الأنظمة المعقدة. وبالتالي، فإنها تساهم في تحسين دقة التنبؤات وزيادة سرعة تقييم وتحليل المخاطر[38].

من ناحية أخرى، وبالنظر إلى الإمكانية الكبيرة لخلق تأثيرات سلبية على البيئة نتيجة لأنشطة صناعات التكرير والبتروكيماويات، فإن دراسات تقييم التأثير البيئي والاجتماعي، والمعروفة أيضًا بتقييم

[37] Hossien Abedsoltan, Future of process safety: Insights, approaches, and potential developments, Scienceirect, 2024.
[38] SprengerLink, **The Digitalization of Risk Assessment: Fulfilling the Promises of Prediction?2023.**

الأثر البيئي (EIA) أو التقييم البيئي المتكامل(IEA) ، تعتبر أساسية في اتخاذ قرارات تطوير هذه المشاريع. ذلك لأنها تساهم في تحديد ومعالجة المخاطر البيئية والاجتماعية والاقتصادية المحتملة المرتبطة بالمشروعات. لقد أسهم تطبيق تقنيات التحول الرقمي في دراسات تقييم الأثر البيئي في إحداث تغيير جوهري، حيث وفّر نظامًا بيئيًا افتراضيًا عالميًا من خلال ربط جميع المعلومات البيئية المتاحة بنظام معلومات جغرافية مفصل. كما ضمنت هذه التقنيات توفر البيانات على شبكة الإنترنت ودمجها في أرشيف يسهل البحث فيه، مما يساعد في اتخاذ قرارات بيئية حاسمة قائمة على بيانات دقيقة وتحليلات متعمقة [39].

1.3. برامج الصحة والسلامة المهنية وحماية البيئة

من الأساليب والأنظمة الدولية التي تم تطويرها في مجال السلامة والصحة المهنية، تبرز دراسة المخاطر وقابلية التشغيل، أو ما يُعرف بإدارة المخاطر التشغيلية **HAZOP**. تُعتبر هذه التقنية نظامًا معترفًا به لتحليل وتحديد وتقييم مخاطر العمليات الصناعية، سواء كانت قائمة أو مخططة، مع التركيز على تحديد مدى تأثيرها ومنع حدوث أي حوادث أو تهديدات قد تؤثر بشكل مباشر على سلامة الأفراد أو المعدات أو تعيق سير العمل . أما دراسة تحليل المخاطر **HAZAN**، فهي تُعد الخطوة الأولية لتقييم المخاطر. كما تم تطوير دراسة تحليل طبقة الحماية **LOPA**، التي تهدف إلى تحليل وتحديد المخاطر المحتملة، وتحديد التدابير الوقائية المتاحة للتعامل مع العواقب المحتملة لتلك المخاطر .

من جهة أخرى، يُعد نموذج نمذجة الحوادث العملية والنظرية **STAMP**، الذي يُعتبر نموذجا "السببية الجديدة"، أداة مبتكرة لتحديد أسباب الحوادث. هذا النموذج يوفر أسسًا جديدة لهندسة سلامة الأنظمة ويساعد في فهم العلاقة بين العوامل المختلفة التي تساهم في الحوادث[40]. إضافة إلى ذلك، توفر أنظمة إدارة السلامة **SMS** نهجًا منظمًا لتحقيق مستويات مقبولة من مخاطر السلامة، وهي تعتمد على أربعة ركائز رئيسية :

39 Daniel A. Farber, Bringing Environmental Assessment into the Digital Age,2016.
40 https://www.functionalsafetyengineer.com/introduction-to-stamp/

1. **سياسة السلامة:** وتُعنى بتأكيد التزام الإدارة العليا بالتحسين المستمر للسلامة، وتحديد الأساليب والعمليات والهيكل التنظيمي اللازم لتحقيق أهداف السلامة .
2. **إدارة مخاطر السلامة:** وهي المعنية بتحديد الحاجة إلى ضوابط مخاطر جديدة أو معدلة ومدى ملاءمتها بناءً على تقييم المخاطر المقبولة .
3. **ضمان السلامة:** والتي تضمن تقييم فعالية استراتيجيات التحكم في المخاطر بشكل مستمر، ودعم تحديد المخاطر الجديدة .
4. **تعزيز السلامة "ثقافة السلامة":** ويتضمن تدريب العاملين على أنظمة إدارة السلامة، نشر دروس السلامة المستفادة، وتعريف كل فرد بدوره في تعزيز السلامة، إلى جانب تطبيق إجراءات أخرى لخلق ثقافة سلامة إيجابية في جميع مستويات القوى العاملة [41].

في هذا السياق، يُعد نظام **OHSAS 18001** أحد الأنظمة الأساسية لإدارة السلامة، والذي يساعد في تقليل التكاليف المباشرة وغير المباشرة عبر منع الإصابات في مواقع العمل. لكن بسبب وجود بعض الفجوات والقصور في النظام، تم اعتماد مواصفة السلامة والصحة المهنية **ISO 45001:2018** الحديثة كإطار دولي معترف به للشركات من جميع الأحجام. وتوفر هذه المواصفة إجراءات صارمة للحد من المخاطر المتعلقة بالسلامة والصحة المهنية، كما تحدد متطلبات نظام إدارة الصحة والسلامة المهنية وتقدم الإرشادات اللازمة لتطبيقها. وتهدف إلى توفير بيئات عمل آمنة وصحية، وتحفيز الابتكار لتحسين أداء النظام بشكل استباقي، مع الامتثال للتشريعات القانونية وتقليل الخسائر المرتبطة بالعمل .

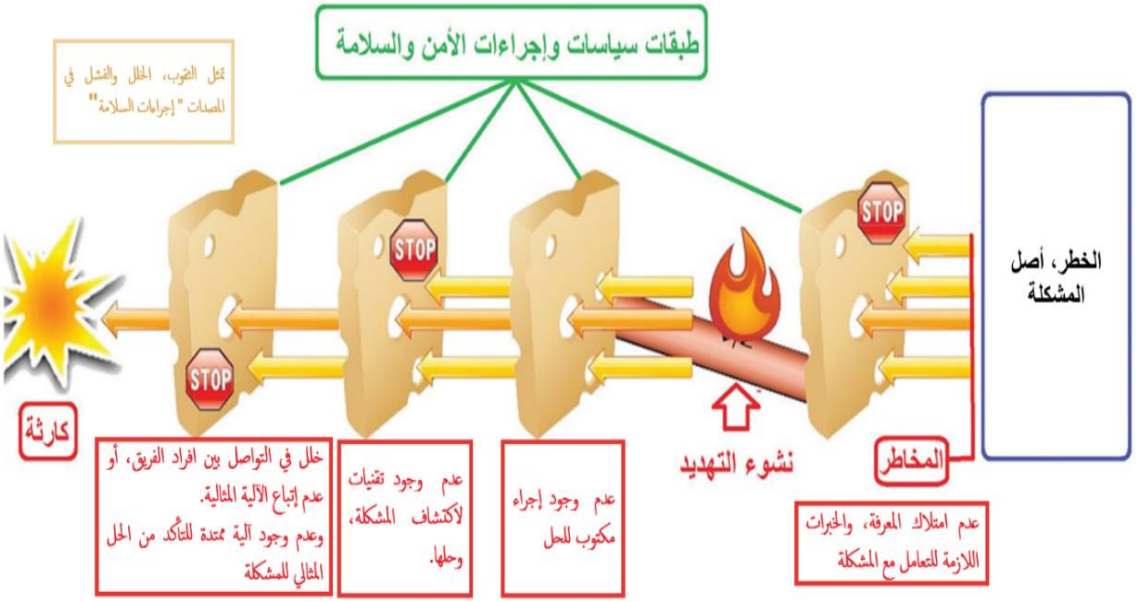
ومن جانب آخر، لا تنجم الحوادث عادة عن سبب أو عامل واحد فقط، بل تكون نتيجة لتفاعل عدة أسباب وعوامل[42]. ففي صناعة البتروكيماويات، على سبيل المثال، يحدث في المتوسط سبع أفعال غير آمنة قبل وقوع الحادث[43]. وعند النظر إليها بشكل منفرد، قد تبدو هذه الأفعال غير مؤثرة، ولكن عند حدوثها مجتمعة، يمكن أن تشكل سلسلة من الأحداث التي تؤدي إلى كارثة. أفضل مثال على هذا الترابط هو نموذج الجبن السويسري **Swiss Cheese Model**، الذي وضعه العالم **Reason** في عام 1990. يفترض هذا النموذج أنه رغم وجود العديد من الحواجز (طبقات الدفاع) بين المخاطر المحتملة، إلا أن الحادث يمكن أن يحدث عندما توجد ثغرات في نظام إدارة المخاطر، وعندما يتم

[41] https://www.faa.gov/about/initiatives/sms/explained/components
[42] Hudson, et al. (1998, p. 1) or Knegtering and Pasman (2009, p. 164).
[43] Hudson, et al. (1998, p. 1).

اختراق هذه الحواجز المتعددة بالتتابع. يشير هذا النموذج إلى أن معظم الحوادث تحدث بسبب التقصير في المراقبة أو الإشراف، أو وجود شروط مسبقة غير آمنة، أو عوامل تنظيمية خاطئة تحول دون تحديد الانحرافات واتخاذ الإجراءات التصحيحية اللازمة لمعالجة الأسباب الجذرية للمشاكل. يبين الشكل (1-3) نموذج الجبن السويسري لتحليل المشاكل أو تحليل المخاطر.

الشكل: (3-1)

نموذج الجبن السويسري لتحليل المشاكل او تحليل المخاطر



المصدر: Y Li, H Thimbleby, Hot cheese: a processed Swiss cheese model, 2014 Royal College of Physicians of Edinburgh

1.3.3. تحليل الأسباب الجذرية Root Causes Analysis

نظرًا للعواقب الوخيمة التي قد تنجم عن الكوارث والحوادث الكبيرة، أصبحت القواعد التنظيمية أكثر صرامة، وتحولت إلى تشريعات وطنية في العديد من الدول. وبالتوازي مع ذلك، تم تطوير أنظمة وأدوات تحليل جديدة للمخاطر، من أبرزها **تحليل شجرة الأخطاء Failure Tree Analysis (FTA)**، وهو أداة تحليلية تهدف إلى تحديد الأسباب الرئيسية التي يمكن أن تؤدي إلى وقوع حدث خطر غير مرغوب فيه (أو "الفشل"). يهدف هذا التحليل إلى تحديد الأسباب الجذرية للحوادث، بالإضافة إلى تقدير تكلفة تلك الحوادث.

لتنفيذ التحقيقات في الحوادث والوقائع، يجب تطبيق منهجية محددة ومدروسة، تتبع أسلوب "من أعلى إلى أسفل"، للوصول إلى الحقائق التي تساهم في فهم أعمق للمشكلة أو الحادث. من خلال هذه المنهجية، يمكن الوصول إلى جذور المشكلة وتحديد الحلول والإجراءات المناسبة لمنع تكرارها في المستقبل.

عادةً ما يتم تمثيل نتائج التحليل بشكل تصويري على شكل "شجرة" تعرض الأنماط المختلفة للأخطاء التي يمكن أن تؤدي إلى الحادث الرئيسي. في البداية، يتم تحديد الحدث الرئيسي أو الحادث على رأس الشجرة. من هناك، يبدأ طرح الأسئلة مثل "لماذا؟" أو "كيف؟" حدث الخطأ الذي أدى إلى وقوع المشكلة. يتم سرد الأسباب المحتملة التي قد تكون تسببت في الخطأ في المستوى الأول من الشجرة، وهو الذي يقع تحت الحدث الرئيسي.

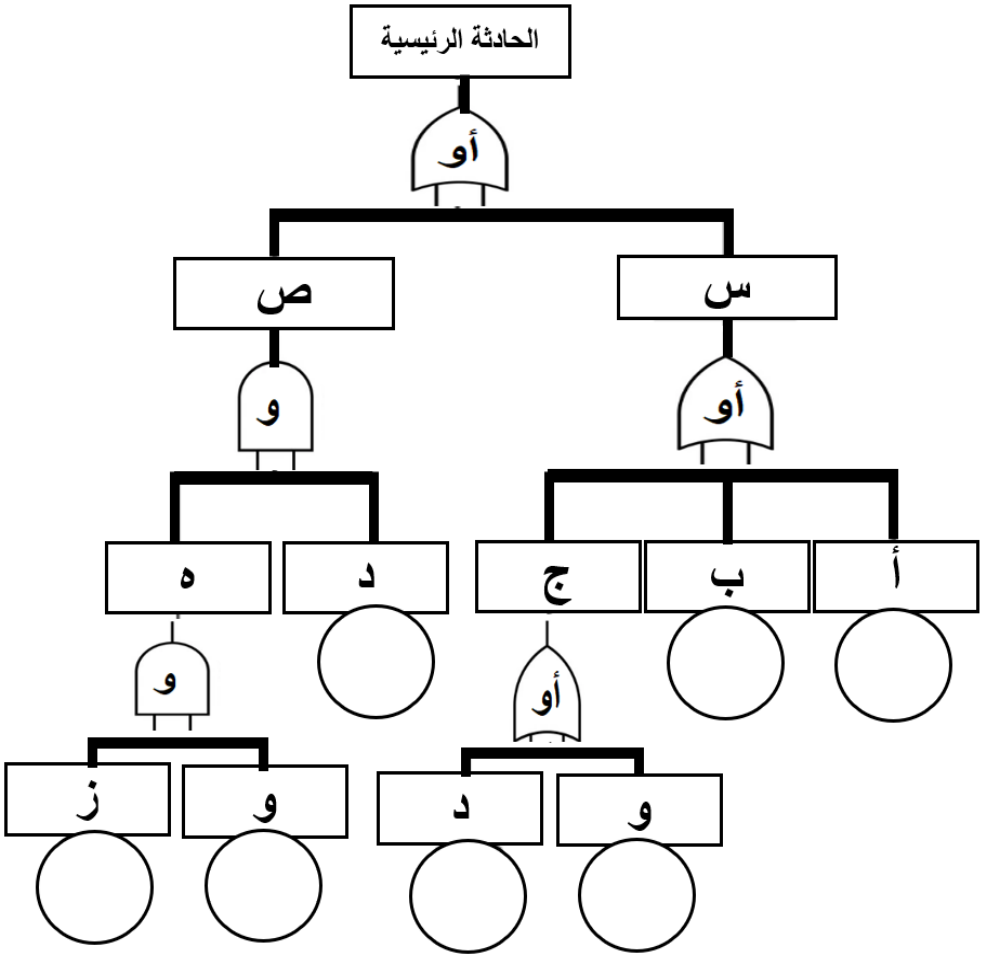
ثم، يتم تحليل كل عنصر في هذا المستوى، وتطرح نفس الأسئلة حوله: "لماذا؟" أو "كيف؟" حدث هذا العنصر؟ يتم تحديد الأسباب أو العوامل المترابطة التي قد تكون أدت إلى ذلك. بعد ذلك، يتم الانتقال إلى العنصر التالي في الصف الأول، وإعادة نفس العملية مع جميع العناصر الموجودة في هذا المستوى. تستمر العملية بطريقة تنازلية، حيث يتم الانتقال من صف إلى آخر لتحديد سلسلة الأسباب المؤدية إلى وقوع الحادث.

من خلال هذا التحليل التدريجي، يتم الكشف عن الأسباب الجذرية للحدث، مما يساهم في اتخاذ الإجراءات التصحيحية المناسبة وتقليل احتمالية حدوث الحوادث مستقبلاً.[44] يبين الشكل (2-3) مخطط تحليل شجرة الأخطاء.

[44] **Fault Tree Analysis,** Posted by Ted Hessing

الشكل (3-2)

مخطط تحليل شجرة الأخطاء



المصدر: سلطان الطيار، تحليل منوال الفشل: أساليب تعزيز الموثوقية

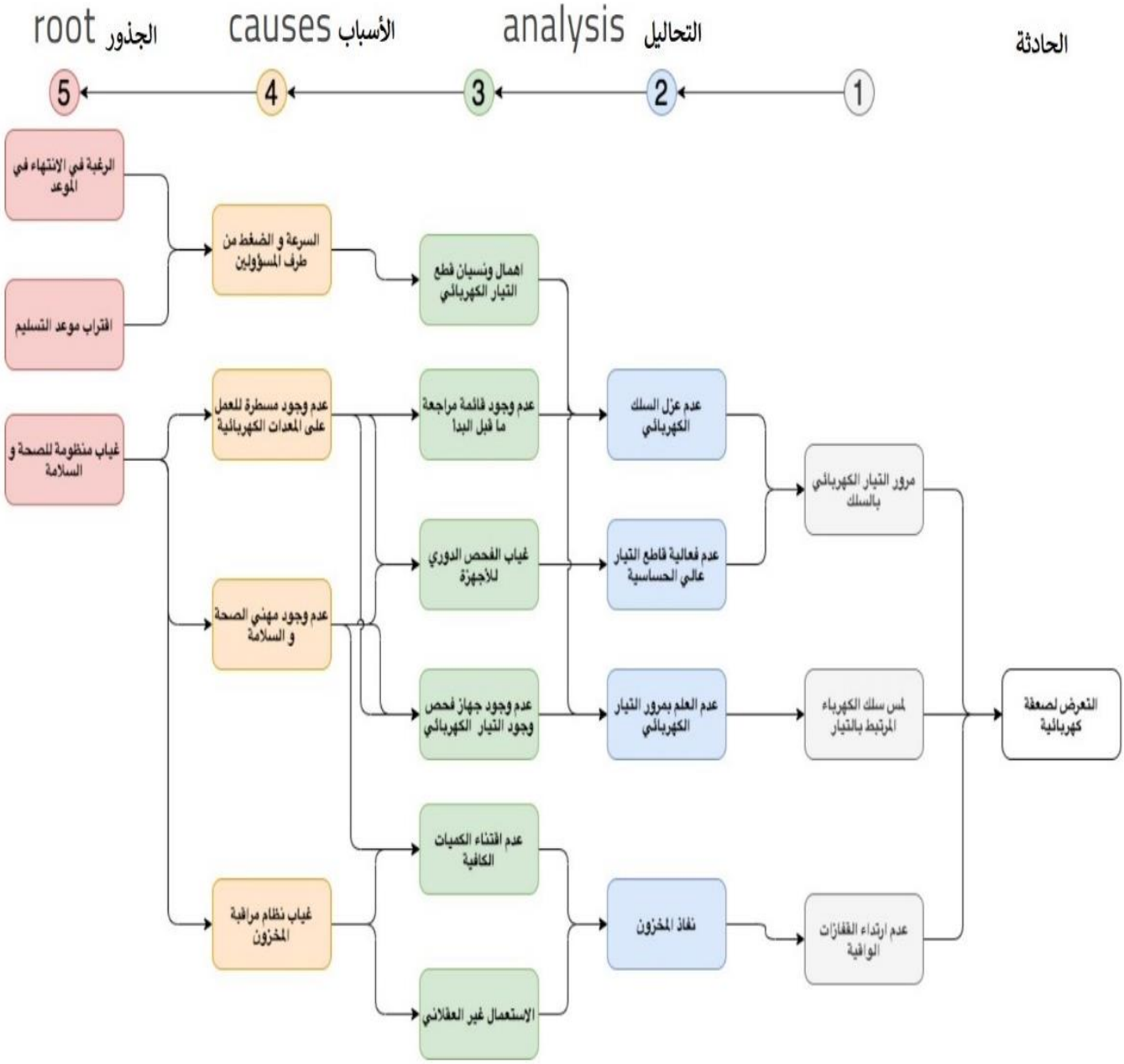
من الأساليب المستخدمة أيضًا في تحليل الأسباب الجذرية هو **تحليل "الخمسة لماذا 5 " 5Whys**، والذي يُعرف أحيانًا بمفاتيح الأسئلة الخمسة أو الاستفهامات الخمسة. تعتمد هذه الطريقة على طرح سؤال "لماذا" بشكل متسلسل ومتكرر خمس مرات متتالية، بهدف الوصول إلى السبب الجذري أو الحقيقة النهائية للمشكلة التي يتم تحليلها أو البحث فيها.

أظهرت التجارب أن طرح خمسة أسئلة "لماذا" بشكل متتابع يساعد في الكشف عن الأسباب الجذرية لمعظم المشاكل. في كل مرة يتم فيها طرح السؤال، يتم البحث عن السبب المباشر للمشكلة، ثم يتم الاستمرار في طرح السؤال مرة أخرى لمعرفة السبب وراء هذا السبب، وهكذا حتى الوصول إلى الجذر الأساسي للمشكلة.

تكمن فاعلية هذه الطريقة في بساطتها وسهولتها، حيث إنها لا تتطلب أدوات تحليل معقدة، لكنها توفر طريقة فعالة لتحديد العوامل الأساسية التي أدت إلى وقوع المشكلة. يساعد هذا التحليل في توجيه الجهود نحو إيجاد حلول فعالة ودائمة بدلًا من مجرد معالجة الأعراض الظاهرة للمشكلة، كما هو مبين في الشكل (3-3).

الشكل (3-3)

مخطط " مفاتيح الأسئلة الخمسة" لتحليل الأسباب الجذرية للحوادث



المصدر: تحليل الأسباب الجذرية للوقائعRoot Causes Analysis

مثالًا لحالة تعرض أحد العمال لصعقة كهربائية أثناء العمل على أحد المعدات الكهربائية، ويُظهر كيف يمكن استخدام **تحليل الخمسة لماذا** (5 Whys)لتحليل السبب الجذري لهذه الحادثة. تتم عملية التحليل عن طريق طرح سؤال "لماذا" بشكل متسلسل عبر خمس مستويات للوصول إلى السبب الجذري.

1. **لماذا تعرض العامل لصعقة كهربائية؟**

الإجابة: لأنه لمس السلك النحاسي المرتبط بالتيار الكهربائي.

2. **لماذا لمس العامل السلك الكهربائي؟**

الإجابة: لأنه لم يكن يعلم بمرور التيار الكهربائي في الجهاز.

3. **لماذا لم يعلم العامل بمرور التيار الكهربائي؟**

الإجابة: لأن هناك غيابًا لقائمة مراجعة قبل البدء للعمل على المعدات الكهربائية.

4. **لماذا لا توجد قائمة مراجعة قبل البدء؟**

الإجابة: لأنه لا توجد تعليمات مسطرة للعمل على المعدات الكهربائية.

5. **لماذا لا توجد تعليمات مسطرة للعمل على المعدات الكهربائية؟**

الإجابة: لأن هناك غيابًا لمنظومة الصحة والسلامة داخل المؤسسة.

من خلال هذا التحليل، تم الوصول إلى أحد الأسباب الجذرية التي أدت إلى وقوع الحادث، وهو **غياب منظومة الصحة والسلامة داخل المؤسسة** .وهذا يسلط الضوء على أهمية وضع أنظمة وإجراءات منظمة للسلامة لمنع وقوع مثل هذه الحوادث.

غالبًا ما تكون نتائج عمليات تحليل السبب الجذري التقليدية **يدوية** ومنعزلة، حيث يتم حفظ البيانات والرؤى في جداول البيانات أو المستندات أو الأنظمة غير المتكاملة. هذا يعوق فرق العمل من الوصول إلى المعلومات الضرورية في الوقت المناسب، ويؤدي إلى تشتت المعلومات وعدم توافرها في سياقات العمل الحقيقية.

إضافة إلى ذلك، تصبح الأدوات التقليدية لتحليل السبب الجذري أقل فاعلية في بيئات العمل الحديثة، التي تتسم بالتعقيد وتعدد العوامل المسببة للمشاكل. كما أن الحاجة لاتخاذ قرارات سريعة لتنفيذ الحلول قد تجعل هذه الأدوات التقليدية غير كافية.

لتجاوز هذه القيود، يمكن الاستفادة من البرامج الحديثة المعتمدة على الحوسبة السحابية مثل **"Modern cloud-native platforms"**، التي توفر منصات تعاونية تسمح للفرق بالعمل معًا بشكل أكثر فاعلية. هذه الأنظمة السحابية تدمج أدوات وتقنيات تحليل السبب الجذري المختلفة، مما يسهل الوصول إلى البيانات وتحليلها في الوقت الفعلي. بفضل هذه الحلول، يمكن تحسين عملية تحليل الأسباب الجذرية، وتبسيط التواصل بين أعضاء الفريق، وتحسين تنفيذ الحلول التصحيحية بسرعة وكفاءة أكبر.

تمكن هذه الأنظمة من مشاركة البيانات في الوقت الفعلي، مما يضمن وصول جميع أعضاء الفريق إلى أحدث المعلومات في نفس الوقت وأن يكون الجميع على نفس الصفحة مما يقلل من خطر سوء التواصل أو التأخير.، يسهل عمليات تحليل السبب الجذري بطرق أكثر فعالية مما يتيح اتخاذ قرارات أسرع وأكثر دقة. كما يمكن لفرق تحليل السبب الجذري التعاون بسلاسة، بغض النظر عن موقعهم. يسمح هذا التعاون بجلسات عصف ذهني أكثر كفاءة، لتحديد الأسباب المحتملة والعوامل المساهمة والسبب الجذري للمشكلة بسرعة. تضمن القدرة على مشاركة البيانات والرؤى والتقدم [45].

2.3.3. دراسة المخاطر وقابلية التشغيل HAZOP

إن الهدف من إجراء دراسة المخاطر وقابلية التشغيل هو تحديد وتطوير سيناريوهات أو أسباب اضطراب العملية ذات الموثوقية العالية **(Credible)** التي قد تؤثر سلبًا على السلامة، أو الصحة أو البيئة أو الجودة أو الإنتاجية في الشركة. تُعد هذه الدراسة واحدة من اثني عشر منهجًا معترفًا به لتحليل مخاطر العمليات**(Process Hazards Analysis)** ، حيث تختص بتقييم المخاطر المرتبطة بعمليات التشغيل بهدف التخفيف من عواقبها.

[45] Zara Raza, Root Cause Analysis: Methods and Modern Technology,2023

تشمل الدراسة جميع مراحل تصميم العملية، بدءًا من اكتشاف المخاطر وصولاً إلى إيقاف التشغيل .بشكل عام، يتم فحص كل عنصر من عناصر العملية بشكل منفصل لاستكشاف أي مخاطر محتملة قد تجعل هذا العنصر يشكل تهديدًا على سير العمل. كلما كان ذلك ممكنًا، تُجرى الدراسة في مرحلة تصميمات العملية لضمان القدرة على تجنب المخاطر في وقت مبكر. كما يمكن إجراء الدراسة في المنشآت القائمة لتحديد التعديلات اللازمة للحد من احتمالات المخاطر ولتحديد المشاكل القابلة للمعالجة.

تطبيقات الدراسة في مراحل مختلفة:

- **مرحلة التخطيط والتصميم** :تُجرى في بداية مرحلة التصميم، حيث يمكن تعزيز التصميمات لتكون أكثر أمانًا.
- **مرحلة التصميم النهائي** :يتم تطبيق الدراسة عند إتمام التصميم النهائي للخطوط والتحكم الأتوماتيكي.
- **مرحلة البناء والتركيب** :يتم تنفيذ التوصيات التي تم التوصل إليها من خلال الدراسة لتقليل المخاطر.
- **مرحلة تنفيذ المشروع** :يتم خلالها تحديد التعديلات اللازمة لتقليل الخطر، بالإضافة إلى تعيين المشاكل التشغيلية.
- **مرحلة بدء التشغيل** :يتم التأكد من مراجعة وتحديث تدابير الطوارئ والإجراءات التشغيلية بشكل منتظم، وفقًا للوائح والمعايير.

يتطلب تنفيذ دراسة المخاطر وقابلية التشغيل وقتًا طويلًا وجهدًا كبيرًا، بالإضافة إلى معرفة وخبرة عميقة لضمان نتائج مثمرة. ولكن، مع تطور التكنولوجيا، أصبح من الممكن مساعدة الحواسيب في إعداد هذه الدراسات، مما يساعد في التغلب على بعض العيوب التقليدية مثل طول وقت الدراسة وكثرة حجم فريق العمل. ومع ذلك، من المهم التأكيد على أن مشاركة فريق الخبراء تبقى أمرًا أساسيًا، نظرًا لتعقيد آلية التفكير والأفكار المنطقية المطلوبة لتقييم العمليات التشغيلية والتصنيعية.

ساهمت عمليات الأتمتة بواسطة الحاسوب وبرمجيات التحليل في معالجة بيانات العمليات التشغيلية وقواعد المعرفة، مما يساعد في حساب وتحديد الأحداث الخطرة المحتملة والأسباب الناتجة عن انحرافات العملية .باستخدام الخوارزميات وطرق التفكير المتطورة، يمكن توثيق هذه النتائج وتخزينها في قاعدة بيانات رقمية لسهولة الرجوع إليها في المستقبل.

على الرغم من الموارد الضخمة المطلوبة لتنفيذ دراسة المخاطر، فإن الحاجة إليها مبررة كوسيلة فعالة لتجنب الحوادث وضمان تصميم هندسي سليم وآمن .كما أن دراسة أظهرت أن الوقاية من الحوادث يمكن أن تُحقق فوائد تفوق تكاليفها بما يصل إلى 3 أضعاف .فعلى الرغم من أن السلامة مكلفة، فإن الحوادث تكلف أكثر بكثير، مما يجعل الاستثمار في تحليل المخاطر وتخفيفها خطوة أساسية لحماية الأفراد والشركات على حد سواء[46] .

3.3.3. دراسات تقييم المخاطر Risk Assessment Studies

لا داعي لإجراء دراسات تقييم وتحليل المخاطر بالتفصيل إذا كان من الممكن تحديد مستوى المخاطر الإجمالي الذي يُعتبر مقبولاً استنادًا إلى معايير معترف بها. هذه المعايير يجب أن تكون شاملة ومحددة بوضوح، مثل تلك التي تعتمد على تجارب سابقة أو دراسات لأنظمة مماثلة، والتي يمكن أن توضح إمكانية حدوث المخاطر وتحديد ما إذا كانت عواقبها قد تؤثر على مهام السلامة الأساسية أم لا. في حال كان احتمال وقوع الحادث أقل من **معايير المخاطر** أو **معايير قبول المخاطر**، أو أن العواقب الناتجة عنها لا تمثل تهديدًا كبيرًا، فإنه يمكن اعتبار تلك المخاطر مقبولة. تُستخدم هذه المعايير كمرجع لتقييم الحاجة إلى تدابير الحد من المخاطر، ولذلك يجب تحديدها **قبل البدء في تحليل المخاطر** .

وفي حالة عدم توفر هذه المعايير، يُنصح بإسناد المهمة إلى **استشاري متخصص** لتقييم المخاطر، بحيث يتمكن من تحديد المستوى المقبول للمخاطر وتحديد تدابير تقليصها بناءً على خبراته وتوجيهاته . يتم تقسيم **الإطار العام لتقييم المخاطر** إلى ثلاث **نطاقات رئيسية**، وهي :

1. **المنطقة غير المقبولة (Unacceptable Region)**

[46] HAZOP using Stateflow software: Methodology and case study.2023و

هذه المنطقة تمثل مستويات المخاطر المرتفعة، حيث تكون المخاطر في هذه المنطقة غير مقبولة ويتعين اتخاذ تدابير فورية لتقليصها بشكل كبير أو التخلص منها بالكامل .

2. **المنطقة أدنى مستوى ممكن عمليًا - As Low As Reasonably Practicable**

هي المنطقة التي يُتوقع أن يتم فيها **السيطرة على المخاطر** في مكان العمل إلى أدنى مستوى ممكن عمليًا. في هذه المنطقة، تكون الإجراءات المتعلقة بالسلامة فعّالة، ولكن لا يمكن القضاء تمامًا على جميع المخاطر، لذا يُسعى للحد منها إلى أقصى حد ممكن من خلال إجراءات معقولة .

3. **المنطقة المقبولة Acceptable Region**

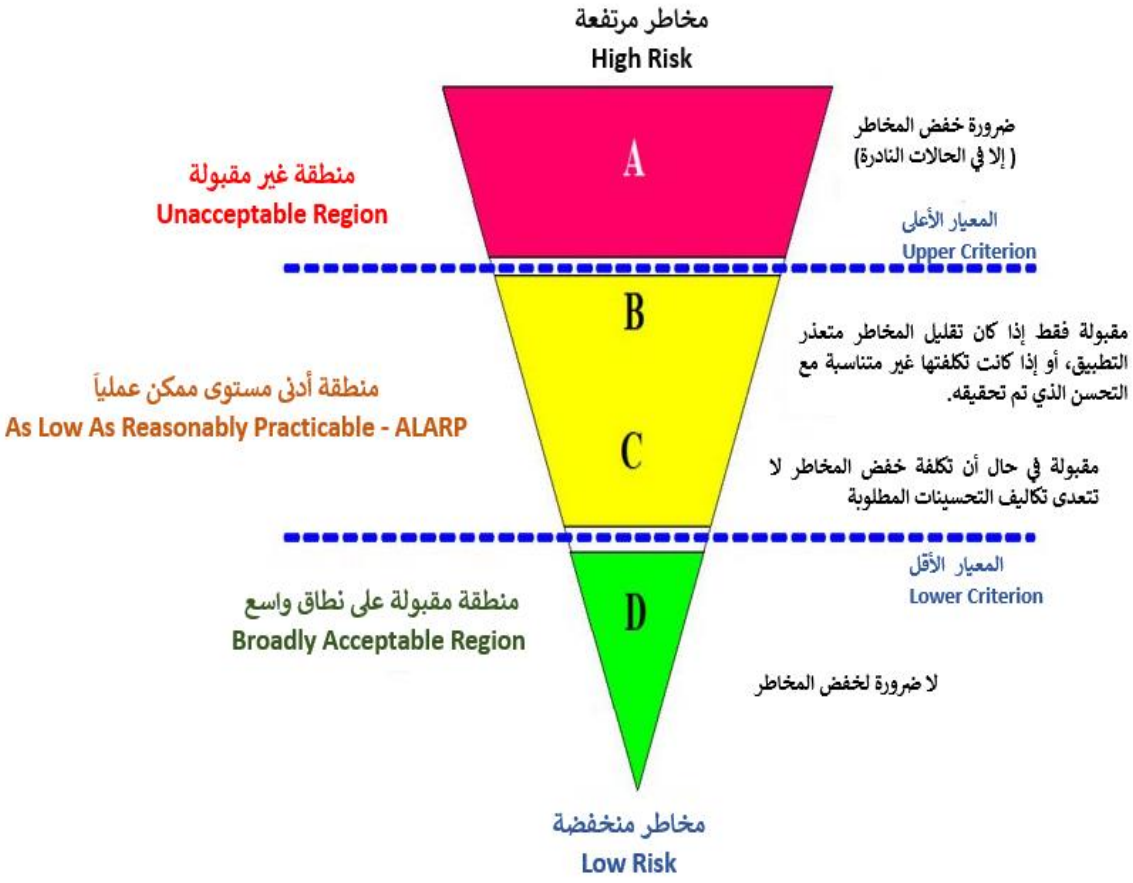
4. في هذه المنطقة، لا توجد ضرورة ملحة أو حاجة لتقليص المخاطر بشكل أكبر، حيث يتم قبول المخاطر بسبب انخفاض احتمالية حدوثها أو لأن عواقبها تعتبر غير خطيرة بما يكفي للتأثير على سلامة الأفراد أو البيئة أو العمليات .

هذه التصنيفات تساعد في توجيه قرارات السلامة وتحديد الأولويات في تقليص المخاطر، مما يسمح للشركات باتخاذ إجراءات مبنية على تقييم علمي ومنهجي للحد من المخاطر بطريقة متوازنة[47] ، كما هو مبين في الشكل (3-4).

[47] https://www.hse.gov.uk/comah/alarp.htm

الشكل (3-4)

إطار تقييم المخاطر، في ضوء إرشادات السلامة الصادرة عن هيئة الصحة والسلامة البيئية



المصدر: Risk-Acceptance Criteria in Occupational Health and Safety Risk-Assessment—The State-of-the-Art through a Systematic Literature Review,2021

يستخدم الحاسوب عددًا من البرامج الرقمية المتخصصة مثل برنامج **TORAP**، الذي يتيح محاكاة الحوادث وتقدير احتمالات الضرر في الصناعات البترولية، وخاصة صناعة البتروكيماويات .يُمكّن هذا البرنامج من إجراء تقييم كمي سريع للمخاطر مثل الحرائق والانفجارات والانبعاثات السامة التي قد تنشأ من وحدات مختلفة في المنشأة. كما يُسهم في تحديد الخطوات اللازمة لمنع الحوادث أو إدارتها بشكل فعال.

تشير الدراسات إلى أن أداة **TORAP** تمكن المستخدم من التركيز بسرعة على الحوادث التي يُحتمل أن تحدث في المنشأة، كما تتيح له التنبؤ بطبيعة وتأثيرات هذه الحوادث .هذا يساعد في تحديد المخاطر المحتملة بسرعة، مما يسهل على فرق السلامة اتخاذ التدابير اللازمة للتعامل معها.

كما يمكن الاستفادة من هذه المعلومات لتحديد "النقاط الضعيفة "في النظام، وبالتالي اتخاذ التدابير العلاجية المناسبة لمنع وقوع الحوادث أو السيطرة عليها بشكل أسرع وأكثر كفاءة. بذلك، يوفر البرنامج أداة قوية في يد المحللين لتقليل المخاطر وتحسين الأمان في المنشآت الصناعية [48].

4.3.3. مصفوفة المخاطر Risk Matrix

في تسعينيات القرن الماضي، شهدت صناعة البتروكيماويات تطورًا مهمًا أسهم في انخفاض كبير في معدلات الحوادث [49]. حيث تم تقديم أداة جديدة لدعم تنفيذ دراسات المخاطر، وهي "مصفوفة تقييم المخاطر"، التي تم دمجها مع نظام إدارة الصحة والسلامة والبيئة المتكامل (HSE) . تعتبر مصفوفة تقييم المخاطر، والمعروفة أيضًا باسم مصفوفة مخاطر الاحتمالية والشدة أو الاحتمالية والتأثير، واحدة من أكثر الأساليب استخدامًا في التحليل النوعي للمخاطر المحتملة التي قد تؤثر على الأعمال. [50]

تعتمد مصفوفة المخاطر على عاملين أساسيين متقاطعين:

1. احتمالية وقوع الحدث المحفوف بالمخاطر (مثل حدوث حادث أو فشل في النظام).
2. التأثير المحتمل الذي قد يخلفه الحدث (مثل الأضرار المالية أو البيئية أو البشرية).

بعبارة أخرى، تعد هذه المصفوفة أداة بصرية تساعد في تصور العلاقة بين احتمالية وقوع الخطر وشدة تأثيره .من خلال هذه الأداة، يمكن تصنيف المخاطر في عدة مستويات، مما يسهل تحديد أولويات التدابير الوقائية والتخفيفية اللازمة. كما تساهم في تحديد المخاطر التي يجب التعامل معها بشكل عاجل لتجنب أية تأثيرات خطيرة على العمليات أو السلامة أو البيئة.

مصفوفة المخاطر هي أداة تستخدم لتقييم المخاطر من خلال تصنيفها بناءً على احتمالية وقوعها وتأثيرها المحتمل. تتكون المصفوفة من أربع خلايا عرضية وأربع خلايا طولية، حيث يمثل الصف العلوي مستويات الشدة أو التأثير، ويمثل العمود الجانبي مستويات الاحتمالية .الهدف من

48Faisal I Khan, TORAP—a new tool for conducting rapid risk assessment in petroleum refineries and petrochemical industries,1999.
49 See Hudson (2001, p. 13) or International Association of Oil & Gas Producers (2006, p. 3).
[50] Vice, Risk Assessment Matrix: Overview and Guide,2024.

المصفوفة هو تصنيف المخاطر بناءً على مزيج من الاحتمالية والتأثير، لتحديد أولويات المعالجة.

تنقسم عملية **تقييم المخاطر** إلى خمس خطوات رئيسية:

1. **تحديد المخاطر المحتملة** :تحديد الأحداث أو العوامل التي قد تشكل خطرًا.
2. **تقييم الاحتمالية** :تقدير احتمالية حدوث الخطر.
3. **تقييم التأثير** :تحديد مدى تأثير الخطر إذا وقع.
4. **تقييم المخاطر** :دمج الاحتمالية مع التأثير للحصول على درجة المخاطر.
5. **التعامل مع المخاطر** :اتخاذ الإجراءات المناسبة للتقليل أو التخلص من المخاطر.

بعد تصنيف المخاطر في المصفوفة، يتم تحديد الخلايا المشتركة بين مستويات الشدة ومستويات الاحتمالية .يتم تحديد أولوية المخاطر بناءً على التقاطع بين هذه الخلايا، حيث يتم تصنيف المخاطر إلى أربع فئات رئيسية بناءً على درجة الاحتمالية والتأثير:

1. **التصنيف الكارثي:**
   - **على مستوى الأفراد** :جروح أو وفيات.
   - **على مستوى البيئة** :تأثيرات ضخمة خارجة عن السيطرة.
   - **على مستوى المعدات** :أضرار جسيمة تؤدي إلى خسارة الوحدة الإنتاجية.
   - **الاحتمالية (متكرر)**: من المحتمل حدوثه مرة واحدة أو أكثر في السنة.
2. **التصنيف الحرج:**
   - **على مستوى الأفراد** :جروح قد تكون خطيرة.
   - **على مستوى البيئة** :تأثيرات متوسطة خارجة عن السيطرة.
   - **على مستوى المعدات** :أضرار تؤدي إلى توقف الإنتاج.
   - **الاحتمالية**(محتمل): من المحتمل حدوثه مرة واحدة كل عدة سنوات.

3. **التصنيف الهامشي:**

- **على مستوى الأفراد :**إصابات مضيعة للوقت.
- **على مستوى البيئة** :تأثيرات خفيفة خارجة عن السيطرة.
- **على مستوى المعدات** :أضرار لا تذكر.
- **الاحتمالية (عرضي)** : من المحتمل حدوثه مرة واحدة طوال فترة عمر المشروع.

4. **التصنيف لا يُذكر:**

- **على مستوى الأفراد** :إصابات طفيفة.
- **على مستوى البيئة** :أضرار يمكن التحكم بها.
- **على مستوى المعدات** :أضرار بسيطة.
- **الاحتمالية (عرضي):** من المحتمل حدوثه مرة واحدة طوال فترة عمر المشروع.

بمجرد تحديد المخاطر وتقييم الاحتمالية والتأثير، يتم وضع المخاطر في الخلايا المناسبة داخل المصفوفة. تكون **المخاطر ذات الأولوية العالية** والتي تقع في الخلايا التي تُظهر تقاطعًا بين **احتمالية عالية** وتأثير **كبير**، مما يتطلب تدخلًا فوريًا، بينما يمكن تأجيل التعامل مع المخاطر في الخلايا التي تحتوي على **احتمالية منخفضة** وتأثير **ضعيف**.

باستخدام **مصفوفة المخاطر**، يمكن للمؤسسات تصنيف المخاطر بفعالية، مما يساعد في اتخاذ قرارات أكثر دقة بشأن كيفية إدارتها والتعامل معها، وبالتالي تحسين مستوى السلامة وتقليل الحوادث في بيئات العمل. يبين (الجدول 3-1) إطار مصفوفة تحليل المخاطر.

الجدول (3-1)
إطار مصفوفة تحليل المخاطر

احتمالية النجاح / فئة	أ. متكرر (1) من المحتمل حدوث حدث مرة واحدة أو أكثر في السنة	ب. محتمل (2) من المحتمل حدوث حدث مرة واحدة كل عدة سنوات	ج. عرضي (3) من المحتمل أن يحدث الحدث مرة واحدة في عمر المنشأة	د. غير محتمل (4) الحدث غير محتمل، ولكنه غير مستبعد
أولاً: كارثية (1) تهديد للأفراد والبيئة والحياة. أضرار جسيمة للمعدات، وفقدان الوحدة الإنتاجية	1	2	3	4
ثانياً: حرجة (2) إصابات خطيرة للأفراد، والبيئة. أضرار للمعدات وتوقف الوحدة الإنتاجية	2	4	6	8
ثالثاً: هامشية (3) إصابات مضيعة للوقت للأفراد، وتلوث بيئي محدود. تباطؤ معدلات التشغيل في الوحدة	3	6	9	12
رابعاً: لا يذكر (4) إصابات طفيفة للأفراد، وتلوث بيئي لا يذكر. أضرار بسيطة للمعدات	4	8	12	16

على الرغم من أن إجراء تقييم المخاطر قد يبدو عملية معقدة، إلا أن التطور السريع للتحول الرقمي وتطبيقات الذكاء الاصطناعي قد ساعد بشكل كبير في تسريع وتحسين هذه العملية. بفضل هذه التقنيات، أصبح من الممكن إجراء تقييم أسرع وأكثر دقة للمخاطر المحتملة. تعمل هذه التطبيقات على تحويل البيانات الضخمة والمتنوعة إلى شكل رقمي قابل للتخزين والتحليل، مما يسهل تصنيفها وتحليلها بطريقة منهجية. من خلال هذا التحليل، يمكن للمنشآت التنبؤ بالمخاطر بدقة أكبر واكتشاف علاقات سببية جديدة في الأنظمة المعقدة بشكل أسرع.

تقوم برامج الذكاء الاصطناعي والتطبيقات الرقمية بدمج هذه البيانات في جداول بيانات رقمية، والتي تشكل الأساس لمصفوفة الاحتمالات والتأثير، مما يسهم في تعزيز عملية اتخاذ القرار. هناك العديد من البرامج الإلكترونية التي يمكن استخدامها لتطبيق مصفوفة المخاطر، مثل:

- برنامج SimpleRisk
- برنامج Eramba
- برنامج Project Risk Manager

مزايا استخدام برامج تقييم المخاطر[51]:

1. توثيق ومتابعة المخاطر :تتيح هذه البرامج توثيق المخاطر بفعالية، مع إمكانية مراجعتها وتتبعها بشكل مستمر.
2. الإبلاغ عن المخاطر :يمكن للموظفين الإبلاغ بسهولة عن المخاطر التي يواجهونها في بيئة العمل.
3. مشاركة المعلومات :تتيح البرامج إرسال ومشاركة الصور والمستندات ذات الصلة مع فريق إدارة المخاطر باستخدام أجهزة متعددة.
4. تصنيف وتخزين المخاطر :تسهل البرامج تنظيم المخاطر وتصنيفها وتخزينها في مكان آمن وسهل الوصول.
5. التخزين المركزي للسياسات :يتم تخزين جميع سياسات وإجراءات السلامة في مكان مركزي يتم تحديثه بانتظام، مما يضمن وصولها لجميع أصحاب المصلحة في الوقت المناسب.

باستخدام هذه الأدوات الرقمية، يمكن للمنشآت تحسين قدرتها على **إدارة المخاطر** وتقليل الأخطاء البشرية، وتقديم **استجابة سريعة وفعالة** للتحديات المختلفة. يبين الشكل (3-5) أحد النماذج الرقمية المستخدمة في تحليل منظومة المخاطر.

[51] **Digital tools to help with risk assessment,2021.**

الشكل (3-5)
نموذج رقمي لتحليل مصفوفة المخاطر

SAMPLE RISK ASSESSMENT FORM

REF ID NO.	SUBMITTED BY	DATE SUBMITTED

RISK TYPE *select one*

	Financial
	Legal / Contractual
	Reputation / Customer Relations
	Resources
	Operational
	Other:

RISK DESCRIPTION

SOURCE OF RISK

PERSON(S) IMPACTED *check all that apply*

	Customers / Clients
	Employees
	Contractors
	Public
	Other:
	Other:
	Other:

RISK IMPACT *select one*

	IMPACT LEVEL	DESCRIPTION
	NOT SIGNIFICANT	Negligible injuries not needing medical treatment
	MINOR	Minor injuries causing temporary impairment needing medical treatment
	MODERATE	Illness and/or injury requiring hospitalization
	MAJOR	Illness and/or injury resulting in permanent impairment
	SEVERE	Fatality

RISK PROBABILITY *select one*

	PROBABILITY LEVEL	DESCRIPTION
	HIGHLY UNLIKELY	Rare chance of an occurrence
	UNLIKELY	Not likely to occur under normal circumstances
	POSSIBLE	May occur at some point under normal circumstances
	LIKELY	Expected to occur at some point in time
	HIGHLY LIKELY	Expected to occur regularly under normal circumstances

RISK SEVERITY MATRIX *based on Impact and Probability Levels*

IMPACT x PROBABILITY	NOT SIGNIFICANT	MINOR	MODERATE	MAJOR	SEVERE
HIGHLY UNLIKELY	LOW	LOW	LOW / MED	MEDIUM	MEDIUM
UNLIKELY	LOW	LOW / MED	LOW / MED	MEDIUM	MED / HIGH
POSSIBLE	LOW	LOW / MED	MEDIUM	MED / HIGH	MED / HIGH
LIKELY	LOW	LOW / MED	MEDIUM	MED / HIGH	HIGH
HIGHLY LIKELY	LOW / MED	MEDIUM	MED / HIGH	HIGH	HIGH

RISK SEVERITY LEVEL *select corresponding Severity Level from matrix above based upon Impact and Probability Levels*

	SEVERITY LEVEL
	LOW
	LOW / MED
	MEDIUM
	MED / HIGH
	HIGH

CURRENT CONTROL MEASURES

FURTHER ACTION NEEDED? *select one*

	YES
	NO

ACTIONS TO IMPLEMENT *if applicable*

ACTION	ASSIGNED TO	DUE DATE	STATUS

DATE REVIEWED	APPROVING OFFICIAL NAME & TITLE	SIGNATURE

REMARKS

المصدر: **Risk Assessment Form Templates and Samples**

4.3. دراسات تقييم الأثر البيئي والاجتماعي

تهدف دراسات تقييم الأثر البيئي والاجتماعي [52] ، والمعروفة أيضًا باسم تقييم الأثر البيئي [53] ، أو التقييم البيئي المتكامل، إلى تقييم الأثر البيئي والاجتماعي للمشاريع على المدى القريب من خلال تحديد ومعالجة المخاطر البيئية والاجتماعية والاقتصادية المحتملة التي قد تنجم عن المشروع. على المدى الطويل، تهدف هذه الدراسات إلى تعزيز التنمية المستدامة عبر ضمان عدم تقويض الموارد الطبيعية أو الوظائف البيئية أو رفاهية المجتمعات التي تعتمد على هذه الموارد. في كثير من الدول، تُعتبر دراسات تقييم الأثر البيئي والاجتماعي جزءًا أساسيًا من إجراءات الترخيص البيئي التي يجب على أي مشروع اجتيازها قبل البدء في تنفيذه.

تتمثل أحد التحديات الرئيسية لهذه الدراسات في التكلفة المالية العالية المرتبطة بها، حيث يمكن أن تكون المبالغ المطلوبة كبيرة جدًا. علاوة على ذلك، فإن المعلومات الناتجة عن هذه الدراسات تكون ضخمة جدًا، حيث قد يصل متوسط الدراسة إلى حوالي 400 صفحة تشمل الجداول والملاحق التفصيلية. بعد إتمام المشروع، يُصبح من الصعب الاستفادة من نتائج هذه الدراسات، إذ غالبًا ما يتم تخزينها في أرشيفات يصعب الوصول إليها ولا يتم الاستفادة منها إلا لمشروع واحد فقط. [54]

مع التحول الرقمي، أصبح من الممكن إجراء تحويل جذري في كيفية إدارة واستخدام نتائج دراسات تقييم الأثر البيئي والاجتماعي. تم ربط المعلومات البيئية المتاحة في نظام معلومات جغرافية مفصل يمكن الوصول إليه عبر الإنترنت، مما يتيح دمجها في أرشيف رقمي يمكن البحث فيه بسهولة. هذا التحول الرقمي يساعد في:

1. **توفير منصة رقمية شاملة** :يتم تجميع كل البيانات البيئية في مكان واحد، مما يسهل الوصول إليها واستخدامها في المستقبل.
2. **تحويل الوثائق المعقدة** :يمكن تحويل الوثائق الطويلة والمعقدة إلى تقارير أبسط وأكثر وضوحًا تسهل فهمها وتنفيذها من قبل المستخدمين.

[52] Environmental and Social Impact “ESIA” Assessment
[53] Environmental Impact Assessment (EIA)
54 Daniel A. Farber, Bringing Environmental Assessment into the Digital Age,2016.

3. **دعم اتخاذ القرار البيئي** :من خلال توفير أدوات تحليل قوية تمكن من اتخاذ قرارات بيئية حاسمة استنادًا إلى البيانات الفعلية والتحليل المتقدم.

أهمية التشريعات والضوابط:

مع استخدام هذه التقنيات الرقمية، من الضروري وضع الضوابط والتشريعات لضمان إتاحة المعلومات وتداولها بشكل مناسب وحمايتها من الاستخدام غير السليم .يجب أن تضمن هذه التشريعات حق الوصول إلى المعلومات البيئية الأساسية، مع مراعاة الخصوصية والأمن البيئي، لضمان أن تظل هذه البيانات موثوقة ومفيدة لجميع الأطراف المعنية

الفصل الرابع

نماذج مشروعات التحول الرقمي لمنظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في الدول الأعضاء في منظمة أوابك

الفصل الرابع
نماذج مشروعات التحول الرقمي لمنظومة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في الدول الأعضاء في منظمة أوابك

مقدمة

تولي شركات التكرير وإنتاج البتروكيماويات في الدول الأعضاء في منظمة أوابك أهمية قصوى للحفاظ على سلامة العاملين وسلامة العمليات الصناعية، وذلك بهدف خفض معدلات الحوادث الصناعية والحد من الخسائر البشرية أو المادية في المنشآت والمعدات. كما تعمل هذه الشركات على تحسين كفاءة العمليات الإنتاجية من خلال إعداد برامج صيانة للمعدات الحرجة، بالإضافة إلى خفض انبعاثات غازات الدفيئة، وخاصة غاز ثاني أكسيد الكربون.

من أجل تحقيق هذه الأهداف، تتبنى الشركات مشروعات التحول الرقمي لمنظومات السلامة والصحة المهنية والبيئة، حيث تعتمد على استراتيجيات وخطط وقاية وتخفيف متطورة للحد من الآثار المحتملة، بما يتماشى مع القوانين والأنظمة المعتمدة والممارسات المهنية السليمة. وتقوم الشركات بتطبيق العديد من التقنيات الحديثة مثل:

- المراقبة عن بُعد باستخدام التقنيات المتطورة.
- استخدام الروبوتات والذكاء الاصطناعي لأغراض الفحص والصيانة.
- تنفيذ عمليات الصيانة الدورية المبرمجة.
- التخطيط والبرمجة المتقدمة لضمان استمرارية العمليات.
- تنظيم الدورات التدريبية الافتراضية للموظفين لتعزيز ثقافة السلامة والمعرفة التقنية.

تسهم هذه المبادرات في تحقيق بيئة عمل أكثر أمانًا وكفاءة، مما يعزز الاستدامة ويسهم في الحفاظ على البيئة وتقليل الأثر البيئي الناجم عن الصناعات الثقيلة.

1.4. دولة الإمارات العربية المتحدة

يعد دمج وتبني التكنولوجيا الرقمية أحد المحاور الأساسية في استراتيجية شركة أدنوك لزيادة الربحية وتعزيز القيمة والعائد الاقتصادي. في عام 2019، أعلنت الشركة عن بدء تنفيذ مشروع الصيانة

التنبؤية الشاملة الذي يتم تنفيذه على أربع مراحل، ويأتي المشروع في إطار برنامج الشركة لتسريع التحول الرقمي وتعزيز استخدام تقنياته الحديثة والمتطورة.

في عام 2020، أكملت الشركة بنجاح المرحلة الأولى من المشروع، التي تهدف إلى رصد وتحليل كفاءة وسلامة الأصول وزيادة فعاليتها عبر مختلف عمليات الاستكشاف، التطوير، الإنتاج، المعالجة والتكرير. يعتمد المشروع على تقنيات الذكاء الاصطناعي مثل تعلم الآلة والتوأمة الرقمية، حيث يتم من خلال هذه التقنيات مراقبة الأصول وتحليل البيانات بشكل مستمر، مما يتيح التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها، وبالتالي تجنب توقف المعدات المفاجئ، وتقليل فترات الصيانة، وتعزيز الأمن والسلامة، فضلاً عن خفض التكاليف.

شملت المرحلة الأولى من المشروع إنشاء نظام مراقبة مركزي لحوالي 2500 من المعدات والأصول الحيوية مثل التوربينات، مضخات الطرد المركزي، ومعدات ضغط الغاز في ست شركات تابعة لمجموعة أدنوك. تسهم الصيانة التنبؤية في استدامة عمليات التشغيل وزيادة موثوقية الإنتاج، مع خفض تكاليف الصيانة بنسبة تصل إلى حوالي 20%، مما يعزز الكفاءة التشغيلية ويعزز القدرة على التنبؤ بالمشاكل التقنية قبل وقوعها. يبين الشكل (4-1) منصة الصيانة التنبؤية لشركة أدنوك.

الشكل (4-1)

منصة الصيانة التنبؤية لشركة أدنوك

تتضمن **مبادرات أدنوك الرقمية** الأخرى العديد من المشاريع المتقدمة التي تستفيد من أحدث التقنيات الرقمية لتعزيز كفاءة الأداء وتحقيق الاستدامة في العمليات. من أبرز هذه المبادرات:

1. **مركز "بانوراما للتحكم الرقمي:"**

يستخدم هذا المركز تطبيقات الذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة لتوفير رؤية شاملة وتحليل لحظي لعمليات التشغيل في أدنوك. يهدف المركز إلى تحسين الأداء التشغيلي وتعزيز قدرة الشركة على اتخاذ القرارات بسرعة ودقة استنادًا إلى البيانات المجمعة من مختلف الأنظمة والمواقع التشغيلية. يمكن لهذا المركز مراقبة وتحليل العمليات الصناعية على نطاق واسع، مما يعزز التحكم الفعّال في سير العمليات ويضمن الاستجابة الفورية لأي مستجدات أو مشكلات قد تنشأ.

2. **مركز "ثمامة لدراسة المكامن البترولية:"**

يعتمد مركز ثمامة على التحليلات الذكية ومنصات الذكاء الاصطناعي، وكذلك تقنيات رؤية الحاسوب وأدوات نمذجة البيانات الضخمة لتحسين دراسة المكامن البترولية. يهدف المركز إلى تعزيز دقة تحليل البيانات الجيولوجية، وتطوير نماذج متقدمة لتمثيل سلوك الخزانات البترولية وتحسين إدارة الموارد الهيدروكربونية .باستخدام هذه التقنيات، يمكن للمركز تقديم تقديرات أكثر دقة حول إنتاجية المكامن وتحسين استراتيجية الاستخراج من أجل زيادة الاستدامة والكفاءة في عمليات الاستكشاف والإنتاج.

كما تهدف هذه المبادرات إلى تحسين أداء مكونات سلسلة القيمة في الشركة، بما في ذلك سلسلة الكتل، التي تتيح حساب الموارد الهيدروكربونية بشكل دقيق، مما يسهم في توجيه الاستثمارات واتخاذ القرارات المتعلقة بتطوير حقول النفط والغاز بطريقة أكثر كفاءة. ومن خلال دمج هذه التقنيات المتطورة، تسعى أدنوك إلى تعزيز قدرتها على التنبؤ وتحليل الاتجاهات المستقبلية في صناعة النفط والغاز، مما يساهم في تحسين العمليات التشغيلية وتعظيم العوائد الاقتصادية وتقليل المخاطر المرتبطة بالإنتاج [55].

ومن جانب أخر بدأت الشركة في عام 2024، بتطوير حقل "**Belbazem** البحري" للاستفادة من التآزر التشغيلي[56] مع الحقول المجاورة، والذكاء الاصطناعي والرقمنة لتعزيز الكفاءة والسلامة مع تقليل

[55] https://www.adnoc.ae/en/
[56] operational synergies

الانبعاثات والتكلفة، من خلال تنفيذ أدوات النمذجة والتحليل بالذكاء الاصطناعي في جميع أنحاء منطقة الامتياز البحرية التابعة لها لتحليل بيانات الخزان وإدارة العمليات لتعزيز السلامة والأداء والحد من البصمة الكربونية. ومن المستهدف زيادة الطاقة الإنتاجية في الحقل البحري إلى 45 ألف برميل يومياً من النفط الخام الخفيف و27 مليون قدم مكعب يومياً من الغاز المصاحب، مما يساهم في تحقيق هدف شركة أدنوك في الوصل إلى إنتاج يقدر بنحو 5 ملايين برميل يومياً بحلول عام 2027[57].

كما أعلنت شركة أدنوك في عام 2024، عن تطبيقها لتقنية تحسين العمليات المدعومة بالذكاء الاصطناعي في حقل شمال شرق باب (NEB)، من خلال تطوير تقنية Neuron 5، والذي يستخدم نماذج الذكاء الاصطناعي المتقدمة وخوارزميات التعلم العميق للتنبؤ باحتياجات الصيانة ومراقبة أداء المعدات من خلال تفسير البيانات، مثل الضغط ودرجة الحرارة والاهتزاز، الواردة من أجهزة الاستشعار الموجودة على المعدات الحيوية. أشارت نتائج المرحلة التجريبية للتقنية المبتكرة إلى أن التكنولوجيا لديها القدرة على خفض عدد عمليات الإغلاق غير المخطط لها بنسبة 50% وتعزيز فترات الصيانة المخطط لها عبر العمليات بنسبة 20% [58].

2.4. مملكة البحرين

تشهد صناعة النفط والغاز في مملكة البحرين تحولاً رقمياً، مدفوعاً بالحاجة إلى تحسين العمليات وخفض التكاليف. يلعب تطوير البرامج الذكية المتقدمة دوراً حاسماً في هذا التحول، حيث يوفر أدوات رقمية تمكن من اتخاذ قرارات أفضل وسريعة، وتحسين الكفاءة التشغيلية، وتعزيز تدابير السلامة. كانت شركة "تطوير للبترول" من أوائل الشركات التي تبنت التقنيات الرقمية. ونفذت الشركة استراتيجية شاملة للتحول الرقمي تتضمن استخدام الذكاء الاصطناعي لإدارة المكامن وتحسين الإنتاج والصيانة التنبؤية، مما ساهم في تحقيق تطوير وتحسين في الكفاءة التشغيلية وزيادة الإنتاج.

كما اتخذت شركة نفط البحرين " بابكو"، كافة التدابير تنفيذ كافة التدابير الاحترازية لتوفير بيئة عمل آمنة، واجراء كافة الدراسات والتحقيقات لمعرفة جذور الأسباب المتسببة في الحوادث، وتحديد الإجراءات التي يمكن اتخاذها لمنع تكرار نفس الحادث [59]. كما اعتمدت الشركة البرامج المتقدمة في

[57] ADNOC deploys artificial intelligence to begin oil production from Belbazem offshore block ,2024
[58] ADNOC Deploys Pioneering AI-Enabled Process Optimization Technology,2024.

[59] Bapco Project achieves safety record News,2024

تحسين تدابير السلامة، من خلال مراقبة الوقت الفعلي والتحليلات التنبؤية في تحديد المخاطر المحتملة قبل أن تصبح حرجة، مما يسمح بالتدخل في الوقت المناسب. واعتمادها على تقنيات الأتمتة من الحاجة إلى التدخل البشري في المهام الخطرة، مما يعزز السلامة بشكل أكبر. وقامت الشركة بتحسين برامج الأمن السيبراني لحماية بنيتها التحتية الرقمية من التهديدات السيبرانية، لضمان سلامة وأمان البيانات الحساسة والعمليات الحرجة. ومن جانب أخر حققت الشركة في عام 2024، نحو 125 مليون ساعة عمل دون إصابات أو حوادث [60].

3.4. المملكة العربية السعودية

تشهد المملكة العربية السعودية تحولاً رقمياً ضمن رؤية المملكة 2030، لتنويع اقتصادها الرقمي دون الاعتماد على النفط كمصدر وحيد للدخل القومي بها. وفقًا لتقرير صادر عن PwC[61]، من المتوقع أن يسهم الذكاء الاصطناعي بمبلغ 135 مليار دولار في الاقتصاد السعودي بحلول عام 2030، مما يجعله أكبر مستفيد من تقنية الذكاء الاصطناعي في الشرق الأوسط[62]. وقد تم ذلك من خلال قيام المملكة بإنشاء بنية تحتية رقمية عالمية المستوى تدعم الأهداف الاقتصادية للمملكة، مما مكنها في عام 2023 من احتلال المرتبة الثانية على مؤشر تنمية تكنولوجيا المعلومات والاتصالات التابع للاتحاد الدولي للاتصالات التابع للأمم المتحدة من بين دول مجموعة العشرين.

أما على نطاق الشركات، فقد أطلقت شركة أرامكو السعودية في عام 2017 برنامجها نحو التحول الرقمي، اعتمد البرنامج على التقنيات الرقمية الناشئة للثورة الصناعية الرابعة. وعملت على تعزيز الاستفادة من برامج الابتكار الرقمي من خلال إنشاء إطار عمل لتطوير ونشر الحلول الرقمية الجديدة ضمت جميع مشاريع الشركة من خلال عدد من البرامج الرقمية، بدأ من تعزيز السلامة safety والأمن security، إلى تحسين الكفاءة والاستدامة والأداء المالي، كما أتاحت فرص التدريب للعاملين بالشركة على المهارات الجديدة. شمل برنامج التحول الرقمي كل من:

1.3.4. الامتثال Compliance

ساعدت المشاريع الرقمية التي اندرجت ضمن برنامج الامتثال في ضمان التزام شركة أرامكو بالسياسات الخارجية التي تضعها الحكومات والمنظمات العالمية والمبادئ التوجيهية الداخلية الخاصة

[60] How Bahrain is Leading in Oil and Gas Innovation through Software Development,2024
[61] **PricewaterhouseCoopers International Limited**
[62] Digital Economy, **Saudi Arabia - Country Commercial Guide,2024.**

بالشركة. على سبيل المثال، يتطلب الحفاظ على سلامة وأمن المنشآت متطلبات امتثال كبيرة، لتلبية هذه المتطلبات بشكل فعال، قامت الشركة باستخدام تقنيات الثورة الصناعية الرابعة، ومنها التدريب على السلامة باستخدام الواقع الافتراضي للعاملين، واستخدام الطائرات المسيرة والروبوتات لأداء مهام الصيانة والتفتيش بأمان وكفاءة أعلى، فضلاً عن تطبيق نظام التعرف على وجه الموظفين الذي يستخدم قاعدة بيانات لأكثر من 270 ألف موظف ومقاول في أرامكو لتعزيز الأمن والسلامة في المرافق الرئيسية.

2.3.4. الاستدامة

أدى استخدام البيانات الضخمة وخوارزميات الذكاء الاصطناعي والتحليلات إلى زيادة إنتاجية وكفاءة عمليات الشركة فعلى سبيل المثال، تم استخدام حلول الذكاء الاصطناعي في معمل الغاز في "العثمانية"، لزيادة الإنتاجية وتحسين موثوقية مرافقه. وقد ساهمت التقنيات التي أُستخدمت كالطائرات المسيّرة والتقنيات القابلة للارتداء لمعاينة خطوط الأنابيب والمعدات، في خفض وقت المعاينة بنسبة 90%. وفي حقل "خريص" النفطي، تم استخدام آلاف أجهزة استشعار إنترنت الأشياء لمراقبة الآبار النفطية وتوقع سلوكها. ونجحت هذه التقنية الرقمية في خفض نسب استهلاك الطاقة بنحو 18%، وخفض تكاليف الصيانة بحوالي 30%، إضافةً إلى خفض وقت المعاينة بحوالي 40 %، مما أدى إلى زيادة كفاءة الحقل التشغيلية.

ومن جانب أخر عملت الشركة في عام 2021، على تطبيق ونشر مجموعة واسعة من حلول الثورة الصناعية الرابعة في حقل "بقيق" الذي يعد أكبر حقل لمعالجة النفط في العالم، مثل الروبوتات والطائرات المسيّرة الذكية واستخدام البيانات والنماذج التنبؤية مما أدى إلى تعزيز أدائه وكفاءته وساهم في انضمام المشروع إلى قائمة منارات التصنيع العالمية. كما سجلت مصفاة " ينبع" انخفاضًا في انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري بمقدار 23%، وتحسنًا في الجاهزية التشغيلية بنسبة 17% من خلال تطبيق ودمج تجارب باستخدام تطبيقات وتقنيات الثورة الصناعية الرابعة على نطاق واسع، مما ساهم في انضمام المصفاة إلى شبكة منارات التصنيع العالمية في عام 2023 لتصبح واحدة من ضمن المرافق التي أُضيفت خلال هذا العام، ليصبح إجمالي عدد مرافق التصنيع والمعالجة 153 مرفقًا حول

العالم. واعتبرت شركة أرامكو السعودية في عام 2024 شركة الطاقة الدولية الوحيدة على مستوى العالم والتي يتم تمثيلها في قائمة المنتدى الاقتصادي بأكثر من مرفقين ضمن شبكة منارات التصنيع العالمية[63].

3.3.4. التمويل

توفر أدوات التحليلات الرقمية توقعات مالية أسرع بعشر مرات مما تحققه الطرق التقليدية، ذلك من خلال تطبيق الخوارزميات والتعلم الآلي لإدارة المعاملات المالية، مما يسهم في تسريع عمليات التمويل المالي للمشاريع.

4.3.4. سلسلة التوريد

تعد شركة أرامكو من أوائل الشركات التي تبنت تقنيات Blockchain[64]، والعقود الذكية للمشاريع في برنامج سلسلة التوريد التي تم استخدامها لدمج آلاف أجهزة الاستشعار في حقول النفط ومصافي التكرير وشركات البتروكيماويات للتحقق من الأداء وتحسين استخدام حركة المخزون والتسليم.

5.3.4. القوى العاملة الرقمية

تعد عملية أتمتة المهام الروتينية أو إيجاد طرق جديدة لإكمالها أحد الفوائد الرئيسية لبرامج التحول الرقمي. ومن أمثلة ذلك نشر تقنيات الواقع المعزز لتحديد موقع الأصول الحاسوبية والتحقق منها وتوفير معلومات أساسية عنها داخل مركز بيانات تكنولوجيا المعلومات في الشركة، والتي كان على الموظفين سابقاً البحث عنها يدوياً في قواعد بيانات متعددة، وتحتوي كل قاعدة على آلاف الخوادم، مما يوفر الوقت ويزيد من الكفاءة.

6.3.4. العمليات

نجحت تقنيات الثورة الصناعية الرابعة في رقمنة العديد من عمليات شركة "أرامكو السعودية"، في المنبع والمصب، فعلى سبيل المثال، تم ربط بيانات الإنتاج في حقل "الغوار الشمالي" في البنية التحتية لشبكة الاتصال اللاسلكي الصناعية **WiFi** في جميع مرافقه. مما مكنها من نشر الحلول الرقمية مثل استخدام أجهزة الاستشعار التشخيصية والعمليات اللاسلكية لاتخاذ قرارات استباقية. ومن الأمثلة الأخرى للاستفادة من البنية التحتية الذكية، استخدم أول نظام تحكم متقدم في العمليات (APC) في العالم لحقل نفط تقليدي في حقل "خريص"، مما أدى إلى زيادة الكفاءة وتحسين استهلاك الطاقة

[63] https://www.aramco.com/ar/what-we-do/energy-innovation/digitalization

[64] هي إحدى التقنيات التي أتاحها التوزيع العالمي لقدرة الحوسبة. تعد تقنية سلسلة الكتل "البلوك تشين" هي دفتر الأستاذ الرقمي الذي يتم فيه تسجيل المعاملات.

للمضخات التي تعمل بالبئر. كما قامت الشركة باستخدام الطائرات المسيرة لإجراء عمليات تفتيش أكثر أمانًا وفعالية من حيث التكلفة على منصات النفط والمرافق الأخرى[65].

7.3.4. الابتكار

دشنت الشركة في نوفمبر عام 2023، "المختبر السعودي للابتكار المتسارع" سيل"**SAIL**. يربط المختبر بين المؤسسات السعودية من القطاعين العام والخاص، والأوساط الأكاديمية، والشركات الرائدة في مجال التقنيات الرقمية، والشركات الناشئة الجديدة التي يحتمل أن تحدث تحولًا رقمياً في القطاع، والمستثمرين، بهدف إيجاد حلول للتحديات العالمية في مجال الطاقة. كما أنشئت الشركة "مركز الثورة الصناعية الرابعة"، والذي يستخدم مجموعة من أدوات التحليل المتقدمة لتحقيق عدد من الأهداف الاستراتيجية، تشمل: تحسين كفاءة استهلاك الطاقة، وتخفيض تكاليف الإنتاج، وتعزيز السلامة في موقع العمل، وتقليل الانبعاثات الكربونية.

كما طورت الشركة حلاً ضمن مجموعة من المشاريع الرقمية اعتماداً على الذكاء الاصطناعي لمراقبة حرق الغاز في الشعلات، اعتماداً على نحو 18 ألف مصدر للبيانات، لمراقبة أنشطة حرق الغاز والتنبؤ بها دون أدوات إضافية أو استثمارات رأسمالية جديدة. حيث تستطيع نُظم الذكاء الاصطناعي التي طورتها الشركة التنبؤ بالوقت الذي يُتوقع فيه أن يتجاوز أحد المرافق الحد الأقصى المسموح به من انبعاثات حرق الغاز على الشعلة واتخاذ قرارات تصحيحية قبل حدوث ذلك، مما ساهم في الحد من إجمالي الحرق بأكثر من 60 % حتى عام 2024.

كما أعلنت الشركة خلال فعاليات القمة العالمية للذكاء الاصطناعي في الرياض عام 2024، عن إطلاق برنامج **Eye on AL** الذي يهدف إلى إرساء حوكمة وأنظمة قوية للأمن السيبراني في مجال الذكاء الاصطناعي، بالإضافة إلى تزويد المستخدمين بالمهارات اللازمة للأمن السيبراني[66]. كما أُنشئت الشركة "مركز الابتكار" لتسريع تطوير الحلول في قطاع التنقيب والإنتاج وتعزيز التحول الرقمي، باستخدام التقنيات الرقمية، فأصبح بإمكان مهندسي الشركة والجيولوجيين تحسين الخطط التطويرية ومسارات حفر الآبار، وإدارة إنتاج المياه، والحد من الانبعاثات الكربونية، مما ساهم في زيادة التنقيب

[65] **How Aramco's digital transformation is shaping the workplace of the future**

[66] أرامكو السعودية تكشف عن مبادرات جديدة لتعزيز التطور الرقمي

والاستخلاص، وضمان الموثوقية والسلامة وخفض التكاليف، والاستدامة. كما أنشئت الشركة مكتباً متخصصاً للتحول الرقمي للإشراف على المشاريع الرقمية الخاصة بالشركة وتنسيقها، ويهدف إلى تشجيع العاملين على المساهمة في نشاط التحول الرقمي.

ومن جانب آخر أدركت شركة "سابك" مبكراً الإمكانات الهائلة للتحول الرقمي وقوة البيانات الضخمة والتعلم الآلي وحلول الذكاء الاصطناعي، وكانت مفاهيم كفاءة الطاقة والبصمة التشغيلية وخفض انبعاثات الغازات المسببة للانحباس الحراري العالمي من الركائز الأساسية لتطبيق التحول الرقمي في الشركة. عملت الشركة في عام 2019 على إنشاء برنامج التحول الرقمي للشركات **Corporate Digitalization Program (CDP)**، والذي يستمر لمدة خمسة أعوام، ويهدف بشكل أساسي إلى رقمنة الأعمال الرئيسية في إنتاج وتصنيع البتروكيماويات، والمغذيات الزراعية والتكنولوجيا والابتكار والموارد البشرية والمالية بهدف زيادة الإنتاج والكفاءة والفعالية، مع تعزيز القدرات لتلبية احتياجات العملاء. كما طبقت التحول الرقمي في مجال السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة من اجل استغلال التكنولوجيا في الوصول إلى أدوات التحليل والتنبؤ والتصور للمخاطر والعمل على تجنبها أو تخفيها [67].

كما تستخدم "سابك" نماذج الذكاء الاصطناعي لتعزيز كفاءة الأصول وتقديم الإرشادات للفرق التشغيلية لتحقيق المعايير التشغيلية المثلى، ولتعظيم الإنتاج وخفض استهلاك الطاقة وانبعاثات الكربون. كما توفر خوارزميات الذكاء الاصطناعي المتصلة بأجهزة استشعار متقدمة داخل الشركات التابعة لشركة سابك إمكانية الكشف المبكر عن أي انحراف ضمن مقاييس الاستدامة وتصحيحه في الوقت المناسب. ويمكن لنماذج الذكاء الاصطناعي التنبؤ بانحرافات المعدات الرئيسية التي قد تؤدي إلى اضطرابات في الإنتاج، وبالتالي معالجة أي زيادات محتملة في استهلاك الطاقة.

4.4. دولة قطر

تتبنى دولة قطر مبادرات التحول الرقمي. وكجزء من رؤية قطر الوطنية 2030، أصبح التحول الرقمي عنصراً أساسياً في خطة التنمية طويلة الأجل للبلاد، والتي تهدف إلى إنشاء اقتصاد مستدام قائم على المعرفة. وقد شهد قطاع النفط والغاز في دولة قطر بعض التغييرات الجذرية في مجال التحول الرقمي خلال السنوات الماضية .ووقعت شركة "قطر للطاقة" من خلال برنامج "توطين"، شراكة

[67] SABIC's Digital Transformation Journey

استراتيجية مع شركة "مايكروسوفت" بهدف تسريع التحوّل الرقمي في قطاع الطاقة وتحقيق أهداف البرنامج. كما تركز الشركة على اعتماد التقنيات الذكية والأتمتة، من حيث استخدام أجهزة استشعار إنترنت الأشياء لمراقبة المعدات والبنية الأساسية الحيوية والتحكم، وإتاحة الفرصة لإجراء أعمال الصيانة الاستباقية، وتقليل مخاطر التوقف، وضمان استمرارية العمليات وتحسينها، وتعظيم الإنتاجية وتحسين السلامة والبيئة[68].

5.4. دولة الكويت

بدأت دولة الكويت بتطوير بعض المشاريع الرقمية المتعلقة بقطاع النفط والغاز، وذلك بهدف زيادة الإنتاجية وتحسين الكفاءة والجودة. حيث عملت مؤسسة البترول الكويتية وشركاتها التابعة على تبني أحدث أنظمة المعلومات المتقدمة لمواكبة الثورة الرقمية في إدارة كافة الأعمال والعمليات المتعلقة بالقطاع النفطي وتأهيل الموظفين، وتوفير البيئة المثالية لتحقيق الأهداف الاستراتيجية ضمن رؤية المؤسسة 2040. كما عملت على استكمال تحول كافة العمليات المتعلقة بصناعة النفط والغاز من الأساليب والطرق اليدوية التقليدية إلى الأنظمة الإلكترونية الحديثة والمتطورة وفق الخطط الزمنية المحددة وبما يتماشى مع المعايير والتوجهات العالمية.

كما تم تعزيز قدرات الأعمال المؤسسية للشركة من خلال رقمنة عملياتها في مجالات السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة، ومكافحة الحرائق والأمن، والنقل. وقامت الشركة بتثبيت نظام الذكاء الاصطناعي (SPLUNK-ITSI)، لمراقبة أداء وصلاحية أنظمة تكنولوجيا المعلومات والعمليات التشغيلية المهمة والحرجة من خلال التنبؤ بالحوادث الفنية واكتشافها وحلها قبل حدوثها. كما تم تجهيز النظام بآلية تعلم ذكية بهدف سهولة تحديد السبب الجذري لأي مشاكل في النظام واكتشاف أي عطل فني في الأنظمة في المستقبل باستخدام البيانات التاريخية، والقدرة على إعطاء الأولوية للحوادث وفقًا لشدة تأثيرها على الشركة، وإخطار مشغلي الأنظمة عبر البريد الإلكتروني والرسائل القصيرة لاتخاذ الإجراءات الفورية التصحيحية طبقاً للتعليمات وخطط الطوارئ.

[68] 10 Examples of Digital Transformation in Qatar

كما طبقت الشركة برنامج لإدارة الأزمات والحوادث باستخدام نظام Maximo [69] للإبلاغ عن حوادث السلامة والصحة المهنية والبيئة، وإجراء التحقيقات اللازمة، وعمل التحسينات والإجراءات الوقائية المطلوبة. وأيضاً عملت الشركة على تحديث شبكات الإنترنت، وتنفيذ استراتيجية البنية التحتية لتكنولوجيا المعلومات من خلال تحويل الشبكة إلى نظام بنية تحتية **MPLS**[70]، والذي يسمح بتجزئة الشبكة، مما يساعد في التحكم في حركة المرور على الشبكة، وبالتالي تعزيز الأمن السيبراني.

ومن جانب آخر، تبنت الشركة أفضل الممارسات وأكثرها أمانًا أثناء تصميم وتشغيل وصيانة معدات مصفاة ميناء عبد الله، عند حدوث أي طارئ. حيث عملت على تطوير مشروع متابعة القراءات الرقمية للمعدات باستخدام أجهزة آمنة للاستخدام داخل المصفاة، ويساعد في عملية أتمتة جميع القراءات في وحدات المصفاة ويستبعد استخدام الطرق التقليدية، حيث يتم تحويل القراءات إلى بيانات ملموسة ومخططات تحليلية وتقديمها للإدارة لمراقبة أداء المصفاة.

وطبقت الشركة أكثر أنظمة الاتصال فعالية بهدف تسهيل التواصل بين أعضاء فريق الطوارئ، لسرعة الاتصال في الوقت المناسب. وقد نفذت الإدارة أنظمة اتصال فعّالة مثل نظام الراديو الأرضي **(TETRA)**، والمكالمات العامة، والخط الساخن، والإشعارات عبر الرسائل القصيرة، والاجتماعات عن بُعد لإدارة الحوادث. كما قامت بتثبيت العديد من محطات إرسال **TETRA** في مواقع مختلفة لضمان التغطية الكاملة وجودة الإشارة. على إثر ذلك، حققت المصفاة في عام 2024، المركز الأول في هندسة المخاطر من بين 230 مصفاة عالمية، حسب تقييم أجرته شركة مارش الرائدة في إدارة المخاطر [71].

واصلت شركة الصناعات البترولية المتكاملة الكويتية (كيبيك) سعيها نحو التطور التكنولوجي وتحقيق التشغيل الأمثل لمشروع مجمع الزور النفطي، من خلال تسريع وتيرة التحول الرقمي وتبني تقنية الحوسبة السحابية مما ساهم في زيادة الكفاءة، وتحقيق المعايير الدولية في مجال السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة.

ومن جانب آخر، دشنت شركة صناعة الكيماويات البترولية، مع شركة **(Microsoft Copilot)** مشروعاً لاستخدام الذكاء الاصطناعي **(Generative AI)** لتحسين العمليات وزيادة الكفاءة في مختلف

69 برنامج خاص يحتوي على نماذج تنبؤية تعتمد على الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بتاريخ الفشل التالي المتوقع، وبرامج لمراقبة الأصول وإجراء الصيانة اللازمة، وإطالة العمر الافتراضي للمعدات، وزيادة كفاءتها. برامج لتحديد العيوب بصرياً من خلال الصور والأفلام التي تسجلها الطائرات المسيرة.

70 التبديل متعدد البروتوكولات (MPLS) هو تقنية لتسريع اتصالات الشبكة تم تطويرها لأول مرة في تسعينيات القرن العشرين.

71 kpcofficialkw

مهام أنشطة الشركة لتحسين الإنتاجية من خلال ميكنة المهام، والمساعدة في اتخاذ القرارات المعقدة. والعمل على تشجيع الابتكار، وتحسين الإنتاجية، وإنشاء بيئة عمل أكثر أمناً، وخفض أوقات الصيانة الدورية[72].

6.4. جمهورية مصر العربية

قامت الهيئة المصرية العامة للبترول بتطبيق منظومة التحول الرقمي، خاصةً منظومة السلامة والصحة المهنية وسلامة العمليات لضمان استمرارية واستدامة العمليات الانتاجية بأعلى درجات السلامة والأمان. وأتمت إنشاء التطبيق الرقمي **EGPC uSafe** لمنظومة السلامة المهنية وسلامة العمليات بهدف إتاحة معايير وتعليمات السلامة لجميع العاملين في مواقع العمل المختلفة، وتيسير وسهولة عملية التواصل. يتضمن التطبيق قواعد السلامة والصحة المهنية وسلامة العمليات بناءً على المعايير والأكواد الصادرة عن منظمة IOGP ومتضمنة نظام إدارة العمليات للهيئة(EGPC OMS) ، والقواعد الارشادية الخاصة بالسلامة والصحة المهنية وسلامة العمليات والدروس المستفادة من الحوادث السابقة وأساسيات سلامة العمليات ، بالإضافة الى حملات التوعية ومواد تدريبية متنوعة تتضمن المهام الحرجة مثل (تصاريح العمل – تقييم المخاطر - دخول الأوعية المحصورة - أنظمة عزل الطاقة -العمل على ارتفاعات - أسس منع ومكافحة الحرائق – التعامل الآمن مع المواد الكيميائية الخطرة – سلامة أجهزة الحفر – القيادة الآمنة) [73].

72 التحول الرقمي باستخدام الذكاء الاصطناعي في شركة صناعة الكيماويات البترولية،2024.

73 هيئة البترول" تدشن التطبيق الرقمي لمنظومة السلامة والصحة المهنية، 2022.

الاستنتاجات والتوصيات

- خلصت الدراسة إلى الاستنتاجات والتوصيات التالية:
- أصبحت التقنيات الرقمية جزءًا لا يتجزأ من إدارة السلامة والصحة المهنية وحماية البيئة في المنشآت الصناعية عالية المخاطر، وخاصة صناعة البتروكيماويات.
- مستقبل سلامة العمليات الرقمية مشرقاً، بفضل الأساليب المبتكرة والتقدم الملحوظ الذي تم إحرازه في هذا المجال لمعالجة تحديات الصناعة بشكل مباشر.
- تطبيق التقنيات الرقمية يحقق مكاسب في السلامة والكفاءة، وتقليل التأثير البيئي للصناعة والقدرة على اتخاذ القرارات الفعالة من خلال تعزيز قدرات التكنولوجيا والبيانات.
- تقنيات الذكاء الاصطناعي في برامج الصيانة التنبؤية يتيح الكشف المبكر عن أي أعطال محتملة، وتقليل حالات التوقف غير المخطط لها وتحسين سلامة المعدات والأفراد والبيئة.
- مع تزايد الاعتماد على الأنظمة الرقمية، أصبحت حماية البيانات والمعلومات، والأمن السيبراني ذات أهمية قصوى.
- يضمن التدريب المستمر على التقنيات الرقمية الذكية لمنظومة السلامة، مثل استخدام واقع افتراضي للتدريب على إجراءات الإخلاء والطوارئ، جاهزية العاملين للتعامل مع أي حوادث محتملة.
- تشجيع تنفيذ التحول الرقمي لتحسين دورات وأنظمة العمل ورفع كفاءة العمليات وتحسين الأداء.
- إنشاء منظومة رقمية متكاملة لتحقيق الترابط المطلوب بين أنشطة المنشآة، وإتاحة البيانات لدعم وسرعة اتخاذ القرار والمساعدة في مواجهة الأزمات.
- تطوير استراتيجيات وقائية فعالة عبر التقنيات الرقمية المتقدمة وتطوير استراتيجيات سلامة مبتكرة تعتمد على البيانات والتقنيات الذكية، وتحليل أداء السلامة باستخدام الحلول الرقمية الذكية.
- ضرورة تطوير وتنفيذ إجراءات تشغيل رقمية تضمن تعليمات واضحة وآمنة لإجراء الأنشطة المتعلقة بكل عملية، بما يتوافق مع معلومات سلامة العملية، بالإضافة إلى تصميم استراتيجيات ومبادرات مناسبة للحد من المخاطر، وتنفيذ خطط التخفيف لمواجهة التهديدات السيبرانية وتقليل الاضطرابات التشغيلية ومنعها.
-

المراجع

- Abdo, H. (2017). Dealing with uncertainties in risk analysis: Combining safety and cybersecurity. PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, Grenoble.
- Abdo, H. and Flaus, J.M. (2015). A mixed fuzzy probabilistic approach for risk assessment of dynamic systems. Science Direct IFAC, 48(3), 960–965.
- Abdo, H., Kaouk, M., Flaus, J.M., Masse, F. (2017). Towards a better industrial risk analysis: A new approach that combines cybersecurity within safety. Archives HAL-Ineris, 0185345, 1–8 [Online]. Available at: https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01853454.
- Abdo, H., Kaouk, M., Flaus, J.M., Masse, F. (2018). A safety/security risk analysis approach of Industrial Control Systems: A cyber bowtie combining new version of attack tree bowtie analysis. Computers and Security, 72, 175–195.
- Adriaensen, A., Decre, W., Pintelan, L. (2019). Can complexity thinking methods contribute to improving Occupational Safety in industry 4.0? A review of safety analysis methods and their concepts. Safety, 5, 1–33.
- Agnusdei, G.P., Ela, V., Gnoni, M.G. (2021). A classification proposal of digital twin applications in the safety domain. Computers and Industrial Engineering, 154, 107–137.
- Alberts, C.J., Sandra, G., Behrens, R.D. (1999). Operational Critical Threat Asset and Vulnerability Evaluation (OCTAVE) framework. Technical report, University of Pittsburgh.
- Allford, L. and Wood, H. (2021). Accident analysis benchmarking exercise. Technical report.
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B., Souissi, A.S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? Safety Science, 109, 403–411.
- Baldissone, G., Cavaglia, G., Demichela, M. (2014). Are intensified processes safer and more reliable than traditional processes? An emblematic case study. Chemical Engineering Transactions, 36, 415–420.

- Baldissone, G., Fissore, D., Demichela, M. (2016). Catalytic after-treatment of lean VOCair treatment: Process intensification vs. plant reliability. Process Safety and Environmental Protection, 100, 208–219.
- Baldissone, G., Demichela, M., Fissore, D. (2017). Lean VOC-air mixtures catalytic treatment: Cost-benefit analysis of competing technologies. Environments, 4(46), 1–19.
- Baybutt, P. (2002). Layers of protection analysis for human factors (LOPA-HP). Process Safety Progress, 21(2), 119–124.
- Bayer, T., Jenck, J., Matlosz, M. (2005). IMPULSE – A new approach to process design. Chemical Engineering and Technology, 28(4), 431–438.
- Becht, S., Franke, R., Geisselmann, A., Hahn, H. (2007). Micro process technology as a means of process intensification. Chemical Engineering and Technology, 30(3), 295–299.
- Becht, S., Franke, R., Geisselmann, A., Hahn, H. (2009). An industrial view of process intensification. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 48, 329–332.
- Behesti, B.K., Chi, H.L., Wang, X. (2015). Using RFID systems in design and construction of chemical plants. In The 9th International Chemical Engineering Congress and Exhibition. IChEC, Shiraz.
- Cabreira, C., Capistrano, M., Pacifio, A., Alves, M., Zacarin, P., Andreo, A., Albuquerque, H. (2015). RFID applied to protective equipment inspection. In Brazil RFID. IEEE, Sao Paulo.
- Carlo, F.D., Mazzuto, G., Bevilacqua, M., Ciarapica, F.E. (2021). Retrofitting a process plant in an industry 4.0 perspective for improving safety and maintenance performance. Sustainability, 13(646), 1–18.
- Carvalho, A., Gani, R., Matos, H. (2008). Design of sustainable chemical processes: Systematic retrofit analysis generation and evaluation of alternatives. Process Safety and Environmental Protection, 86, 328–346.

- CCPS (1996). Inherently Safer Chemical Processes: A Life Cycle Approach. Wiley, New York. CCPS (2010).
- CCPS Process Safety Leading and Lagging Metrics. CCPS AIChE, New York. CCPS (2012). Guidelines for Engineering Design for Process Safety. CCPS AIChE, New York.
- Charpentier, J.C. (2002). The triplet molecular process–product–process engineering: The future of chemical engineering? Chemical Engineering Science, 57, 4667–4690.
- Charpentier, J.C. (2005). Review – Process intensification by miniaturization. Chemical Engineering and Technology, 28(3), 255–258.
- Daniellou, F. and Descazeaux, M. (2019). De la prévention des accidents majeurs graves, mortels et technologiques majeurs. L'essentiel – ICSI, 1–24.
- Debray, B. (2006). Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle. Technical report, INERIS, Verneuil-en-Halatte.
- Delatour, G., Laclemence, P., Calcei, D., Mazri, C. (2014). Safety performance indicators: A questioning diversity. In 6th Italian Conference on Safety and Environmental in Process and Power Industry (CISAP 6). AIDIC, Bologne.
- Delvosalle, C., Fiévez, C., Pipart, A., Debray, B. (2006). ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. Journal of Hazardous Materials, 130(3), 200–219.
- Deur, J. (2020). Filière cuir au Bangladesh. Technical report, French embassy in Bangladesh.
- Devries, W. (2007). European roadmap for process intensification. Technical report, Ministry of Economic Affairs [Online]. Available at: www.efce.info/efce_media/European_ Roadmap_PI- p-531.pdf.
- EBIOS (2018). Guide méthodologique : EBIOS Risk Manager, 1st edition. Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information, Paris.
- EBIOS (2019). Le supplément : les fiches méthodes EBIOS Risk Manager, 1st edition. Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information, Paris.
- Englund, S.M. (1982a). Chemical processing: Batch or continuous, part 1. J. Chemical Education, 59(9), 766–768.

- Englund, S.M. (1982b). Chemical processing: Batch or continuous, part 2. J. Chemical Education, 59(10), 860–862.
- Englund, S.M. (1990). Opportunities in the Design of Inherently Safer Chemical Plants, volume 15. Academic Press, New York.
- Englund, S.M. (1991). Design and operate plants for inherent safety, part 1. Chem. Eng. Progress, 85–91.
- Englund, S.M. (1995). Inherently safer plants: Practical applications. Process Safety Progress, 14(1), 63–70.
- EPSC (2021). Process safety fundamentals – Safe operational principles to avoid incidents with hazardous chemicals. EPSC Web Seminar, European Process Safety Centre , https://epsc.be.
- Forcina, A. and Falcone, D. (2021). The role of industry 4.0 enabling technologies for safety management: A systematic literature review. In Procedia Computer Science – International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing. ISM, Hagenberg.
- Frey, C.B. and Osborne, M.A. (2017). The future of employement: How susceptible are jobs to computerisation? Technological Forecasting and Social Change, 114, 254–280.
- Gajek, A., Fabiano, B., Laurent, A., Jensen, N. (2022). Process safety education of future employee 4.0 in industry 4.0. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 64(104696), 1–29.
- Hardy, K. and Guarnieri, F. (2013). Hazard mitigation through a systemic model of accident to a socio-technical system: A case study. Journal of Energy and Power Engineering, 7(4), 775–787.
- Hassim, M., Hurme, M., Kidam, K. (2010). Inherent health consideration for workers'protection in chemical plants. Chemical Engineering Transactions, 19, 353–358.
- Heikkila, A.M. (1999). Inherent safety in process plant design – An index based approach. PhD Thesis, Helsinki University of Technology/VTT Technical Research Centre of Finland, Helsinki.

- Wille, C., Guber, A. (2000). Direct fluorination of toluene using elemental fluorine in gas-liquid microreactors. Journal of Fluorine Chemistry, 105, 117–128.
- Jimenez, M. (2017). What is the impact of industry 4.0 in the process industry? Master's degree, Delft University of Technology, Delft.
- Jones, S. (2019). Managing process safety in the age of digital transformation. Chemical Engineering Transactions, 77, 619–624.
- Kidam, K., Hurne, M., Hassim, M.H. (2010). Technical analysis of accidents in chemical process industry and lessons learnt. In 4th International Conference on Safety and Environment in the Process Industry. AIDIC, Florence.
- Klais, O., Westphal, F., Benaissa, W., Carson, D. (2009a). Guidance on safety/health for process intensification including MS design, part i: Reaction hazards. Chemical Engineering and Technology, 32(11), 1831–1844.
- Klais, O., Westphal, F., Benaissa, W., Carson, D. (2009b). Guidance on safety/health for process intensification including MS design, part ii: Explosion hazards. Chemical Engineering and Technology, 32(12), 1966–1973.
- Krishnamurthi, R., Gopinathan, D., & Kumar, A. (2021). Wearable devices and COVID-19: State of the art, framework, and challenges. In F. Al-Turjman, A. Devi, & A. Nayyar (Eds), Emerging technologies for battling Covid-19 (pp. 157-180). Springer.
- Lavallière, M., Burstein, A. A., Arezes, P., & Coughlin, J. F. (2016). Tackling the challenges of an aging workforce with the use of wearable technologies and the quantified-self. Dyna, 83(197), 38-43.
- Lawson, F. (2020, July 31). How apps with GPS tracking ensure worksite safety. Industry Today.
- Lee, B. G., Lee, B. L., & Chung, W. Y. (2015). Smartwatch-based driver alertness monitoring with wearable motion and physiological sensor. In 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (pp. 6126-6129). IEEE.

- Lee, J. I., Chang, I., Pradhan, A. S., Kim, J. L., Kim, B. H., & Chung, K. S. (2015). On the use of new generation mobile phone (smart phone) for retrospective accident dosimetry. Radiation Physics and Chemistry, 116, 151-154.
- Lee, J. Y., Park, J., Park, H., Coca, A., Kim, J. H., Taylor, N. A., & Tochihara, Y. (2015). What do firefighters desire from the next generation of personal protective equipment? Outcomes from an international survey. Industrial Health, 53(5), 434-444.
- Li, X., Yi, W., Chi, H. L., Wang, X., & Chan, A. P. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. Automation in Construction, 86, 150-162
- Liedtke, M., & Glitsch, U. (2018). Exoskelette — Verordnung für persönliche chutzausrüstung. sicher ist sicher, 3, 110-113.
- . Lo, C. K. Y., Pagell, M., Fan, D., Wiengarten, F., & Yeung, A. C. L. (2014). OHSAS 18001 certification and operating performance: The role of complexity and coupling. Journal of Operations Management, 32(5), 268-280.
- Loey, M., Manogaran, G., Taha, M. H. N., & Khalifa, N. E. M. (2021). A hybrid deep transfer learning model with machine learning methods for face mask detection in the era of the COVID19 pandemic. Measurement, 167, Article 108288.
- Muduli, L., Mishra, D. P., & Jana, P. K. (2018). Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review. Journal of Network and Computer Applications, 106, 48-67.
- Mukai, T., Hirano, S., Nakashima, H., Kato, Y., Sakaida, Y., Guo, S., & Hosoe, S. (2010). Development of a nursing-care assistant robot RIBA that can lift a human in its arms. In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 5996-6001). IEEE.
- Mullings, L., & Schulz, A. J. (2006). Intersectionality and health: An Introduction. In A. J. Schulz, & L. Mullings (Eds), Gender, race, class, & health: Intersectional approaches (pp. 3-17). JosseyBass/Wiley.
- Murray, E., Goodfellow, H., Bindman, J., Blandford, A., Bradbury, K., Chaudhry, T., & Waywell, J. (2022). Development, deployment and evaluation of digitally enabled,

remote, supported rehabilitation for people with long COVID-19 (Living With COVID-19 Recovery): Protocol for a mixed-methods study. BMJ Open, 12(2), Article e057408.

- Nasios, K. (2002). Improving chemical plant safety training using virtual reality (Doctoral thesis, University of Nottingham).
- Nath, N. D., Behzadan, A. H., & Paal, S. G. (2020). Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment. Automation in Construction, 112, Article 103085.
- Peña-Casas, R., Ghaliani, D., & Coster, S. (2018). The impact of digitalisation on job quality in European public services. The case of homecare and employment service workers. European Social Observatory, European Public Service Union (EPSU). Available at: https://www.epsu.org/sites/default/files/article/files/FINAL%20REPORT%20EPSU%20DIGITALI SATION%20-%20OSE%20June%202018.pdf
- Pierdicca, R., Prist, M., Monteriù, A., Frontoni, E., Ciarapica, F., Bevilacqua, M., & MazzutoM G. (2020). Augmented reality smart glasses in the workplace: Safety and security in the Fourth Industrial Revolution era. In L. De Paolis, & P. Bourdot (Eds), Augmented reality, virtual reality, and computer graphics. AVR 2020. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12243 (pp. 231- 247). Springer
- Pishgar, M., Issa, S. F., Sietsema, M., Pratap, P., & Darabi, H. (2021). REDECA: A novel framework to review artificial intelligence and its applications in occupational safety and health. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(13), Article 6705.
- Popescu, D., Stoican, F., Stamatescu, G., Ichim, L., & Dragana, C. (2020). Advanced UAV– WSN system for intelligent monitoring in precision agriculture. Sensors, 20(3), Article 817.
- Probst, T. M., Bettac, E. L., & Austin, C. T. (2019). Accident under-reporting in the workplace. In R. J. Burke, & A. M. Richardsen (Eds), Increasing occupational health and safety in workplaces (pp. 30-47). Edward Elgar Publishing Limited.

Executive Summary

In the era of rapid digital transformation, digital technologies have become an essential component in managing occupational safety, health, and environmental protection in high-risk industrial facilities, such as refineries and petrochemical industries. Safety solutions powered by AI applications and advanced digital technologies enable the identification and analysis of risk profiles associated with recorded incidents. Moreover, they facilitate the integration of large volumes of safety-related data collected from multiple applications and programs into a single electronic platform. This enhances the ability of safety and environmental managers to manage procedures effectively and make quick, data-driven decisions to mitigate potential risks. High-risk industries are now better equipped with measures that ensure higher levels of safety, as never before. Occupational safety is no longer limited to equipment and safety protocols for individuals, operations, and assets, but also includes fostering a culture of safety behavior among workers, which positively impacts property protection, human lives, and the stability of the working environment.

Integration of Safety Systems with Industrial Developments

Technological innovations, scientific breakthroughs, and regulatory advancements have always preceded industrial revolutions. The first industrial revolution began in 1750, centered around coal and mineral extraction, the textile industry, and the invention of the steam engine. This was followed by the second industrial revolution in 1840, which focused on electricity and oil production, the emergence of mechanical and chemical industries, and the use of railways for public transport. The third industrial revolution, which took place in the 1960s, was marked by the advent of electronics (transistors and integrated

circuits), computer science, telecommunications, and audio-visual industries. The fourth industrial revolution began in 2010, driven by the integration of the internet, sensors, and communication technologies to manage complex processes. Automation, robotics, and predictive failure analysis started to shape industrial production, connecting resources, information, machines, tools, and workers into a single network called the Industrial Internet of Things (IIoT). With the expansion of the fourth industrial revolution and the increasing use of automation, AI, and IoT, a new era, the "Fifth Industrial Revolution," emerged around 2020, aiming to balance scientific and human factors.

Alongside industrial development and the growing risks associated with it, the need for safety concepts emerged. In 1802, the first safety protocols ("Safety 1.0") were introduced with the publication of the first law in the UK concerning the "Health and Morality of Apprentices." Meanwhile, imperial decrees published in France between 1810 and 1811 laid down the first regulatory frameworks for human risk management. The Imperial Decree of 1810, for example, addressed factories and workshops that emitted foul or unpleasant odors.

The "Safety 2.0" phase focused on preventing major accidents, as technology at the time was not yet aligned with industry needs, and equipment design was often inadequate. Analysis of catastrophic accident causes led to the development of safer process designs and the establishment of international safety and environmental standards. The "Safety 3.0" phase, from the 1960s to the 1980s, witnessed a significant decrease in accident rates. However, tragic accidents still occurred, prompting a reevaluation of risk management practices and a shift towards "Health, Safety, and Environmental Management Systems"

(HSEMS). In response to severe chemical accidents globally, governments and industrial companies focused on improving technology and human factors to prevent accidents, developing policies and standards to expedite the adoption of process safety management systems.

Digital Transformation and Enhancing Process Safety

Digital transformation technologies help organizations transition from traditional to advanced digital systems, using smart data and integrating digital tools and software into safety strategies for risk analysis based on international standards. These technologies also enhance safety culture and develop skills to ensure a safer working environment. The petrochemical and refining industries rely on complex processes to convert raw materials into high-value products. Process safety is crucial for minimizing industrial accidents, and the management of process safety has evolved alongside technological advancements. Technologies have provided a range of solutions to enhance process safety, enabling operators to anticipate potential failures by continuously monitoring equipment operations and comparing them with virtual counterparts. Historical operational data and advanced data analysis methods, including machine learning, have revolutionized how process safety risks are predicted and managed, reducing the likelihood of chemical leaks and other accidents. IoT has been applied in industrial process monitoring, with sensors tracking critical parameters like pressure, temperature, and chemical concentrations. Furthermore, "digital twins" powered by AI in predictive maintenance serve as early warning systems. Safety managers can now use a suite of software tools to model industrial environments and simulate processes to identify system weaknesses and assess potential risks. This allows safety

personnel to detect deviations from normal operating conditions and take immediate corrective actions.

Digital Transformation Applications in Safety Risk Assessment and Environmental Impact in Refining and Petrochemical Industries

The digital transformation strategy in occupational safety, health, and environmental protection aims to convert traditional processes into digital workflows using modern technologies to improve efficiency, productivity, and worker safety while enhancing their safety culture. This is achieved through the development of software systems and the use of data analytics, AI, and cloud computing. However, digital transformation also presents challenges and risks, especially if not managed carefully or if backup systems are not in place to ensure operational continuity. For instance, smart digital technologies could fail due to battery malfunctions, fires, or explosions, or water could infiltrate electrical components, leading to short circuits or electrical shocks.

Risk identification is crucial to ensuring the safe design and operation of complex production processes in petrochemical facilities. Eliminating factors that could lead to major accidents, such as fires, explosions, or toxic emissions, is essential. Digital tools like Industrial IoT, AI, and machine learning are used to enhance safety protocols and programs. While risk assessments can be challenging, the rapid evolution of digital transformation and the availability of a variety of digital tools, along with AI applications, have made the task easier. These technologies can transform vast, diverse datasets into digital forms that are easier to store, categorize, analyze, and identify new causal relationships in complex systems to assess and predict risks more accurately and quickly.

Furthermore, due to the potential negative impact of refining and petrochemical activities on the environment, Environmental Impact Assessment (EIA) studies play a vital role in decision-making. EIA identifies and addresses potential environmental, social, and economic risks associated with projects. The application of digital transformation technologies in EIA has led to a revolutionary shift, providing a virtual global ecosystem by linking all available environmental data to a detailed geographic information system (GIS), ensuring data accessibility online, and integrating it into a searchable archive for data-driven, timely environmental decision-making.

Digital Transformation Models for Health, Safety, and Environmental Systems in OAPEC Member Countries

Refining and petrochemical companies in OAPEC member countries prioritize reducing industrial accidents by implementing digital transformation projects and advanced plans to maintain worker safety, industrial process safety, and compliance with local and international regulations. These efforts aim to improve safety and minimize human, financial, and equipment losses through prevention, mitigation, and optimal system utilization. To maximize the benefits of digital transformation in safety, health, and environmental protection, the study reviewed several case studies and success stories from Arab countries in the OAPEC region, highlighting the benefits of applying digital technologies. Some Arab countries have initiated digital transformation in refining and petrochemical industries, using remote monitoring, robotics, AI, routine maintenance, scheduling, and virtual training programs to improve production efficiency, reduce environmental pollution, and enhance occupational health and safety compliance.

Conclusions and Recommendations

The study concludes with the following findings and recommendations:

- **Digital technologies have become an integral part of managing occupational safety, health, and environmental protection** in high-risk industrial facilities, particularly in the petrochemical industry.
- **The future of digital process safety is bright**, thanks to innovative methods and notable progress in addressing industry challenges directly.
- **The application of digital technologies results in gains in safety and efficiency**, reduces the environmental impact of the industry, and enhances decision-making capabilities through improved technology and data.
- **AI technologies in predictive maintenance programs enable early detection of potential failures**, reducing unplanned downtime and improving the safety of equipment, personnel, and the environment.
- **As reliance on digital systems increases, data protection and cybersecurity are of paramount importance.**
- **Continuous training on smart digital technologies for safety systems**, such as using virtual reality for evacuation and emergency response training, ensures that workers are prepared to handle potential incidents.
- **Encourage the implementation of digital transformation** to improve workflows, enhance operational efficiency, and optimize performance.
- **Establish an integrated digital system** to connect facility activities, provide data for quick decision-making, and support crisis management.
- **Develop effective preventive strategies through advanced digital technologies** and innovative safety strategies based on data and smart

technologies, while analyzing safety performance using intelligent digital solutions.

- **It is necessary to develop and implement digital operating procedures** that provide clear and safe instructions for conducting activities related to each process, in line with process safety information. Additionally, designing suitable strategies to mitigate risks, implementing cybersecurity mitigation plans, and minimizing operational disruptions are crucial.

The role of digital transformation in enhancing the occupational safety and health system and environmental protection in the refining and petrochemical industries

Abstract

In the era of rapid digital transformation, digital technologies have become an essential part of managing occupational health and safety (OHS) and environmental protection in high-risk industrial facilities, such as the refining and petrochemical industries. Safety solutions supported by AI applications and advanced digital technologies allow for the identification and analysis of risk profiles associated with recorded incidents. Additionally, they enable the integration of large safety-related data collected from multiple applications and programs onto a single electronic platform. This enhances the ability of safety and environmental managers to effectively manage procedures and make fast, data-driven decisions to reduce potential risks. Industries with higher exposure to risks are now equipped with measures that ensure a higher level of safety than never. Occupational safety is no longer limited to equipment and installations or adhering to safety protocols for individuals, processes, and assets. It also includes fostering a safety culture among workers, which positively impacts the protection of property and lives, as well as the stability of the work environment.

At the same time, the digital transformation in this field introduces challenges and risks that may negatively affect workflow if not carefully managed. Therefore, it is crucial to establish backup systems to ensure operational continuity and adopt effective strategies and plans to mitigate risks and reduce potential negative consequences.

The study aims to highlight the importance of digital transformation in enhancing the occupational health, safety, and environmental protection system in the refining and petrochemical industries by providing a safe working environment and preserving equipment and the surrounding environment in production sites and adjacent urban areas.

The study consists of four main chapters:

- **Chapter 1**: Reviews the evolution of safety procedures with the advancement of industrial revolutions, leading to modern safety concepts

that focus on improving efficiency and achieving optimal performance in industrial sectors.

- **Chapter 2**: Focuses on the role of digital transformation in strengthening the process safety system using advanced digital tools and software for risk analysis and decision-making. It also addresses the contribution of digital transformation in helping institutions transition from traditional systems to advanced digital systems, with an emphasis on the role of industrial security in managing process safety and protecting facilities and workers according to international and local standards.
- **Chapter 3**: Discusses the importance of implementing risk identification programs in the refining and petrochemical industries, where production relies on complex processes to convert raw materials into high-value economic products. This chapter also reviews risk assessment methods using modern communication technologies and interoperability systems, as well as the role of cybersecurity in protecting industrial systems. The importance of environmental and social impact assessments and the need to digitize their results are also highlighted, which helps in making balanced decisions regarding the feasibility of new industrial development projects.
- **Chapter 4**: Provides an overview of the role of digital transformation in enhancing occupational health, safety, and environmental protection systems in the countries of the OAPEC (Organization of Arab Petroleum Exporting Countries), reviewing case studies and success stories from refining and petrochemical industry facilities.

In conclusion, the study presents a set of findings and recommendations aimed at strengthening the effectiveness of digital transformation in improving occupational health and safety, as well as environmental protection in these vital industries.

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول(أوابك)