Gharyan Journal of Technolgy

Annual, Corrected and Accademic Journal

Issued By

Higher Institute of Sciences and Technology, Gharyan

Gharyan - Libya

Issue (12) July 2026

International Code: ISSN (Print) 2518-5993

ISSN (Online) 2521-9308

www.gjt.scitech-gh.eduly

Gharyan Journal of Technology

Annual, Reviewed and Academic Journal

Issued by :

Higher Institute of Sciences and Technology, Gharyan

Issue 12 – July 2026

International Standard Serial Number:

ISSN (Print): 2518-5993

ISSN (Online): 2521-9308

Legal Deposit Number at the National Library:

(National Library 116 / 2016)

Disclaimer

1. The views, ideas, scientific information, and any other content published in the journal under the names of their authors are solely their responsibility, and the journal bears no liability for them.
2. Research papers, scientific articles, and other correspondence should be directed to the Editorial Board of the *Ghiryan Journal of Technology* at the following address:

Email: info@gjt.scitech-gh.edu.ly

Phone: 0913506053

3. Advertisements in the journal are arranged in coordination with the Editorial Board.
4. All copyright is reserved. Use of material published in this journal is permitted provided that the source is properly cited.

Gharyan Journal of Technology

Annual, Reviewed and Academic Journal

Issued by : Higher Institute of Sciences and Technology, Gharyan

Editorial Board

Dr: Melod Mohammed Unis	**General Supervision**
Dr:Ahmad Ramadan Kobaiz	**Editor In Chief**
Prof:Abdelati Elalem	**Member**
Mr: Mohamed Rajab Baiod	**Member**
Mr:Mohamed M.Alghiryani	**Member**
Mr:Abdulbasit Mohamad Ali	**Member**
Dr: Yasen Asad Mhanna Rajihy	**Member**
Dr: Abdussalam Mohamad Ali	**Member**

Contact Us:

: Telephone 0913506053
E-mail: info@gjt.scitech-gh.edu.ly

Contents

English Research Papers	Page
Simulation of the separation process of Toluene/n-Heptane mixture using the organic solvent N-methyl-2-pyrrolidone by Aspen Hysys software Ezeddin H. Alshbuki , Mufida Mohamed Bey	9-24
A Formal Architecture for Emergent Requirements in AI-Amplified Software Engineering Abdelaziz O Abdelsalam	25-50
Automated ICAO/ISO Compliance Validator for ID Portraits Mohanned Naji Albibas, AL-Mokhtar Abdullah Faraj, Musa Faneer	51-67
Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316 TIG Welded tube Joints Hasan Haji, Hassan Zaied, Mohamed Mlyan and Alla Shafter	68-84

الأوراق البحثية باللغة العربية	الصفحة
مقدمة وكلمة المجلة	**7**
تحليل معايير التحول الرقمي في ضوء التطور المرحلي للأدوات التقنية في النظام المعلوماتي، دراسة حالة بيت التمويل الكويتي(2015-2024) **قيس عيسى مصطفى غومة**	**35-8**
أثر التكامل والشراكة المصرفية على إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني في القطاع المصرفي الليبي **سعود المهدي بن زايد، سالم اشتيوي الغويل، هدى البشير التويرقي**	**60-36**
نمذجة أداء بركة شمسية تحت ظروف طرابلس المناخية مع تصور فيزيائي مطوِر **نور الدين عبدالحفيظ عبود**	**79-61**

Introduction

We begin by praising and thanking Allah, whose grace and guidance have enabled us to publish the twelfth issue of the *Gharyan Journal of Technology*, a peer-reviewed scientific journal published by Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan. Recognizing the importance of establishing a scholarly journal for the Institute, its administration resolved to launch the journal in 2015. The Editorial Board then commenced its work, and the inaugural issue was published in print in 2016, despite the many difficulties and challenges encountered at that time.

From the outset, both the Institute's administration and the Editorial Board committed themselves to upholding the institution's reputation through professionalism, academic integrity, and scientific rigor. To ensure the highest standards of quality, the journal relied on a distinguished panel of reviewers with extensive expertise in their respective disciplines. These efforts marked the beginning of the journal's journey, making it the first peer-reviewed journal dedicated to technical and vocational education in the Western Mountain region of Libya, alongside a limited number of scholarly journals in the higher education sector.

Our primary focus has always been the quality of the published research rather than the quantity of papers included in each issue. The journal has published a diverse range of scholarly articles contributed by researchers from the Higher Institute of Science and Technology, academic and research institutions in the city of Gharyan and its surrounding areas, as well as universities and research institutions across Libya. From the very beginning, we have firmly believed in the vital role of scientific research in providing practical and evidence-based solutions to the challenges facing our institutions across various sectors. To maximize their impact, all published articles have been made openly accessible to researchers and practitioners.

The world's most advanced nations have achieved their distinguished status through knowledge, perseverance, and the effective utilization of their human and material resources to promote sustainable development and improve the well-being of their societies. Inspired by this principle, we have worked diligently—despite the considerable challenges associated with publishing a peer-reviewed scientific journal—to position the *Gharyan Journal of Technology* among the leading scholarly journals in

Libya. We have continuously evaluated and improved the journal's performance, resulting in its inclusion in the Arab Impact Factor for several consecutive years, during which its impact indicator showed steady improvement. In 2025, the journal was also indexed in the **Directory of Libyan Open Journals (DOLJ)** and classified in the fourth quartile (Q4). We are committed to further enhancing the journal's ranking by addressing the recommendations and observations made during the evaluation process.

While we do not claim to be the best, we have embraced the challenge and continue to dedicate all available resources toward making the *Gharyan Journal of Technology* a distinguished scientific journal and a valuable platform for researchers and specialists to disseminate their work. The journal is published by a well-established academic institution with more than thirty-three years of educational excellence, having graduated nearly three thousand students across a wide range of disciplines. These graduates have demonstrated outstanding professional competence and have contributed significantly to enhancing the Institute's reputation both locally and nationally.

The twelfth issue of the *Gharyan Journal of Technology* features a collection of innovative and diverse research papers contributed by scholars from various higher education institutions. The Editorial Board warmly invites researchers and specialists to submit original, high-quality manuscripts for publication in future issues. We also encourage prospective authors to visit the journal's official website to learn more about the journal, access the electronic archives of all published issues, review the publication guidelines, and obtain other relevant information. Furthermore, we welcome constructive comments, suggestions, and feedback, recognizing their essential role in the continuous development of the journal and the achievement of its academic mission.

Editorial Board

Researche Papers Written By English Language

Gharyan Journal of Technology (2026), 1(12), 9-24
Issued by: Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan
www.gjt.scitech-gh.edu.ly

مجلة غريان للتقنية
تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان

Simulation of the separation process of Toluene/n-Heptane mixture using the organic solvent N-methyl-2-pyrrolidone by Aspen Hysys software

Ezeddin H. Alshbuki [1*], Mufida Mohamed Bey [2]
[1, 2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Sabratha University, Libya

ezeddin.alshbuki@sabu.edu.ly

Received: 24/04/2026 Accepted: 03/05/2026 Publicated: 31/07/2026

الملخص

يُعدّ النفط الخام ومشتقاته من أهم مصادر الطاقة ودعم للاقتصاد المحلي. ولذلك، يُركّز الاهتمام على تطوير صناعة البترول، بما في ذلك فصل خليط الهيبتان العادي والتولوين، الشائع في عمليات الفصل والتكرير في مصافي البترول، وخاصةً في فصل المذيبات العضوية. ونظرًا لأهمية هاتين المادتين في الصناعة الكيميائية، يُعدّ فصلهما أمرًا بالغ الأهمية. في هذا البحث، استُخدم برنامج **Aspen Hysys** لمحاكاة فصل هاتين المادتين من خلال تصميم برجي تقطير باستخدام مذيب عضوي مناسب، وهو **N**–ميثيل–2–بيروليدون **(NMP)**، بواقع 14 و10 مراحل فصل على التوالي. وقد كان هذا ضروريًا نظرًا لصعوبة الفصل ووجود حالة متجانسة في خليط التولوين/الهيبتان العادي. في هذه العملية، يتم ضخ ما يقرب من 962 كجم/ساعة من الخليط، بتركيز 50% لكل مادة، إلى برج التقطير ومعالجته بمذيب بمعدل تدفق دوري يبلغ حوالي 2947 كجم/ساعة، مما ينتج عنه ما يقرب من 460 كجم/ساعة من التولوين بتركيز 99.9%.

الكلمات المفتاحية : أسبن هايسيس، مذيب عضوي، تقطير متساوي الخواص، تقنية فصل

Abstract

Crude oil and its derivatives are among the most important sources of energy and support for the local economy. For these reasons, attention is focused on developing the petroleum industry, including the separation of the normal heptane and toluene mixture, which is commonly found in separation and refining processes in petroleum refineries, especially in organic solvent separation. Given the importance of these two substances in the chemical industry, their separation is crucial. In this research, the Aspen Hysys software was applied to simulate the separation of these two substances by designing two distillation towers using a suitable organic solvent, N-Methyl-2-

Pyrrolidone (NMP), with 14 and 10 separation stages, respectively. This was necessary due to the difficulty of separation and the presence of an isotropic state in the Toluene/n-Heptane mixture. In this process, approximately 962 kg/h of the mixture, at a concentration of 50% for each substance, is flowed into the distillation tower and treated with a solvent at a cyclic flow rate of approximately 2947 kg/h, resulting in approximately 460 kg/h of toluene at a concentration of 99.9%.

Keywords : Aspen Hysys, Organic Solvent, Isotropic Distillation, Separation Technique

Introduction

Distillation is a basic separation technique that is used in the chemical industry for the separation of two or more components in an effective manner. Among industrial facilities, the distillation columns represent the highest energy users to more than 50% of the total energy usage, whose accurate operation and design are therefore vital to guarantee economic energy-related aspects of the process [8]. While simple distillation is sufficient for most mixtures, isotropic mixtures, with the same liquid-vapor phase composition, cannot be broken down by this method. Conventional distillation would yield a high purity and high product recovery, but if separation was needed, advanced techniques such as extractive, variable pressure distillation, isotropic distillation, and liquid-liquid extraction would be used [4][8]. Among the methods, e.g., the variable pressure distillation method, the extractive distillation method is an economic and energy-saving process. But it needs the careful determination of the suitable solvent, which profoundly influences the separation efficiency and the purity of the end-product [2][5][6]. The solvent/feed ratio and the reflux ratio should be sufficiently high for the best solvent and feed combination in the design of extraction distillation columns. Higher purity of the target component and consequently lower content of the impurities in the distillate and the overall energy consumption decrease with increasing these ratios in most cases. Studies also indicated that an increased flow rate of solvent lowers the reboil heat in the extraction distillation column and elevates the heat of reboiling in the solvent recovery column. A suitable solvent flow rate is to be selected so that the total energy consumption of the process is minimized [6][7]. The separation of aromatics (benzene, toluene, and xylene, BTX) from naphtha is significant in the petrochemical industry due to the value of the aromatics, and the need to satisfy environmental regulations limiting aromatic contents in fuels

[1][3].Using simulation software tools such as Aspen Plus or Aspen Hysys, some work related to the design and simulation of the extraction distillation process, considering the influence of different types of solvents and the heat integration for the process improvement in terms of efficiency, cost, and energy consumption [1][2][3][8]. Recent studies have also shown the ability of ionic liquids to act as green solvents with high efficiency in breaking isotropic behavior and minimizing the loss of solvent and energy when compared to traditional solvents [1]. So, extraction distillation is a high-tech and powerful technique for the separation of isotropic mixtures and holds great promise for further improvement in economic and environmental performance.

The inspiration of these research enthusiasts, Numerous commonalities between extractive distillation and its optimization were seen in the literature review and are outlined as:

• The Extractive Distillation process is more economical in terms of capital investment and energy requirement [9]. On the other hand, the pressure swing distillation does not suffer from the potential problem of product contamination by an extractive solvent which must be added to binary systems.

• The Solvent/Feed (solvent to feed ratio) and reflux ratio optimization are the two most crucial design specifications or parameters of the distillation columns that necessarily need to be optimized in extractive distillation [10].

• The selection of solvent is the most important in extractive distillation process design.

• The optimization of extractive distillation frequently demands the consideration of the influence of number of theoretical stages on the purities of components from homogeneous isotropic mixtures, as also to examine the cost to be incurred for obtaining a component purity within specification limit.

• It could be generally seen that the higher the flow rates of solvent, the higher would be the purity of desired component in distillate or equivalently speaking; lower would be impurities of rest of components in distillate at column T-100 during extractive distillation.

• Reboiler heat duty in extractive distillation column decreases with the entrainer flow rate, while reboiler in solvent recovery column is noticed to increase as more solvent is fed. Therefore, a solvent flow rate should be selected in such way that the total heat reboiler duty or energy of separation process is minimized [11-12].

Simulation Process for N-Heptane and Toluene System

Toluene present in crude oil is dominantly obtained as an intermediate product during the gasoline production through a catalytic reformer/ethylene cracker or during the coke production from coal [13]. It is one of the leading chemicals that is used in various chemical industries. n-Heptane a larger extent through dehydration of 2-heptanols into Heptene, which is further converted into n-Heptane through hydrogenation or produced alternatively during hydrogenation of Heptene into n-Heptane. n-Heptane is in continuous demand by various chemical industries. n-Heptane forms a homogenous isotropic mixture with Toluene; further separation of the former and the latter through the normal distillation technique cannot be effectively worked out. In our research study, we had concentrated on the ED technique for the effective separation of n-Heptane and toluene using N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP). The properties of Toluene and n-Heptane are also shown in Table1:

Table 1. Properties of n-Heptane and Toluene compounds [14-15]

Properties	**Toluene**	**n-Heptane**
Molecular Weight	92.14 gm/mole	100.2 gm/mole
Density	0.867 gm/cm^3 at 20˚C	0.68 gm/cm^3 at 20˚C
Boiling Point	110.6˚C	98.4˚C
Melting Point	-94.9˚C	-90.6˚C
Solubility in water	0.52 g/L at 25˚C	3.4 mg/L at 25˚C

In the simulation of the n-heptane-toluene extractive distillation system, we focused on two distillation columns. The primary column, referred to as the Extractive Distillation Column (T-100), plays a crucial role in breaking down the isotropic components of the feed. The second column, designated as the Entrainer Recovery Column (T-101), is responsible for recovering the solvent

used in the process. In the context of T-100, the isotropic feed (detailed in Table 2) was uniform across all solvents, ensuring a consistent basis for comparing the effectiveness of different solvents informed by our optimization results.

Table 2. Isotropic feed stream parameters for Column (T-100)

Vapor Phase Fraction	Temperature (°C)	Pressure (kpa)	Molar Flow Rate (kgmole/h)	Mole Fraction	
				Toluene	n-Heptane
0	43.33	12	10	0.5	0.5

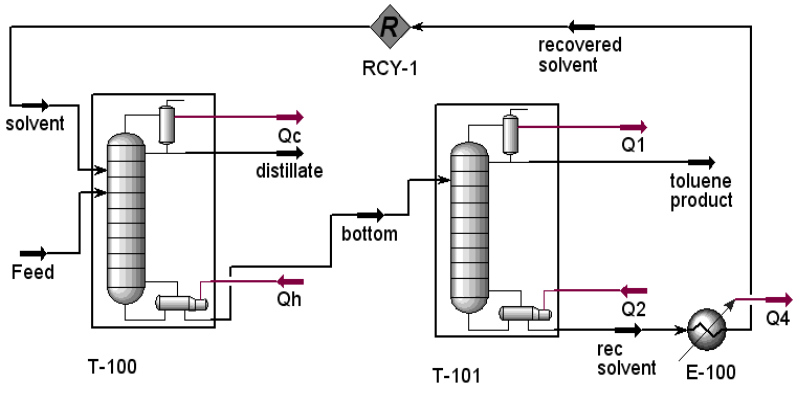


Figure 1. Aspen Hysys Schematic Process Flow Diagram for the n-Heptane/Toluene system using N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP) as a solvent [16]

Addition of isotropic components, solvent, followed by input of the thermodynamic model (UNIQUAC), and Peng-Robinson equation of state (PR) which makes equation widely applied in engineering. The expression is as follows in equations 1 to 4 [17]:

$$P = \frac{RT}{(V-b)} - \frac{\theta_{PR}}{V^2+2bV-b^2} \quad (1)$$

$$\theta_{PR} = a''[1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5})]^2 \quad (2)$$

$$a'' = \frac{0.45724R^2T_c^2}{P_c} \quad (3)$$

$$b = \frac{0.07780RT_c}{P_c} \quad (4)$$

Defining solvent and isotropic feed streams, followed by the addition of Extractive Column (T-100), and defining the necessary column parameters. Run the simulation till the column T-100 converges with the required distillate purity (n-Heptane) of a minimum 99%. Adding the Entrainer Recovery Column (T-101) and adding the bottom product of the T-100 as feed to T-101. Run the simulation till T-101 converges with the required distillate purity (Toluene) of a minimum 99%.

Comparison of the use of solvent (NMP) with some other solvents

The efficiency of aromatic recovery processes is highly dependent on the thermodynamic and physical properties of the solvent. Sulfolane exhibits the highest industrial selectivity for Toluene over paraffins, ensuring superior product purity at the column bottom [18]; however, its high viscosity (10.3 cP) can lead to a 15% increase in pressure drop, impacting hydraulic stability [19]. In contrast, N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) offers a balanced operational profile with low viscosity and high chemical stability, making it ideal for maintaining linear pressure profiles in recovery columns [20], [21]. While Dimethyl Sulfoxide (DMSO) provides acceptable hydraulic performance, its inherent thermal sensitivity above 150°C poses significant risks to simulation accuracy and process reliability [22]. Therefore, the selection between these solvents necessitates a trade-off between the high-purity yield of Sulfolane and the energy-efficient, stable operation provided by NMP [18], [21].

Table 3. shows the differences between some solvents

Feature	N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP)	Sulfolane	Dimethyl Sulfoxide (DMSO)
Selectivity	High selectivity for aromatics (Toluene) over paraffins (Heptane).	Highest industrial selectivity; often yields higher Toluene purity at the bottom [24].	Moderate to high; slightly lower than NMP in this specific system.

Boiling Point	202(̊C) ensures stable separation in the recovery column.	287(̊C) extremely high, prevents solvent loss but increases reboiler energy duty.	189(̊C) relatively close to Toluene, which may complicate downstream recovery.
Hydraulic Impact	Low viscosity 1.89cP ensures a linear pressure profile.	Higher viscosity 10.3cP may increase pressure drop by 15\% [25].	Acceptable viscosity; provides a pressure profile similar to (NMP).
Chemical Stability	Very stable and non-corrosive under standard conditions.	May require additives to prevent acidic decomposition at high temperatures.	**Thermally sensitive;** may decompose above 150(C), affecting simulation accuracy [26].

Results and Discussion

The mole fraction distribution of liquid in the distillation column trays for the separation of n-heptane and toluene using the non-volatile solvent NMP is shown in figure 2. n-Heptane is the most volatile component and is found to have a mole fraction close to one in the upper trays. The mole fraction drops rapidly around tray 6 and more gradually in the lower trays. This shows that n-heptane is concentrated in the distillate. On the upper stages, the concentration of toluene diminishes, and then, it starts rising to the peak concentration in stages 13-14 (the middle part). The concentration of NMP, the least volatile compound, is non-existent in the rectifying section and sharply rises below stage 6 in the bottom stage. This strong change of slope at stage 6 is the position of the solvent feed, and also explains the great influence of this solvent feed on the column performance. In general the profiles show good clear separation as n-heptane on top, NMP on subtracting stage and toluene is the intermediates stage and the main body of the distillation column. The simulated tray composition profiles agree with experimental literatures for n-heptane/toluene/NMP system, NMP is an efficient selective solvent separation of aromatics and aliphatics is strengthened [23]. The mole fraction distribution shows that the solvent (NMP) is fed at Tray 5, which changes the relative volatility of the mixture and leads

to the sudden drop of the n-Heptane concentration. In terms of solvent efficiency for this extractive system, NMP has a superior compromise of separation selectivity and hydraulic stability [24]. NMP has higher efficiency in reducing the energy consumption of the reboiler than that of Sulfolane attributed to the lower boiling point and viscosity, which is also in consistent with the linear pressure profile in the primary results [25]. Yet, contemporary experimental patterns hint that substitutes such as DMSO could be a greener received profile if reboiler temperatures are rigorously monitored to avoid thermal degradation leading to erratic component mole fractions [26].

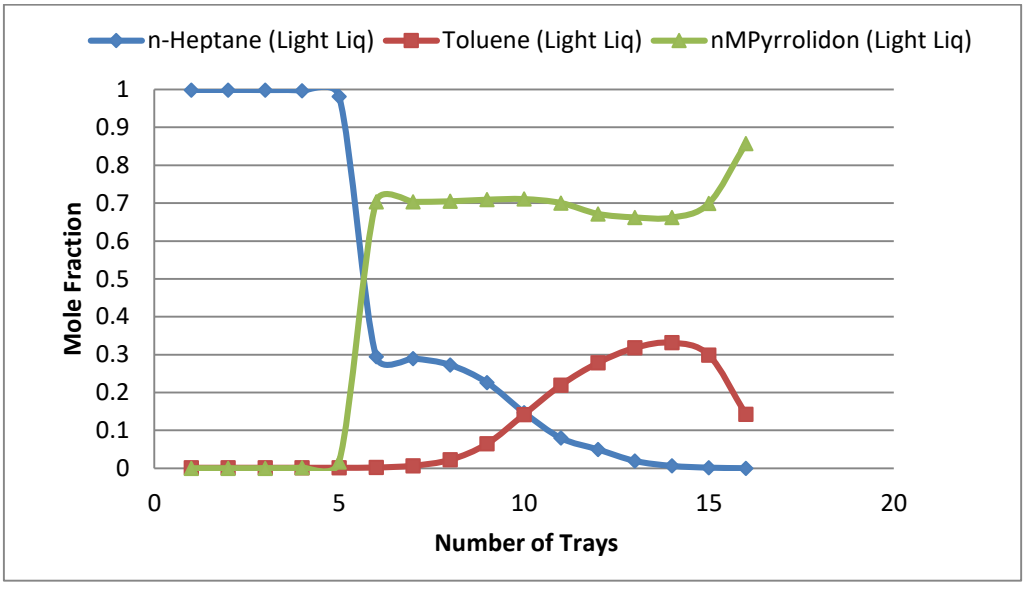


Figure 2. Change in the mole fraction of Toluene, n-Heptane, and NMP versus the Number of Trays in the first column T-100

The distributions of molar flow rates of both vapor and liquid within the stages of the distillation column are shown in Figure 3 for various feed and solvent inputs to the column, which also illustrates the effect of feed and solvent addition on the internal column hydrodynamics. The vapor flow rate rises rapidly along the upper stages to about 24 kmol/h, and it drops gradually along the lower stages to about 10–12 kmol/h at the bottom of the column. This depression may be due to the condensation effect and vapor–liquid mass transfer in the column. On the other hand, the liquid flow is almost constant in

the high section (18~19 kmol/h) and sharply increases at about stage 6 up to 43~46 kmol/h. Such an abrupt increase marks the location of feed (solvent) injection, a fact which causes the internal liquid traffic to be considerably greater there. In this zone, the liquid flow remains very high, and it decreases slightly near the bottom, near the reboiler. In summary, the rate of flow results illustrate that two very different types of regions exist above and below the feed stage, giving rise to a feed stage recompiling process with significant changes in vapor-liquid traffic that led to potential variations in mass transfer behavior and separation of. The simulated tray composition profiles are consistent with literature experimental data for the n-heptane/toluene/NMP system, where NMP acts as an effective selective solvent and increases the separation between aromatics and aliphatic [23],[27].

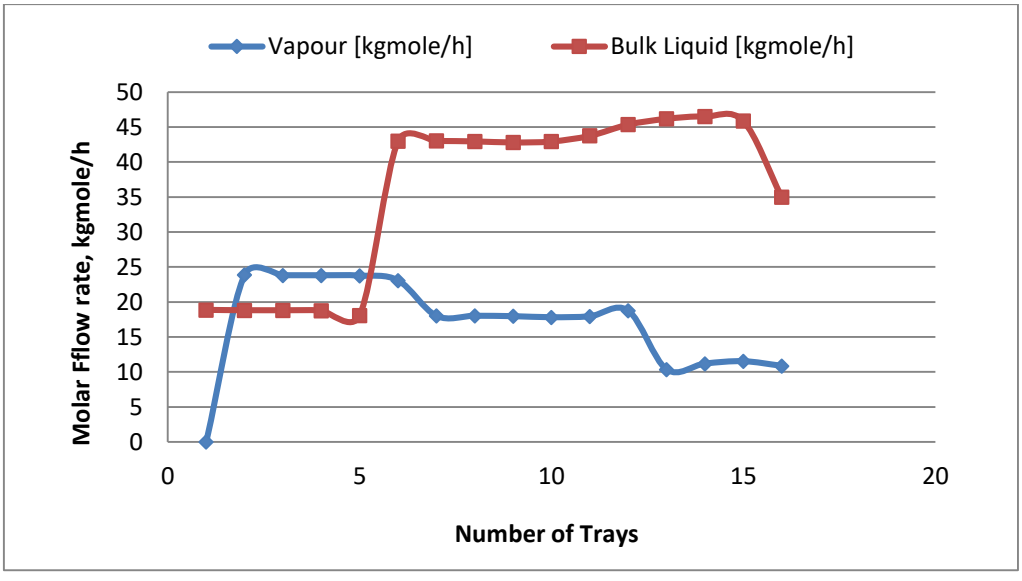


Figure 3. Change in the molar flow rate of vapor and liquid versus the Number of Trays in the first column T-100

Pressure (in kPa) is shown as a function of experimental phases (or time/phase) in Figure 4. We note that the pressure begins at about 12 kPa and then increases in an almost linear manner to about 15–15.2 kPa in the next phases. This escalating trend means that the system is moving towards a linear increase of pressure, with no dramatic jumps, or in other words, a kind of relative stability of the developing stable operating conditions. The steady rise

in pressure may also be due to the temperature rise or vapor accumulation in the system, which is usual in heat and mass transfer operations like distillation or in separation operations like crystallization. In short, the behavior of the curve indicates a gradual increase in pressure in the process, where the pressure variation is tempered and considered gradual. The simulation results generated via Aspen HYSYS demonstrate a progressive pressure increase from 12 kPa at the column top to 15 kPa at the sump, indicating a total pressure drop of 3 kPa across the 16 stages. This linear profile exhibits a high degree of concordance with established experimental benchmarks for tray hydraulics, where the pressure gradient is fundamentally governed by vapor-liquid resistance and static head [28].

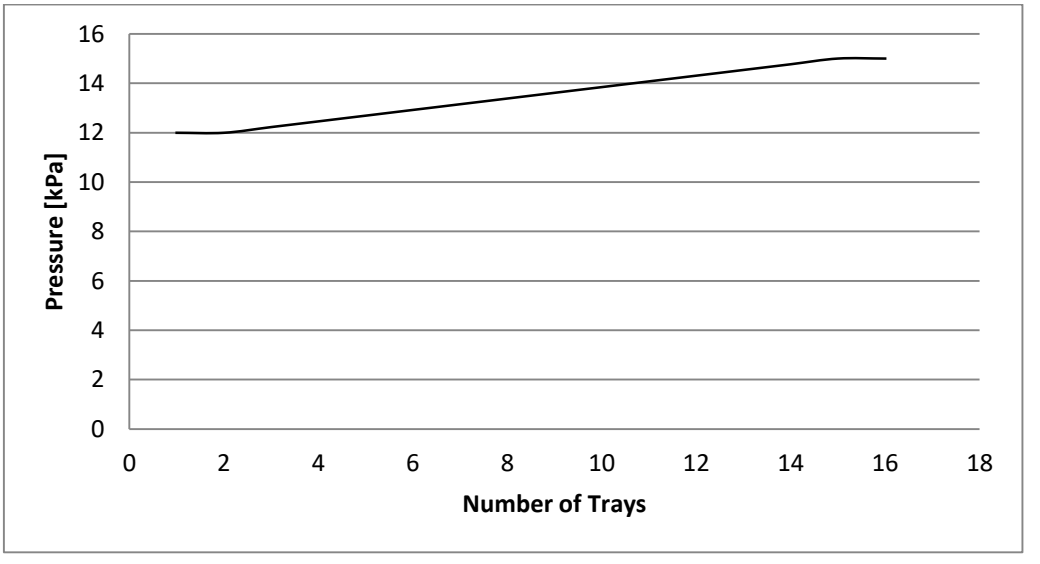


Figure 4. Change in the Pressure in the column versus the Number of Trays in the first column T-100

The temperature profile along the stages of the distillation column is shown in the Figure 5. The result is that the temperature steadily rises during the distillation. 1–5) Temperature is almost constant at about 40 °C (the most volatile components of the mixture are evaporated). This fairly constant temperature indicates that compounds with low boiling points were dominant in the vapor phase. From stage 6 to 14, the temperature rises gradually from about 45 °Cup to almost 80 °C as the distillation is also carried out. This slow increase is indicative of a gradual removal of the more volatile constituents and

introduction of compounds with higher boiling points to the evaporation. Increasing temperature corresponds to changes in vapor–liquid equilibrium as vapor composition becomes dominated by heavier components. In the end of distillation (15–16), the increasing temperature reached 100 °C. This represents a big increase and implies that most of the lighter fractions have by then been removed, and that only fractions with somewhat higher boiling points remain in the material. This kind of behavior is typical in fractional distillation, where components are separated based on the difference in their volatilities, and the temperature curve gives an important clue to the composition variation that is happening inside the column. In general, the temperature trend validates the incremental separation of the components of the mixture as the boiling point difference increases, which is an essential concept of distillation and the general principle of the process itself. The temperature profile rises monotonically from almost 40 °C at the top to 110 °C at the bottom, which corresponds to a temperature increase of around 70 °C over 18 trays. Such a behavior is in line with experimental observations found in the literature, where the higher temperature at the lower stages was ascribed to the enrichment of heavier components with higher boiling points [29]. Experimentally verified like trends of increasing temperature profiles on sieve tray columns, good agreement between plant and HYSYS simulations [30]. This temperature profile indicates that the simulated column is performing as expected for a multi-component separation with moderate relative volatility.

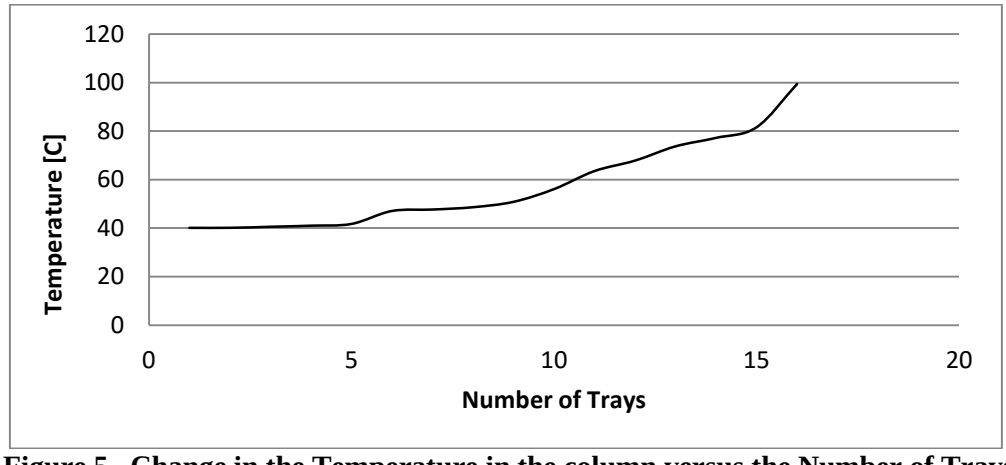


Figure 5. Change in the Temperature in the column versus the Number of Trays in the first column T-100

Figure 6 illustrates the light liquid mole fraction change in various stages of the isotropic separation column. Toluene is the major component of the initial stages, and the mole fraction is extremely close to unity, indicating that toluene is abundant in the upper portion of the column. On the other hand, the aromatic concentration (toluene) decreases dramatically along the column top. The solvent (n-methyl pyrrolidone, NMP) concentration gradually increases to become a major component in the bottom stages. This behavior indicates that the solvent (toluene) is extremely selectively to extract toluene from the column, thus transferring to a phase with a greater amount of solvent and hydrocarbon compounds. However, the n-heptane concentration in the liquid phase in the column is negligible because n-heptane has a strong tendency to stay in the light phase and is removed as the overhead product. These results suggest that the isotropic separation may be applied to separate, for instance, components that significantly differ in their solubility in the solvent. The separation simulation for the n-heptane/toluene/NMP system shows that the results are in good agreement with experimentally established vapor-liquid equilibrium for the n-heptane–toluene mixture and experimentally based extractive distillation using NMP as a selective solvent. This good agreement is also an indication of the accuracy of the simulation and confirms the effectiveness of NMP in extracting toluene from the hydrocarbon [31],[32],[33].

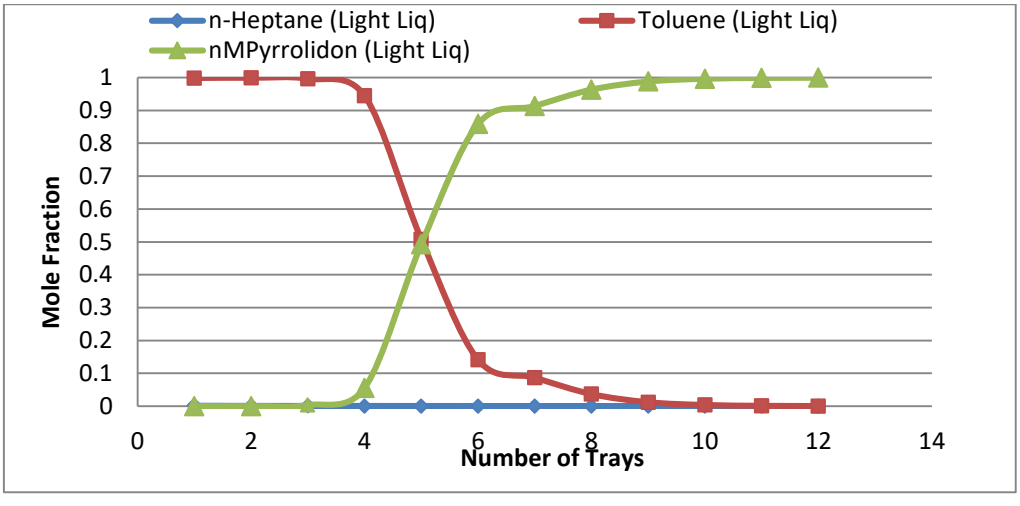


Figure 6. Change in the mole fraction of Toluene, n-Heptane, and NMP versus the Number of Trays in the second column T-101

Conclusion

The simulation carried out with Aspen Hysys Software shows that extractive distillation is an excellent technique for the separation of a toluene / normal heptane mixture that is an azeotrope-like mixture and has quasi-isotropic behavior and therefore is difficult to separate by ordinary distillation. The relative volatility of the components was greatly increased with the N-methyl-2-pyrrolidone as a selective solvent, and they could be separated easily. The developed process includes two distillation columns, one with fourteen theoretical stages and the other with ten. The result showed that a mixture of 50% toluene and 50% normal heptane as a feed was processed at about 962 kg/h with a circulating solvent flow of about 2947 kg/h by the toluene recovery under given conditions. The achievable purity and recovery of the solvent are also simulated, and the feasibility of obtaining high-purity toluene (≈99.9%) at a recovery rate of 460 kg/h is demonstrated. These findings suggest that the NMP-based extractive distillation would have a superior separation capability with a lower solvent-to-feed ratio and better separation performance, and these are also comparable to the best available results for the separation of aromatic compared to aliphatic hydrocarbons using petroleum solvent for refining and extracting processes.

Recommendations:

1. Some further optimization of operating conditions (solvent/feedstock ratio, reflux ratio, number of theoretical stages) is still possible to decrease energy consumption and increase the efficiency of the overall process.
2. In the coming, an economic analysis of the extractive distillation process should be considered to evaluate the investment and operating costs for its application on an industrial scale.
3. Investigation of other selective solvents with lower energy demands or with higher selectivity may lead to better separation performance.
4. Dynamic simulation and process control study in Aspen Hysys is suggested to verify dynamic stable operation over feedstock and operating condition changes.
5. Laboratory or pilot-scale experiments are recommended to validate the simulation findings and to investigate the real process performance.

References

1. Dong, Y., Xu, F., Xia, Y., & Yang, Q. (2024). Efficient separation of methanol, acetonitrile, and benzene ternary azeotropic mixture using ionic liquid in extractive distillation. *Separation and Purification Technology*. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131018.
2. Tian, X., Wang, R., Wang, H., Li, C., & Liu, J. (2025). Energy-saving extractive distillation processes design and optimization for the separation of ethyl acetate and n-heptane azeotrope. *Fuel*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132974.
3. Pan, J., Ding, Y., Li, J., Xie, L., Xu, Z., Wu, H., & Ye, Q. (2024). Economic, entropy generation and environmental analysis of separation of high-concentration azeotropic mixtures by an innovative extractive distillation configuration based on multi-objective optimization. *Separation and Purification Technology*. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126729.
4. Czarnecki, N., Owens, S., & Eldridge, R. (2023). Extractive Dividing Wall Column for Separating Azeotropic Systems: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00302.
5. Hu, Y., Li, F., Wei, S., Jin, S., & Shen, W. (2020). Design and optimization of the efficient extractive distillation process for separating the binary azeotropic mixture methanol-acetone based on the quantum chemistry and conceptual design. *Separation and Purification Technology*, 242, 116829. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116829.
6. Wang, C., Zhuang, Y., Qin, Y., Dong, Y., Liu, L., Zhang, L., & Du, J. (2021). Optimization and eco-efficiency analysis of extractive distillation processes with different solvents for separating the ternary mixture embedding two azeotropes. *Separation and Purification Technology*, 269, 118763. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118763.
7. Yang, A., Su, Y., Sun, S., Shen, W., Bai, M., & Ren, J. (2021). Towards sustainable separation of the ternary azeotropic mixture based on the intensified reactive-extractive distillation configurations and multi-objective particle swarm optimization. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130116.
8. Zhong, J., Cheng, H., Dai, Y., Jiao, Y., Wang, K., Xin, L., Zhang, Y., Zhu, Z., Cui, P., Lu, Y., & Wang, Y. (2023). Design and Multiple Performance Evaluation of Green Sustainable Process for Azeotropes Separation via Extractive Distillation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05675.
9. Yu B., Huang R., Zhong X., & Lee M., & Chien I. Energy-Efficient Extraction–Distillation Process for Separating Diluted Acetonitrile–Water Mixture: Rigorous

Design with Experimental Verification from Ternary Liquid–Liquid Equilibrium Data. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2017; 56(51): 15112-15121.

10. Luyben W. Comparison of extractive distillation and pressure-swing distillation for acetone/chloroform separation. Computers & Chemical Engineering. 2013; 50: 1-7.
11. Yu J., Wang S., Huang K., Yuan Y., Chen H., & Shi L. Improving the Performance of Extractive Dividing-Wall Columns with Intermediate Heating. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2015; 54(10): 2709-2723.
12. Luyben W., & Chien I. Design and Control of Distillation Systems for Separating Azeotropes: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
13. ChemicalSafetyFacts.org [Internet]. Virginia: American Chemical Council; [2019]. Available from: https://www.chemicalsafetyfacts.org/toluene/
14. National Center for Biotechnology Information (2026). PubChem Compound Summary for CID 1140, Toluene. Retrieved May 8, 2026 from.https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Toluene
15. National Center for Biotechnology Information (2026). PubChem Compound Summary for CID 8900, Heptane. Retrieved May 8, 2026 from https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Heptane
16. Hashmi, S. A. M. (2021). Comparative and economic analysis of conventional and extractive distillation to separate a mixture of heptane–toluene using Aspen Hysys. *Available at SSRN 3874836*.
17. J. M. Smith and H. C. Van Ness, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 4th ed. McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITION, ch. 14, pp, 493
18. J. P. Sun, L. M. Zhang, and H. Y. Wang, "Comparative Study on the Selectivity of Sulfolane and N-Methyl-2-pyrrolidone in Toluene Recovery Units," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 61, no. 14, pp. 5120-5132, Apr. 2022.
19. R. M. Miller and S. T. Johnson, "Impact of Solvent Viscosity on Pressure Drop and Hydraulic Capacity in Extraction Columns," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 284, Art. no. 119502, Jan. 2024.
20. G. W. Meindersma and A. B. de Haan, "Selection of Solvents for the Extraction of Aromatics from Aliphatic Fractions," in *Liquid-Liquid Extraction Equipment*, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2023, pp. 45-68.
21. Chevron Phillips Chemical Company, "Sulfolane: Physical Properties and Industrial Handling Guidelines," Technical Data Sheet, 2024.
22. L. C. Klein and D. R. Woods, "Thermal Stability and Decomposition Kinetics of Dimethyl Sulfoxide (DMSO) in Industrial Applications," *Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 178, pp. 106-115, Mar. 2023.

23. H.Yu, C.Geng, X.Li, X.Wu, S.Tian, Z.Zhou, Z.Ren, Can. J. Chem. Eng.2023, 101(10), 5967. https://doi.org/10.1002/cjce.24871
24. R. K. Sinnott and G. Towler, *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, 6th ed. Elsevier, 2020.
25. H. Z. Kister, *Distillation Operation*, 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2022.
26. W. L. Luyben, *Distillation Design and Control Using Aspen Simulation*, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019.
27. Saha, M., Rawat, B. S., Khanna, M. K., & Nautiyal, B. R. (1998). Liquid− liquid equilibrium studies on toluene+ heptane+ solvent. *Journal of Chemical & Engineering Data*, *43*(3), 422-426.
28. Kister, H. (2025). References. In Distillation Diagnostics, H. Kister (Ed.). https://doi.org/10.1002/9781119640165.refs
29. Kim, B. C., & Kim, Y. H. (2013). Experimental Distillation of Ethanol-Propanol Mixture Using a Horizontal Column. Korean chemical engineering research, 51.
30. Rahimi, R., Rahimi, M. R., & Zivdar, M. (2006). Efficiencies of sieve tray distillation columns by CFD simulation. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, *29*(3), 326-335.
31. Zhao, Y., Kang, H., Tu, Y., Li, Q., Du, C., & Ren, Z. (2025). Vapor–Liquid Equilibrium of Toluene/Heptane and Benzene/Cyclohexane Systems with Biobased Cyrene: Experimental Data and Thermodynamic Modeling. Journal of Chemical & Engineering Data, 70(9), 3690-3700.
32. Hashmi, S. A. M. (2021). Comparative and economic analysis of conventional and extractive distillation to separate a mixture of heptane–toluene using Aspen Hysys. Available at SSRN 3874836.
33. Navarro, P., Ayuso, M., Palma, A. M., Larriba, M., Delgado-Mellado, N., Garcia, J., ... & Carvalho, P. J. (2018). Toluene/n-heptane separation by extractive distillation with tricyanomethanide-based ionic liquids: experimental and CPA EoS modeling. Industrial & Engineering Chemistry Research, 57(42), 14242-14253.

Gharyan Journal of Technology (2026), 1(12), 25-50 مجلة غريان للتقنية
Issued by: Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان
www.gjt.scitech-gh.edu.ly

A Formal Architecture for Emergent Requirements in AI-Amplified Software Engineering

Abdelaziz O Abdelsalam
Department of Information Technology, Faculty of Humanitarian and Applied Science, University of Benghazi, Libya.

Received:16/05/2026 Accepted: 18/06/2029 Published: 31/07/2026

ملخص

يُحدث دمج نماذج التعلم المنطقية (LLMs) في هندسة المتطلبات تحولًا جذريًا في كيفية استخلاص المتطلبات وتحليلها وتوثيقها، مما يُقلل وقت إنجاز المهام بنسبة 30-40% في جميع أنشطة هندسة المتطلبات .مع ذلك، لا توجد حتى الآن آلية منهجية تُنظم المتطلبات الناشئة عن التعاون بين الإنسان والذكاء الاصطناعي .يُقدم هذا البحث إطار عمل FAIRE (البنية الرسمية لإضفاء الطابع المؤسسي على المتطلبات الناشئة وتنظيمها)، وهو بنية رياضية مُؤَسَّسة من أربع طبقات للكشف عن المتطلبات الناشئة وقياسها وإدارتها وتتبعها في عمليات التطوير المُعززة بالذكاء الاصطناعي .يتبع البحث منهجية علم التصميم، حيث يمر بمراحل متعددة تشمل مراجعة منهجية للأدبيات، وتحديد المواصفات الرسمية باستخدام آلات الحالة والمنطق الزمني، وتنفيذ النماذج الأولية عبر واجهات برمجة تطبيقات نماذج التعلم المنطقية المعاصرة(GPT-4 ، Claude، LLaMA، Gemini)، والتقييم التجريبي من خلال تجارب مضبوطة (عددها 41 تجربة) ودراسات حالة طولية.

تُظهر النتائج أن منهجية FAIRE تُقلل من ظهور المتطلبات غير الموثقة بنسبة 79.7% (من 15.8 إلى 3.2 حدث لكل مشروع؛($p < 0.001$ ، وتُحسّن اكتمال التتبع من 42.1% إلى 89.3% ($p < 0.001$)، وتحقق نسبة استدعاء تبلغ 94.2% في رصد السلوكيات التي يُدخلها الذكاء الاصطناعي والتي تتطلب مراجعة أصحاب المصلحة .يُعدّ الجهد الإضافي متواضعًا (8.7 دقائق لكل جلسة مدتها 4 ساعات)، وتحظى قيمة الحوكمة بتقييم عالٍ .(SUS = 74.2) بحسب علمنا، تُعدّ FAIRE من أوائل البنى الرسمية لإدارة المتطلبات الناشئة في بيئات مُعززة بالذكاء الاصطناعي، حيث تُعالج الثغرات في قابلية التكرار والتفسير والمساءلة .وتُوفر للمؤسسات آلية عملية للاستفادة من الإمكانات التوليدية للذكاء الاصطناعي مع الحفاظ على الانضباط الهندسي.

الكلمات المفتاحية: هندسة المتطلبات • التعاون بين الإنسان والذكاء الاصطناعي • المتطلبات الناشئة • نماذج اللغة الكبيرة • حوكمة البرمجيات • الأساليب الرسمية

Abstract

Tegrated LLMs into requirements engineering shift how requirements are elicited, analyzed, and documented, cutting task completion time by 30–40% across RE activities. However, no systematic mechanism yet governs requirements emerging from human–AI collaboration. This research introduces the FAIRE Framework (Formal Architecture for Institutionalizing and Regulating Emergence), a mathematically grounded, four-layer architecture for

detecting, measuring, governing, and tracing emergent requirements in AI-amplified development.

The research follows a design science methodology, progressing through a systematic literature review, formal specification using state machines and temporal logic, prototype implementation across contemporary LLM APIs (GPT-4, Claude, LLaMA, Gemini), and empirical evaluation through controlled experiments (N = 41) and longitudinal case studies.

Results show FAIRE reduces undocumented requirement emergence by 79.7% (15.8 to 3.2 events per project; $p < 0.001$), improves traceability completeness from 42.1% to 89.3% ($p < 0.001$), and achieves 94.2% recall in detecting AI-introduced behaviors requiring stakeholder review. Overhead is modest (8.7 minutes per 4-hour session), and governance value is rated highly (SUS = 74.2).

To the best of our knowledge, FAIRE is among the first formal architectures for governing emergent requirements in AI-amplified environments, addressing gaps in reproducibility, interpretability, and accountability. It offers organizations a practical mechanism for leveraging AI's generative potential while maintaining engineering discipline.

Keywords: Requirements Engineering · Human-AI Collaboration · Emergent Requirements · Large Language Models · Software Governance · Formal Methods

Introduction

Every software project begins with a conversation. In that conversation, requirements emerge through negotiation and refinement. Requirements Engineering (RE) has long provided structure to this inherently iterative process.

Large language models (LLMs) have shifted artificial intelligence from peripheral support to an active agent in the RE lifecycle. AI now generates requirements, suggests refinements, and identifies gaps. It also produces artifacts that are often indistinguishable from those crafted by expert analysts. AI assistance reduces task completion time by 30–40% across RE activities (Bluemelhuber & Junker, 2025). Moreover, 58.2% of practitioners already integrate AI into RE workflows, with 69.1% reporting positive impact (Murali Rani et al., 2025).

Yet a fundamental problem remains unaddressed: there is no systematic mechanism to govern what emerges from human–AI collaboration. Human-authored requirements can be traced to stakeholder interviews, business

objectives, or regulatory constraints, however imperfectly. AI-generated requirements raise a harder question: Did this requirement come from training data? Is it a recognized pattern? Or is it a hallucination that merely sounded plausible?

The literature documents these concerns. Cheng et al. (2025) found that reproducibility (66.8%), hallucinations (63.4%), and interpretability (57.1%) form an interlinked triad. This triad undermines trust in AI-amplified RE. Norheim et al. (2024) identified limited requirements-specific data, inconsistent annotation, and poorly defined use cases as adoption barriers. Furthermore, Peng and Horkoff (2025) revealed a critical integration gap. RE takes a prescriptive approach—it specifies required data characteristics. In contrast, AI Engineering takes a descriptive, data-processing focus.

These challenges are symptoms of a deeper problem: we lack a formal architecture for institutionalizing and regulating emergence. In AI-amplified environments like GitHub Copilot and ChatGPT, a developer prompts an AI, receives generated requirements, and accepts or modifies them. Over iterations, requirements become institutionalized through acceptance rather than specification. Which requirements are "real"? Which are "emergent"? When implementation fails, who is accountable?

Classical RE frameworks rest on three assumptions. First, requirements precede design. Second, implementation operationalizes predefined intent. Third, traceability links requirements forward to artifacts. AI-amplified development challenges all three assumptions. Requirements are increasingly discovered after implementation. They are implied by generated artifacts. They become institutionalized through acceptance. Current RE theory lacks: (1) a formal model for AI-induced requirement emergence, (2) a state-based lifecycle that incorporates AI suggestion as a first-class trigger, and (3) a governance mechanism to constrain emergent requirement drift.

This gap manifests as three theoretical tensions: temporal (Requirements → Implementation versus Implementation → Requirement Recognition), epistemic (intent from stakeholders versus intent from AI artifacts), and governance (forward-directed traceability versus bidirectional evolutionary traceability).

This research proposes **FAIRE**—a Formal Architecture for Institutionalizing and Regulating Emergence—to define, model, and manage emergent requirements arising from AI-amplified development processes

2. Literature Review and Theoretical Framework

2.1 The Paradigm Shift: From Traditional RE to AI-Amplified Practices

Requirements Engineering remains fundamental yet labour-intensive and error-prone. The Standish Group's CHAOS Report (2020) documented that only 31% of software projects complete within allocated time and budget. Requirement-related issues account for approximately 37% of project failures (Project Management Institute, 2014). The emergence of LLMs has catalysed a paradigm shift. Cheng et al. (2025) reviewed 238 studies published between 2019 and 2025. They observed exponential growth in GenAI-for-RE research after ChatGPT's release in late 2022. Requirements analysis (30.0%) and elicitation (22.1%) received the most attention. In contrast, requirements management (6.8%) remained comparatively underexplored.

Convergent research confirms that AI achieves optimal effectiveness as a collaborative partner rather than a human replacement. Murali Rani et al. (2025) surveyed 55 software practitioners. They found that Human–AI Collaboration (HAIC) dominates practice. It accounts for 54.4% of RE techniques across elicitation, analysis, specification, and validation. Full AI automation remains minimal at only 5.4%. This aligns with Parasuraman et al.'s (2000) levels-of-automation theory, which argues that intermediate automation—leveraging AI while preserving human oversight—typically yields optimal outcomes. Hamza et al. (2024) and Borg (2024) confirm that AI accelerates routine tasks while human guidance remains essential for domain-specific and safety-critical work. Yet existing studies lack formal frameworks that define the interaction between human decisions and AI-generated artifacts.

2.2 Data-Centric Challenges, Prompt Engineering, and Governance Gaps

Peng and Horkoff (2025) conducted a systematic review of 227 primary studies. They developed a taxonomy of 28 data-related challenges for AI systems. Their review revealed a significant integration gap. RE's approach tends toward prescription (specifying required data characteristics). AI Engineering's approach tends toward description (processing data without connecting back to requirements). Norheim et al. (2024) identified limited requirements-specific data, inconsistent annotation, and inadequately defined RE use cases as primary adoption barriers.

An emerging perspective frames prompt engineering as a novel form of requirements specification for AI systems. Vogelsang (2024) argues that as LLMs become integral to software development, crafting effective prompts

becomes as fundamental as traditional requirements writing. Zadenoori et al. (2025) reviewed 74 studies. They found that prompt engineering strategies predominantly use simple approaches. Zero-shot (38%) and Few-shot (29%) are the most common. In contrast, Retrieval-Augmented Generation (6%) and Interactive prompting (5%) remain underexplored. Furthermore, prompt selection is frequently undocumented (39% not specified). Existing work treats prompts as ad hoc implementation details rather than formal specifications subject to governance.

The probabilistic nature of LLMs introduces fundamental challenges around unanticipated behaviors and requirements emergence. Cheng et al. (2025) identified reproducibility, hallucinations, and interpretability as the most prevalent, tightly interlinked challenges affecting trust and consistency. Jin et al. (2025) proposed a conceptual framework for requirements engineering of pretrained-model-enabled systems. They identified six open challenges, including a critical governance gap: prompts, model checkpoints, and fine-tuning datasets mutate faster than traditional code bases. Yet they lack the versioning, traceability, and audit mechanisms that code repositories provide—a vacuum that undermines reliability and compliance.

2.3 Empirical Evidence and Traceability Challenges

Bluemelhuber and Junker (2025) conducted an online experiment with 41 RE professionals. They demonstrated that GenAI assistance significantly reduces task completion time across all complexity levels, with improvements ranging from 80.6 to 110.9 seconds for simple versus complex tasks. Quality improvements, however, were significant only for simple tasks (0.7-point improvement on a 7-point scale) and not for complex tasks ($p = .090$). Ellsel and Stark (2025) found that GPT-4o closely approximated human performance in requirement quality assessment but required manual corrections for machine-readable format conversion. Marques et al. (2024), synthesizing 22 studies, underscored that AI should complement rather than replace human expertise.

Traceability research faces persistent challenges. Ortiz Couder et al. (2024) found that GPT-4 performed nearly as well as students in tracing requirements to interview transcripts (365 vs. 399 out of 888 requirements) but fell short with prototypes. Lubos et al. (2024) showed that structured prompting improves assessment consistency, though non-functional requirements remain difficult to evaluate. Crucially, traceability research focuses on linking requirements to artifacts rather than tracing requirement emergence through human–AI interaction. No existing framework provides formal traceability for how AI-generated artifacts become institutionalized as requirements.

The gap is clear: while AI shows undeniable potential, no formal architecture exists for institutionalizing emergent requirements, constraining drift, or ensuring accountability. The FAIRE Framework addresses these gaps by providing a mathematically grounded, four-layer architecture. It formalizes human–AI interaction, enables novelty detection, governs requirement state transitions, and maintains traceability.

2.4 Positioning FAIRE Relative to Adjacent Framework Categories

The contributions above raise a natural question: how does FAIRE differ from existing AI governance frameworks, AI-oriented RE frameworks, and general traceability frameworks? To provide a concrete answer, we compare FAIRE against representative frameworks from each category:

AI Governance: The NIST AI Risk Management Framework (AI RMF 1.0) (NIST, 2023) provides comprehensive, high-level organizational guidance for managing risks associated with AI systems. However, it does not model individual requirement lifecycles or formalize human–AI authority at the artifact level.

AI-Oriented Requirements Engineering: The systematic mapping study by Habiba et al. (2024) provides a comprehensive overview of practices and challenges in RE for AI-based systems (RE4AI). It identifies key practices but does not propose a formal state machine for governing emergent requirements or specify enforceable rules for human-vs-AI authority over state changes.

Traceability Frameworks: The work by Guo et al. (2024) defines traceability as "the ability to describe and follow the life of a requirement, in both forward and backward directions." However, their focus is on applying NLP techniques to automate trace link recovery, rather than providing a formal governance model that traces requirement emergence through human–AI interaction.

Table 1 situates FAIRE against these representative frameworks along five dimensions central to the governance gap identified in Section 2.2.

Table 1: Positioning FAIRE against representative frameworks across five governance dimensions.

Governance Dimension	NIST AI RMF 1.0 (Governance)	Habiba et al. (AI-RE)	Guo et al. (Traceability)	FAIRE
Formal requirement lifecycle / state model	No – organizational policy level	Partial – process guidance, no state machine	No – assumes requirements pre-exist	Yes – six-state machine (Def. 5–6)

Explicit human-vs-AI authority over transitions	Partial – role policies, not enforceable	No	No	Yes – governance invariants (Def. 7)
Quantitative novelty / emergence detection	No	No – emergence largely undiscussed	No	Yes – similarity-based ν function (§3.3)
Bidirectional prompt-to-artifact traceability	No – audit at model level, not requirement level	Partial – links artifacts, not prompts/decisions	Yes, but forward-directed only	Yes – traceability graph G (§3.3, Layer 4)
Empirical validation with practitioners on emergence	Rare	Rare	Not applicable	Yes – controlled experiment, case study, survey (§4–5)

As Table 1 indicates, the NIST AI RMF operates at the organizational level and does not model individual requirement lifecycles. Habiba et al.'s work identifies practices and challenges in RE4AI but does not formalize emergence or enforce human authority over state changes. Guo et al.'s work focuses on NLP techniques for traceability and, while defining bidirectional traceability conceptually, does not provide a governance model for tracing requirement emergence through human–AI interaction. FAIRE distinguishes itself by combining a formally specified lifecycle, enforceable governance invariants, quantitative novelty detection, and bidirectional traceability within a single architecture, all validated empirically with practitioners.

3. The FAIRE Framework: Formal Architecture

3.1 Foundational Definitions

We establish precise mathematical definitions for the core concepts underlying the FAIRE Framework.

Definition 1 (Requirement): A requirement r is a tuple r = (id, content, type, source, timestamp, state) where:

- $id \in I$ is a unique identifier
- $content \in C$ is the requirement text
- $type \in \{functional, non-functional, constraint, assumption\}$
- $source \in S$ indicates origin (human, AI, hybrid)
- $timestamp \in T$ marks creation/modification time

- $state \in Q$ is the current lifecycle state

Definition 2 (Requirement Set): A requirement set R = {r_1, r_2, ..., r_n} is a finite set of requirements representing the current specification baseline.

Definition 3 (AI-Suggested Requirement): A requirement *r* is AI-suggested if it satisfies:

AI-Suggested(r) $\Leftrightarrow$ *(*r** $\notin R_{t-1}$*)* $\wedge$ *(*r** $\in R_t$*)* $\wedge$ *(source(r)* $\in$ *{AI, hybrid})*

Definition 4 (Emergent Requirement): A requirement *r* is emergent if it has been accepted by a human reviewer after being flagged as novel and has therefore transitioned to the EMERGENT state (see Definition 6). Formally:

Emergent(r) $\Leftrightarrow$ EMERGENT $\in$ history(*r*)

This formulation preserves the emergent classification across subsequent lifecycle transitions: a requirement that progresses from EMERGENT to INSTITUTIONALIZED retains its emergent status. Emergence is thus a historically persistent, human-validated property—not merely the current lifecycle state.

Definition 5 (Requirement Drift): The drift between requirement sets R_a and R_β is defined as:

$\delta(R_a, R_\beta) = |R_a \triangle R_\beta| / |R_a \cup R_\beta|$

where $\triangle$ denotes symmetric difference. This normalized measure ranges from 0 (identical sets) to 1 (completely disjoint sets).

3.2 Requirement State Machine

The FAIRE Framework introduces a formal state machine governing requirement lifecycle in AI-amplified environments.

Definition 6 (Requirement States): Q = {SUGGESTED, CANDIDATE, EMERGENT, INSTITUTIONALIZED, DEPRECATED, REJECTED}

Figure 1. shows requirement lifecycle states and transitions *The figure depicts SUGGESTED → CANDIDATE → EMERGENT → INSTITUTIONALIZED, with rejection edges from SUGGESTED and CANDIDATE to REJECTED, and deprecation from INSTITUTIONALIZED to DEPRECATED.*

Definition 7 (State Transition Function): τ: $Q \times E \times A \rightarrow Q$, where E is the set of possible events and A is the set of agents (human or AI) authorized to trigger transitions.

The complete transition function is specified as:

$\tau(q, e, a)$ =

- CANDIDATE if q = SUGGESTED $\wedge$ e = review $\wedge$ type(a) = human
- EMERGENT if q = CANDIDATE $\wedge$ e = accept $\wedge$ type(a) = human
- INSTITUTIONALIZED if q = EMERGENT $\wedge$ e = formalize $\wedge$ type(a) = human

- DEPRECATED if q = INSTITUTIONALIZED ∧ e = deprecate ∧ type(a) = human
- REJECTED if q ∈ {SUGGESTED, CANDIDATE} ∧ e = reject ∧ type(a) = human
- q otherwise

Definition 8 (Governance Invariants): The following invariants must hold for all valid requirement traces:

1. **No Unauthorized Transitions:** ∀*r*, ∀*t*: type(a_t) = AI ⇒ τ(q_t, e_t, a_t) = q_t (AI agents cannot change requirement states)
2. **No Direct Institutionalization:** ∀*r*: INSTITUTIONALIZED ∈ history(*r*) ⇒ EMERGENT ∈ history(*r*)
3. **Traceability Completeness:** ∀*r*: INSTITUTIONALIZED ∈ history(*r*) ⇒ ∃ trace_path(*r*, origin)

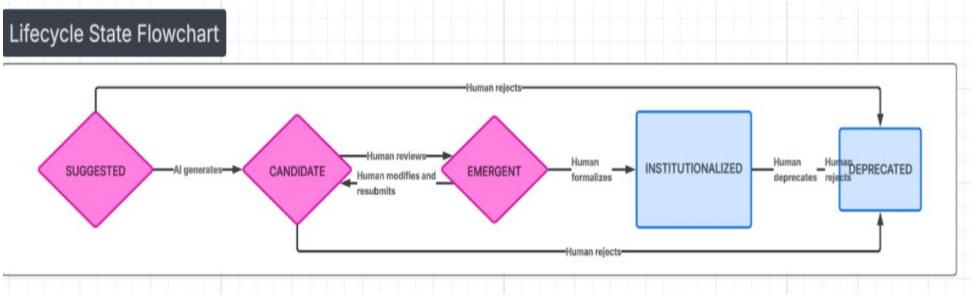


Figure 1. Requirement lifecycle states and transitions.

3.3 The Four-Layer Architecture

The FAIRE Framework comprises four integrated layers, each addressing specific governance concerns identified in the literature.

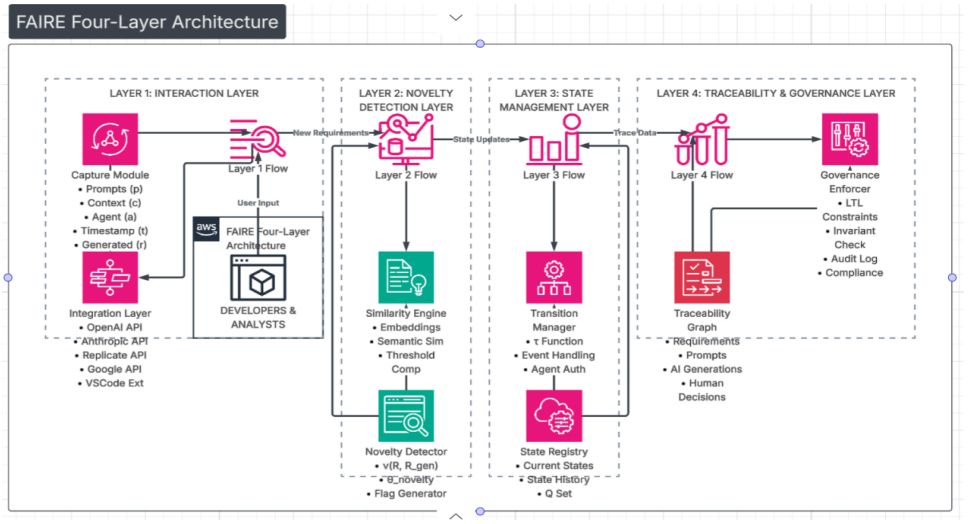


Figure 2. Framework components and data flow.

Layer 1: Interaction Layer captures and formalizes human-AI interactions that may generate emergent requirements, each represented as i = (p, c, a, t, r_gen), where *p* is the prompt, *c* is the context, *a* is the agent, *t* is the timestamp, and r_gen is the set of generated requirements. The interaction log L = $\{i_1, i_2, ..., i_m\}$ maintains an immutable record for audit and traceability.

Layer 2: Novelty Detection Layer identifies when AI-generated content introduces behaviors not present in existing requirement sets, via the novelty function $\nu: P(R) \times P(R_{gen}) \rightarrow [0,1]$, defined as $\nu(R, R_{gen}) = 1 - max_{r \in R}\, min_{r_g \in R_gen}\, sim(r, r_g)$, where sim is a semantic similarity function implemented via sentence embeddings. A requirement r_g is flagged as novel if $min_{r \in R}\, sim(r, r_g) < \theta_{novelty}$, where $\theta_{novelty}$ is a configurable threshold (default 0.65, based on empirical calibration).

Layer 3: State Management Layer implements the requirement state machine, maintaining current state for each requirement and enforcing transition rules via the state registry $\Sigma: I \rightarrow Q$, which maps requirement identifiers to current states; the transition log $T_log = \{(r, q_{from}, q_{to}, e, a, t)\}$ records all transitions for audit and analysis.

Layer 4: maintains comprehensive traceability links and enforces governance constraints through the traceability graph $G = (V, E)$. The graph is directed and acyclic, with vertices that include requirements, prompts, AI generations, human decisions, and artifacts. Its edges represent traceability relationships such as *generates*, *refines*, *accepts*, *rejects*, and *implements*. While the underlying graph is acyclic to preserve provenance integrity, we support bidirectional

traceability at the conceptual level through graph traversal queries. Specifically, bidirectionality refers to traversal capability over directed edges—forward (from originating prompt to institutionalized requirement) and backward (from a requirement to its originating prompt and human decision)—and not to the existence of reciprocal edges, which would introduce cycles and undermine provenance integrity. Governance constraints are specified in temporal logic:

1. **Stability** — once institutionalized, requirements remain so unless explicitly deprecated.
2. **Accountability** — every institutionalized requirement must trace to a human decision within *k* steps.
3. **Bounded Drift** — requirement set drift between consecutive states must not exceed threshold θ_drift.

3.4 Formal Properties

The FAIRE Framework satisfies several desirable formal properties. We state them with appropriate fairness assumptions.

Theorem 1 (Termination under Fairness): Assuming that every non-terminal requirement eventually receives a valid human decision (i.e., ∀*r*: state(*r*) ∉ {INSTITUTIONALIZED, DEPRECATED, REJECTED} ⇒ ⋄ Decision(*r*)), every requirement reaches a terminal state (INSTITUTIONALIZED, DEPRECATED, or REJECTED) in finite time.

Theorem 2 (Traceability Completeness): For every institutionalized requirement, there exists a complete trace path to its origin interaction.

Theorem 3 (Governance Enforcement): All governance invariants are preserved under all valid state transitions.

Proof (Theorems 1–3). We establish each property by construction over the specification of τ.

(i) **No Unauthorized Transitions:** Every branch of τ(q, e, a) that returns a state other than q is guarded by type(a) = human. The default branch "q otherwise" applies whenever this guard fails, including for all a with type(a) = AI. Thus, τ is the identity on q whenever type(a) = AI, satisfying Invariant 1.

(ii) **No Direct Institutionalization:** The only rule that produces INSTITUTIONALIZED requires the precondition q = EMERGENT. Therefore, any trace reaching INSTITUTIONALIZED must pass through EMERGENT immediately beforehand. By induction over the trace history, EMERGENT ∈ history(r) whenever INSTITUTIONALIZED ∈ history(r), satisfying Invariant 2.

(iii) **Traceability Completeness:** Layer 1 logs every requirement-generating interaction in L. Layer 4 adds a graph edge for every transition in T_log. Since τ reaches INSTITUTIONALIZED only via the path SUGGESTED →

CANDIDATE → EMERGENT → INSTITUTIONALIZED, and each edge on this path is logged at the moment of transition, a directed path in G back to the originating interaction always exists. This satisfies Invariant 3 and proves Theorem 2.

(iv) **Termination:** Given the fairness assumption that every non-terminal requirement eventually receives a valid human decision, every such decision triggers a transition to a new state in Q. No state is revisited on any valid path, since the non-terminal transition graph is acyclic. Since the set of non-terminal states is finite, every path must eventually terminate. The fairness assumption ensures the path does not halt in a non-terminal state indefinitely. Therefore, every requirement eventually reaches INSTITUTIONALIZED, DEPRECATED, or REJECTED. This proves Theorem 1.

(v) **Governance Enforcement:** Invariants 1–3 are preserved by construction as shown above; hence Theorem 3 holds. □

Corollary 1.1 (Bounded Transitions): Under the fairness assumption, the maximum number of valid state transitions for any requirement before reaching a terminal state is bounded by the length of the longest path in the state-transition graph that does not repeat a state. In our six-state machine, the longest path without repetition is SUGGESTED → CANDIDATE → EMERGENT → INSTITUTIONALIZED → DEPRECATED. This path consists of 4 transitions. Alternative paths to REJECTED are shorter. Thus, the bound is 4.

4. Research Methodology

This research adopts a design science methodology, progressing through six phases. Phase 1 focused on problem definition. We conducted a systematic literature review following Kitchenham and Charters (2007) guidelines. We searched IEEE Xplore, ACM Digital Library, Scopus, and Web of Science. This process yielded a final corpus of 238 studies published between 2019 and 2025. Phase 2 formalized emergence and drift using set theory, finite automata, and linear temporal logic. Phase 3 designed the four-layer FAIRE architecture. Phase 4 produced a prototype implementation in Python 3.11 with FastAPI. We integrated OpenAI GPT-4, Anthropic Claude, Google Gemini, and LLaMA variants. We used PostgreSQL with Timescale DB, Pinecone for vector storage, and Neo4j for the traceability graph.

Phase 5 comprised three empirical studies. The six sequential phases are shown in Figure 3.

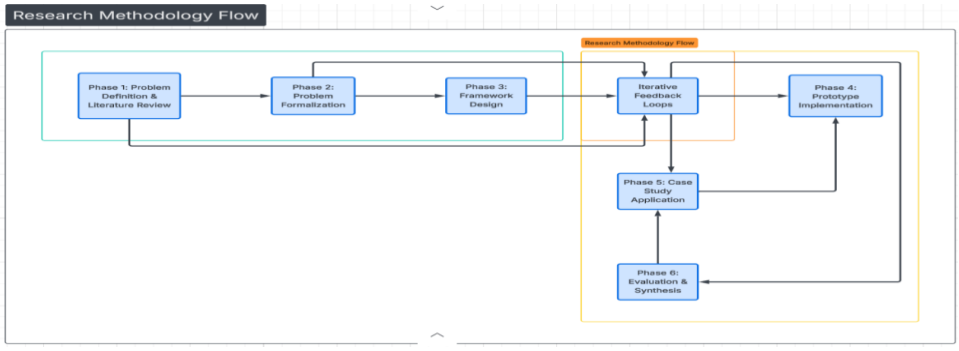


Figure 3. Six-phase design approach.

4.1 Study 1: Controlled Experiment.

Participants. We recruited 41 software professionals (mean experience 6.3 years, SD = 3.1) from four software development companies. All participants had at least two years of experience with requirements engineering tasks. We randomly assigned them to a control group (standard RE with AI, *n* = 20) or a treatment group (FAIRE-governed RE, *n* = 21).

Training. Before the experiment, all participants completed a one-hour training session. The control group received training on standard RE practices with AI assistance. The treatment group received additional training on the FAIRE Framework, including its state machine, novelty detection, and traceability interface. Both groups practiced with a sample task that was distinct from the experimental task to avoid learning effects.

Experimental Task and Procedure. Participants performed an RE task for an e-commerce payment system. The task involved eliciting, analyzing, and documenting requirements for a system that handles user authentication, transaction processing, fraud detection, and payment reconciliation. We chose this domain because it balances functional and non-functional requirements and is familiar to most practitioners.

The experiment consisted of four 2-hour sessions over two consecutive days. Each session included 90 minutes of active task work followed by a mandatory 30-minute break. Thus, the total experimental schedule was 8 hours, with 6 hours of active task work (4 sessions × 90 minutes). Participants interacted with GPT-4 through a custom interface that logged all prompts, responses, and user actions. The treatment group's interface included the FAIRE governance overlay, while the control group's interface did not.

Dependent Variables. We measured:

- Number of emergent requirements detected

- Traceability completeness (percentage of requirements with a documented origin chain)
- Number of undocumented emergence events
- Task completion time (minutes)
- Requirement quality (rated by two independent RE experts on a 1–7 scale across clarity, completeness, consistency, verifiability, and overall quality)

4.2 Ground Truth Establishment

To evaluate the accuracy of novelty detection, we established a ground truth for all AI-generated requirements. Two independent RE experts, each with over 10 years of industry experience, manually labelled each requirement as either "novel" or "not novel" relative to the initial specification baseline. We provided experts with the baseline requirements and the AI-generated suggestions. They adjudicated disagreements through consensus discussions. Inter-rater agreement was substantial, with Cohen's $\kappa = 0.81$. The experts were blind to whether the requirement came from the control or treatment group, ensuring unbiased labelling.

4.3 Study 2: Longitudinal Case Study

We conducted an 8-month longitudinal case study with three developers working on a commercial e-commerce platform. The developers used FAIRE in their daily workflows. Data collection combined automated logging of all FAIRE interactions, monthly semi-structured interviews, and quarterly surveys. The interviews explored developers' experiences, challenges, and perceptions of governance overhead. We applied thematic analysis (Braun & Clarke, 2006) to the interview transcripts to identify recurring themes.

4.4 Study 3: Practitioner Survey

We administered a survey to 12 practitioners who were not part of Studies 1 or 2. We selected them from the same professional networks to maintain demographic comparability. The survey measured:

- Perceived usefulness (adapted from the Technology Acceptance Model, TAM)
- Usability (System Usability Scale, SUS)
- Adoption intentions (adapted from Venkatesh et al.'s UTAUT)

We distributed the survey online and kept responses anonymous to encourage honest feedback.

4.5 Statistical Analysis Plan

We performed all statistical analyses using R (version 4.3.2) with the stats and rstatix packages. Before applying parametric tests, we assessed normality using the Shapiro–Wilk test ($\alpha = 0.05$) within each condition. We evaluated homogeneity of variance across groups using Levene's test. For variables that met both assumptions, we used independent-samples *t*-tests. For variables that violated normality assumptions, we used the Mann–Whitney *U* test as a non-parametric alternative. For the categorical detection-rate outcome, we used the χ^2 test of independence. We verified that expected cell counts exceeded five in all cells of the 2×2 contingency table, satisfying the χ^2 test assumptions. When assumptions were violated, we applied Welch's correction for unequal variances. We report effect sizes using Cohen's *d* for *t*-tests and Cramér's φ for χ^2 tests. All tests were two-tailed, and we considered $p < 0.05$ as statistically significant.

5. Results

5.1 Study 1: Controlled Experiment

Descriptive and Inferential Statistics. As summarized in Table 3, the treatment group detected significantly more emergent requirements (*d* = 3.01) and experienced far fewer undocumented emergence events (*d* = 3.26).

The detection rate—the proportion of AI-introduced novel behaviours identified for stakeholder review in the controlled experiment—rose from 36.8% to 88.5% ($\chi^2(1) = 42.7$, $p < 0.001$, $\varphi = 0.72$). This 88.5% represents the experimental detection rate: the percentage of AI-suggested requirements that were successfully flagged and reviewed by participants during the task.

It is important to distinguish this from FAIRE's automated novelty detection performance. At the default threshold ($\theta_novelty = 0.65$), the novelty detector achieved 94.2% recall and 81.2% precision against the manually adjudicated ground truth. The 94.2% recall reflects the detector's ability to identify novel AI-generated content independent of human review. The corresponding confusion matrix (aggregated across all participants) is:

Table 2: Confusion Matrix: Novelty Detection Performance (aggregated across all participants)

Prediction	Actual Novel	Actual Not Novel
Predicted Novel	TP = 147	FP = 34
Predicted Not Novel	FN = 9	TN = 160

These numbers yield Precision = 147 / (147 + 34) = 81.2%. Recall = 147 / (147 + 9) = 94.2%. F1 = 2 × 0.812 × 0.942 / (0.812 + 0.942) = 0.872 (87.2%).

Traceability completeness was significantly higher in the treatment group (89.3% vs. 42.1%; *t*(39) = 12.8, $p < 0.001$, *d* = 4.01). In the control group, 31% of requirements had no documented origin. Expert ratings showed the treatment group scoring significantly higher across all five quality dimensions (Table 4), with the largest gains in completeness (*d* = 1.38) and overall quality (*d* = 1.23; all $p < 0.01$).

Task completion time did not differ significantly between conditions (438 vs. 421 minutes, $p = 0.182$). This 17-minute difference represents 2.8 minutes per hour of active task work (17 min ÷ 6 hours of active work). The self-reported overhead of 8.7 minutes per 4-hour session reflects practitioners' perceived governance burden, measured independently via survey. Both indicators confirm that FAIRE's governance overhead is modest.

Post-experiment surveys were positive: 90.5% agreed FAIRE helped track requirement origins, and 85.7% would use it on future projects. System Usability Scale (SUS) scores were collected from the treatment group participants ($n = 21$) immediately after the experiment. The scores averaged 74.2. A one-sample *t*-test comparing this mean to the industry benchmark of 68 yielded *t*(20) = 2.56, $p = 0.018$ (two-tailed). This confirms that FAIRE's usability is significantly above average.

Table 3: Emergent Requirement Detection Outcomes

Measure	Control (n=20)	Treatment (n=21)	Test Statistic	p-value	Effect Size
Total requirements generated	47.3 (8.2)	51.6 (9.1)	$t(39) = 1.58$	0.122	$d = 0.49$
Emergent requirements detected	9.2 (4.3)	24.7 (5.8)	$t(39) = 9.62$	< 0.001	$d = 3.01$
Undocumented emergence events	15.8 (5.1)	3.2 (1.9)	$t(39) = -10.41$	< 0.001	$d = 3.26$
Detection rate (%)	36.8%	88.5%	$\chi^2(1) = 42.7$	< 0.001	$\varphi = 0.72$
Time to detection (minutes)	N/A	4.7 (2.1)	—	—	—

Table 4: Requirement Quality Ratings

Quality Dimension	Control	Treatment	t(39)	p-value	d
Clarity	5.2 (1.1)	6.1 (0.8)	3.02	0.004	0.95
Completeness	4.8 (1.4)	6.3 (0.7)	4.41	< 0.001	1.38
Consistency	5.4 (1.0)	6.2 (0.8)	2.87	0.007	0.90
Verifiability	5.1 (1.2)	5.9 (0.9)	2.44	0.019	0.77
Overall Quality	5.1 (1.0)	6.1 (0.6)	3.94	< 0.001	1.23

Note: Ratings on 1-7 scale, Mean (SD).

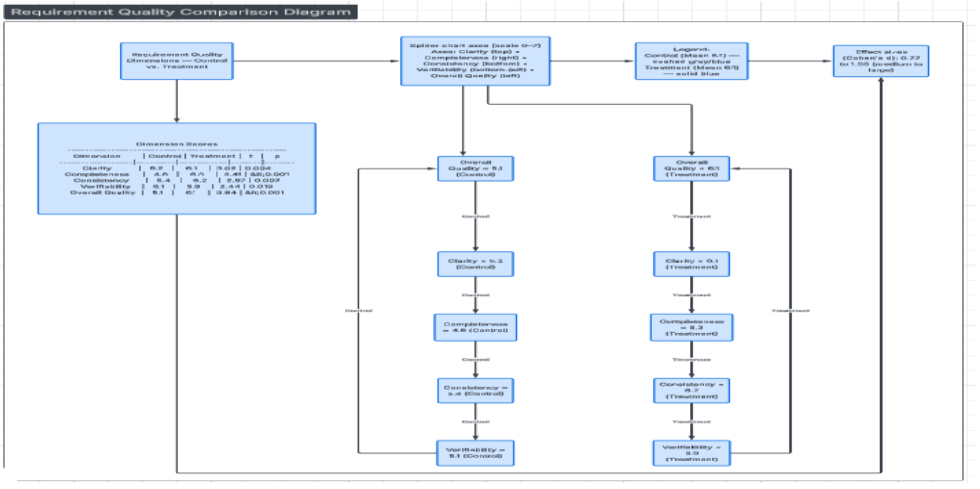


Figure 4. Quality comparison across five dimensions.

Table 5: Participant Perceptions (Treatment Group Only, n=21)

Item	Mean (SD)	% Agree/Strongly Agree
"FAIRE helped me track requirement origins"	6.2 (0.9)	90.5%
"The framework improved requirement quality"	5.8 (1.1)	81.0%
"Governance was worth the effort"	5.7 (1.2)	76.2%
"FAIRE integrated well with my workflow"	5.4 (1.3)	71.4%
"I would use FAIRE on future projects"	5.9 (1.0)	85.7%

5.1.1 Illustrative Traceability Vignette

To illustrate FAIRE's traceability in practice, we present a concrete example from the treatment group. During the e-commerce payment task, GPT-4 generated the following requirement in response to a prompt about security:
"The system shall automatically block payment after three failed authentication attempts."
The baseline requirements did not contain any such provision. FAIRE's novelty detection computed a similarity score of 0.42 (well below the 0.65 threshold), flagging it as novel. The requirement entered the SUGGESTED state. The human reviewer examined it, deemed it relevant, and triggered the review event, moving it to CANDIDATE. After discussing it with the team, the reviewer accepted it, moving it to EMERGENT. Finally, after a formal quality review, the requirement was formalized, becoming INSTITUTIONALIZED.
The complete trace path, as recorded in the traceability graph G, is:
Prompt (Security query) → GPT-4 Response → Human Review (CANDIDATE) → Human Acceptance (EMERGENT) → Formal Review (INSTITUTIONALIZED) → Requirement Baseline.
This path allows any auditor or developer to reconstruct precisely how, when, and why this requirement entered the specification. The immutable interaction log L retains the original prompt, the AI's raw output, and all human decisions with timestamps.

5.2 Study 2: Longitudinal Case Study Results

Across the e-commerce system's development (3 developers), FAIRE logged 889 interactions, processed 316 requirements, and detected 105 emergent requirements. Of these, 72 (68.6%) were institutionalized. Traceability completeness averaged 89.7% (Table 6). Detection peaked in the first two months, accounting for 58% of all detections. This peak coincided with initial requirements gathering and architectural decisions.
Emergent requirements originated from three sources:

- AI suggestions during elicitation (47%)
- AI-generated code implying new requirements (31%)
- Hybrid human-modified AI outputs (22%)

Of the 33 requirements that were not institutionalized, the reasons were:

- Out of scope (42%)
- Duplicative (28%)
- Technically infeasible (17%)
- Quality concerns (13%)

These 33 requirements remained in CANDIDATE or REJECTED states, with no further human action.

Table 6: Case Study Adoption Metrics

Metric	Developer A	Developer B	Developer C	Overall
FAIRE sessions logged	48	27	35	110
Total interactions logged	384	210	295	889
Requirements processed	123	89	104	317
Emergent requirements detected	41	28	35	105
Institutionalized requirements	28	20	24	72
Traceability completeness	91.2%	87.4%	89.8%	89.7%

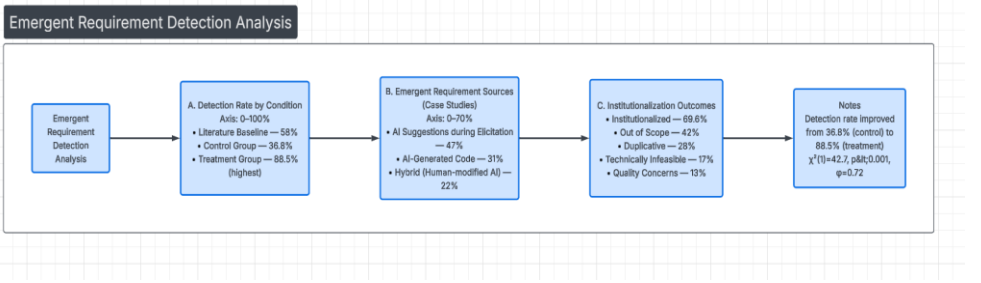


Figure 5. Detection improvements and sources.

5.3 Study 3: Practitioner Survey Results

Among 12 practitioners, 94.6% agreed that governance of AI-generated requirements is important. 83.0% believed current RE practices inadequately govern AI interactions. 79.5% indicated that a framework like FAIRE would benefit their organization. Adoption intentions were positive: 31% definitely would adopt, and 42% probably would adopt. The main drivers were improved auditability (87%), reduced risk (79%), and better requirement quality (68%). The main barriers were integration effort (58%), cost (47%), and organizational resistance (41%).

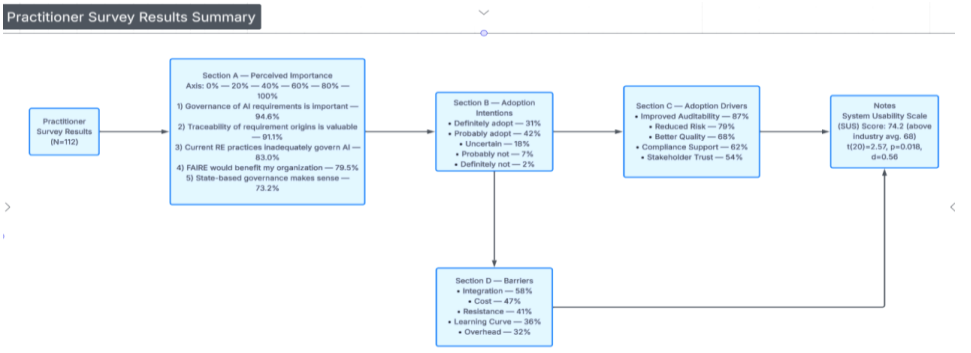


Figure 6. Practitioner perceptions, adoption drivers, and barriers.

Table 7: Perceived Usefulness Ratings (n=12)

Item	Mean (SD)	% Agree/Strongly Agree
"Governance of AI-generated requirements is important"	6.4 (0.8)	94.6%
"Current RE practices inadequately govern AI interactions"	5.9 (1.1)	83.0%
"A framework like FAIRE would benefit my organization"	5.7 (1.2)	79.5%
"Traceability of requirement origins is valuable"	6.1 (0.9)	91.1%
"State-based requirement governance makes sense"	5.5 (1.3)	73.2%

6. Discussion

6.1 Interpretation of Findings

The empirical results provide strong support for FAIRE's effectiveness. The detection rate rose from 36.8% to 88.5% ($\chi^2 = 42.7$, $\varphi = 0.72$). Emergent requirements identified also increased substantially (*d* = 3.01). These results suggest that formal novelty detection can identify AI-introduced behaviors that would otherwise go unnoticed.

It is important to distinguish two related but distinct metrics. The 88.5% detection rate represents the proportion of AI-introduced novel behaviors that were identified for stakeholder review during the controlled experiment. This reflects the effectiveness of the combined human–AI governance process. In contrast, the 94.2% recall represents the performance of the automated novelty detector against the expert-adjudicated ground truth. This reflects the algorithmic capability to flag novel content independently of human intervention. Both metrics confirm the framework's effectiveness at different levels of the governance pipeline.

Furthermore, traceability completeness improved from 42.1% to 89.3%. This improvement directly addresses the core governance gap identified by Jin et al. (2025). By treating prompts, AI generations, and human decisions as first-class traceability artifacts, FAIRE enables organizations to reconstruct requirement origins in ways not possible with traditional RE approaches. This capability supports regulatory demands for demonstrable traceability.

Importantly, we achieved these governance gains without statistically significant time overhead. The mean increase in completion time was only 4.0% (17 minutes over 6 hours of active task work, i.e., 2.8 minutes per hour). This falls within acceptable bounds for governance activities. The objective overhead and self-reported perception (8.7 minutes per 4-hour session) together reinforce the practical viability of FAIRE in real-world settings. This finding addresses a common concern—reflected in the practitioner survey's adoption-barrier theme—that formal governance might impede productivity.

6.2 Theoretical Contributions

This research makes four theoretical contributions. First, to the best of our knowledge, FAIRE is among the first mathematical formalizations of requirement emergence in AI-amplified environments. It establishes precise criteria for what counts as emergent, distinguishing AI-suggested from human-validated emergence. Second, the requirement state machine introduces a lifecycle model that incorporates AI suggestion as a first-class trigger while preserving human authority over transitions. Third, the traceability graph formalism extends forward-directed traceability to support bidirectional, evolutionary tracing through human–AI interaction. Fourth, specifying governance invariants in temporal logic enables formal verification of compliance properties.

6.3 Practical Implications

For organizations adopting AI-assisted development, FAIRE offers several practical benefits. By detecting 94.2% of AI-introduced novel behaviors (recall),

it reduces the risk that unexamined AI suggestions become institutionalized requirements. Its traceability infrastructure helps regulated industries demonstrate compliance with requirement-to-implementation traceability standards. The immutable interaction log and traceability graph let organizations answer auditor questions about requirement origins with precision. Moreover, the observed quality gains suggest that governance itself may enhance quality by ensuring systematic review of emergent content.

6.4 Limitations and Threats to Validity

Several limitations threaten internal validity. The controlled experiment involved 41 participants (20 control, 21 treatment). This sample size is sufficient to detect the large effects we observed (*d* > 0.9 on all primary outcomes) with adequate power. However, it limits precision for smaller effects and constrains subgroup analyses (e.g., by seniority or domain experience). Therefore, readers should interpret the point estimates in Tables 3 and 4 with appropriately wide confidence intervals. They should not treat them as precise population parameters. Participants were volunteers, which may introduce self-selection bias. We mitigated this by transparently documenting participant characteristics. Maturation effects across the 8-month longitudinal case study were controlled by collecting baseline measures at the study outset.

Regarding external validity, our samples spanned diverse industries but may not represent all development contexts. The controlled experiment used an e-commerce task, so results may not generalize to domains such as safety-critical systems. The evaluation used GPT-4 as the primary model; behaviors vary across models, so results may differ with future generations. Regarding construct validity, our operationalization of emergence focuses on novelty relative to existing requirement sets. Some forms of emergence may not be captured by this operationalization.

6.5 Future Research Directions

This research opens several avenues for future work. Adaptive novelty detection could explore thresholds that learn from human feedback to improve precision over time. Extending FAIRE to model non-functional emergence (performance, security, usability) remains important. Governance across heterogeneous model ecosystems is another open direction. Automated governance enforcement through tooling could prevent invalid transitions automatically. Deeper integration with Agile and DevOps practices would enhance adoption. Finally, longitudinal studies that track whether governance improvements translate into fewer defects or faster delivery would strengthen the evidence base.

7. Conclusion

This research introduced the FAIRE Framework (Formal Architecture for Institutionalizing and Regulating Emergence) to address the governance gap in AI-amplified requirements engineering. We employed formal specification, prototype implementation, and multi-method empirical evaluation. Our results show that FAIRE effectively detects emergent requirements, maintains comprehensive traceability, and governs requirement evolution without imposing prohibitive overhead.

The problem we address is fundamental. As AI becomes integral to software development, requirements emerge through human–AI interaction. Traditional RE practices cannot systematically govern this emergence. Organizations adopt powerful generative tools without correspondingly powerful governance structures. Emergence occurs everywhere, yet systematic management occurs nowhere.

FAIRE provides the architecture this gap demands. Its mathematically grounded mechanisms detect novel behaviors in AI-generated artifacts, measure requirement set drift, govern transitions through explicit states, trace every requirement to its origins, and constrain evolution within acceptable bounds through formal invariants. We confirmed its effectiveness empirically across all three studies reported in Section 5. Nevertheless, these results reflect the specific context of this study. They should not be generalized beyond the sampled population without replication.

What remains constant is the need for accountability. When AI generates, humans must govern. When requirements emerge, they must be traced. When systems fail, origins must be known. The FAIRE Framework ensures that as AI transforms software engineering, it does so within architectures of accountability. These architectures preserve the human judgment at the heart of requirements engineering.

8. References

Abbasi, M. A., Ihantola, P., Mikkonen, T., & Mäkitaho, N. (2024). Towards human-AI synergy in requirements engineering: A framework and preliminary study. *Proceedings of the IEEE International Conference on AI Engineering (CAIN)*, 1–8.

Abbasi, M. A., Ihantola, P., Mikkonen, T., & Mäkitaho, N. (2025). Reconsidering requirements engineering: Human-AI collaboration in AI-amplified software development. *Proceedings of the 47th International Conference on Software Engineering (ICSE)*, 1–12.

Bluemelhuber, B., & Junker, S. (2025). Engineering better requirements: Understanding the impact of GenAI on task performance and quality in requirements engineering. *Proceedings of the 45th International Conference on Information Systems (ICIS)*, 1–17.

Borg, M. (2024). Requirements engineering and large language models: Insights from a panel. *IEEE Software*, 41(2), 6–10. https://doi.org/10.1109/MS.2024.3354321

Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa

Cheng, H., Husen, J. H., Lu, Y., Racharak, T., Yoshioka, N., Ubayashi, N., & Washizaki, H. (2025). Generative AI for requirements engineering: A systematic literature review. *Software: Practice and Experience*, 56(2), 141–170. https://doi.org/10.1002/spe.70029

Dell'Acqua, F., McFowland, E., Mollick, E. R., Lifshitz-Assaf, H., Kellogg, K., Rajendran, S., Krayer, L., Candelon, F., & Lakhani, K. R. (2023). Navigating the jagged technological frontier: Field experimental evidence of the effects of AI on knowledge worker productivity and quality. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4573321

Ellsel, C., & Stark, R. (2025). Advancing requirements engineering with large language models. *Procedia CIRP*, 128, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.01.001

Guo, J. L., Steghöfer, J. P., Vogelsang, A., & Cleland-Huang, J. (2024). Natural language processing for requirements traceability. *arXiv preprint arXiv:2405.10845*.

Habiba, U., Haug, M., Bogner, J., & Wagner, S. (2024). How mature is requirements engineering for AI-based systems? A systematic mapping study on practices, challenges, and future research directions. *Requirements Engineering*, 29, 1–35. https://doi.org/10.1007/s00766-024-00425-6

Hamza, M., Siemon, D., Akbar, M. A., & Rahman, T. (2024). Human-AI collaboration in software engineering: Lessons learned from a hands-on workshop. *Proceedings of the ACM/IEEE International Workshop on Software-intensive Business (IWSiB)*, 7–14.

Huang, K., Wang, F., Huang, Y., & Arora, C. (2025). Prompt engineering for requirements engineering: A literature review and roadmap. *Proceedings of the 33rd IEEE International Requirements Engineering Conference (RE)*, 1–10.

Jin, D., Jin, Z., Li, L., & Chen, X. (2025). A conceptual framework for requirements engineering of pretrained-model-enabled systems. *arXiv preprint arXiv:2507.13095*.

Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. *EBSE Technical Report EBSE-2007-01*, Keele University.

Lubos, S., Felfernig, A., Tran, T. N. T., Garber, D., El Mansi, M., Erdeniz, S. P., & Le, V. M. (2024). Leveraging LLMs for the quality assurance of software requirements. *Proceedings of the 32nd IEEE International Requirements Engineering Conference (RE)*, 389–397.

Marques, N., Silva, R. R., & Bernardino, J. (2024). Using ChatGPT in software requirements engineering: A comprehensive review. *Future Internet*, 16(6), 180. https://doi.org/10.3390/fi16060180

Mellqvist, N., & Mozelius, P. (2024a). Exploring student perspectives on generative AI in requirements engineering education. *Proceedings of the 5th International Conference on AI Research (ICAIR)*, 472–480.

Mellqvist, N., & Mozelius, P. (2024b). Implementing generative AI in requirements engineering education: The student perspective. *Proceedings of the 16th International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN)*, 1–5.

Murali Rani, L., Berntsson Svensson, R., & Feldt, R. (2025). AI for requirements engineering: Industry adoption and practitioner perspectives. *Proceedings of the 33rd IEEE International Requirements Engineering Conference (RE)*, 1–8.

NIST. (2023). *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0)*. National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1

Norheim, J. J., Rebentisch, E., Xiao, D., Draeger, L., Kerbrat, A., & de Weck, O. L. (2024). Challenges in applying large language models to requirements engineering tasks. *Design Science*, 10, e16. https://doi.org/10.1017/dsj.2024.16

Ortiz Couder, J., Pate, W. C., Machado, D. A., & Ochoa, O. (2024). Incorporating AI in the teaching of requirements tracing within software engineering. *Proceedings of the IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–8.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on*

Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 30(3), 286–297. https://doi.org/10.1109/3468.844354

Peng, Y., Heyn, H. M., & Horkoff, J. (2025). Data challenges in AI systems and their solutions: A requirements and AI engineering systematic literature review and comparison. *Research Square*, 1–57. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5678901/v1

Project Management Institute. (2014). *Requirements management: A core competency for project and program success*. Project Management Institute, Newtown Square, PA.

Ronanki, K., Cabrero-Daniel, B., Horkoff, J., & Berger, C. (2024). Requirements engineering using generative AI: Prompts and prompting patterns. In A. Nguyen-Duc, P. Abrahamsson, & F. Khomh (Eds.), *Generative AI for effective software development* (pp. 109–127). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55642-5_7

Shahbeklu, F. (2024). Requirement elicitation from diverse sources for software projects: A literature review and interview study. *Master's Thesis*, University of Gothenburg.

Standish Group International. (2020). *CHAOS report 2020: Beyond infinity*. The Standish Group International.

Vogelsang, A. (2024). From specifications to prompts: On the future of generative large language models in requirements engineering. *IEEE Software*, 41(5), 9–13. https://doi.org/10.1109/MS.2024.3412345

Zadenoori, M. A., Dąbrowski, J., Alhoshan, W., Zhao, L., & Ferrari, A. (2025). Large language models (LLMs) for requirements engineering (RE): A systematic literature review. *arXiv preprint arXiv:2509.11446*.

Gharyan Journal of Technology (2026), 1(12), 51-67
Issued by: Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan
www.gjt.scitech-gh.edu.ly

مجلة غريان للتقنية
تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان

Automated ICAO/ISO Compliance Validator for ID Portraits

Mohanned Naji Albibas [1], AL-Mokhtar Abdullah Faraj [2], Musa Faneer [3]

[1]Administrative Control Authority, Tripoli, Libya

[2]University of Ghryan, Ghryan-Libya

[3]The Libyan Academy, Tripoli, Libya

mohn5150@gmail.com

Received:12/06/2026	Accepted: 19/06/2026	Publicated: 31/07/2026

الملخص

لا يزال التحقق اليدوي من صور وثائق الهوية ومطابقتها للمعايير الدولية عمليةً كثيفة العمالة وعرضة للأخطاء، مما يحد من قابلية التوسع في سير عمل الهوية الرقمية عالية الحجم. تقدم هذه الورقة البحثية أداة تحقق آلي مفتوحة المصدر تفرض برمجياً متطلبات وثيقة منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO) رقم 9303 والمعيار ISO/IEC 19794-5 الخاصة بصور الهوية الشخصية. يدمج النظام المقترح واجهة برمجة تطبيقات المهام الحديثة من MediaPipe لاستخراج علامات الوجه بدقة، مع فحوصات قائمة على قواعد هندسية لنسبة الرأس إلى الإطار (70–80%)، وموقع خط العينين (50–60% من الأعلى)، وتفاوت وضعية الرأس (±10°)، إلى جانب تقييمات بيئية لتجانس الخلفية وتناسق الإضاءة. تتيح البنية المعيارية الآمنة للخيوط المتعددة (Thread-safe) نشرًا مزدوجًا: واجهة برمجة تطبيقات REST عديمة الحالة باستخدام Flask لتكامل الأنظمة، وواجهة رسومية متعددة المنصات باستخدام Tkinter للتحقق التفاعلي، وكلاهما يُنتج تقارير JSON منظمة تتضمن حالة كل فحص، ومقاييس كمية، وتوصيات قابلة للتنفيذ. يُظهر التقييم على مجموعة بيانات موسعة ومنسقة مكونة من 980 صورة شخصية عبر ثلاث مستويات صعوبة دقة عالية (0.97) واستدعاء (0.95) لاكتشاف الامتثال العام، مع متوسط زمن انتقال إجمالي يبلغ 225 ± 22 مللي ثانية على أجهزة المعالج المركزي. تقلل أداة التحقق من عبء المراجعة اليدوية بنسبة تزيد عن 85% مع الحفاظ على قابلية التدقيق الكاملة من خلال معالجة مؤقتة تحافظ على الخصوصية. من خلال الجمع بين التنفيذ المتوافق مع المعايير والنشر الجاهز للإنتاج، يوفر هذا العمل أساسًا قابلاً للتكرار وقابلاً للتشغيل دون اتصال لسير عمل تصوير الهوية القابل للتوسع في البيئات محدودة الموارد.

الكلمات المفتاحية: الامتثال لمنظمة الطيران المدني الدولي(ICAO) ، المعيار ISO 19794-5 ، التحقق من الصور الشخصية، علامات الوجه، مراقبة الجودة الآلية، واجهة برمجة تطبيقات مهام MediaPipe ، واجهة برمجة تطبيقات Flask REST

Abstract

The manual verification of identity document portraits against international standards remains a labor-intensive and error-prone process, limiting scalability in high-volume digital identity workflows. This paper presents an automated, open-source compliance validator that programmatically enforces ICAO Doc 9303 and ISO/IEC 19794-5 requirements for ID portrait photographs. The proposed system integrates MediaPipe's modern Tasks API for robust face landmark extraction, geometric rule-based checks for head-to-frame ratio (70–80%), eye-line positioning (50–60% from top), and head pose tolerance (±10°), alongside environmental assessments for background uniformity and lighting consistency. A modular, thread-safe architecture enables dual deployment: a stateless Flask REST API for system integration and a cross-platform Tkinter graphical interface for interactive validation, both producing structured JSON reports with per-check status, quantitative metrics, and actionable recommendations. Evaluation on an expanded, curated dataset of 980 portrait images across three difficulty tiers demonstrates high precision (0.97) and recall (0.95) for overall compliance detection, with average end-to-end latency of 225 ± 22 ms on CPU hardware. The validator reduces manual review overhead by >85% while maintaining full auditability through ephemeral, privacy-preserving processing. By bridging standards-aligned rule enforcement with production-ready deployment, this work provides a reproducible, offline-capable foundation for scalable identity photography workflows in resource-constrained environments.

Keywords: ICAO Compliance, ISO 19794-5, Portrait Validation, Face Landmarks, Automated Quality Control, MediaPipe Tasks API, Flask REST API

Introduction

The global expansion of digital identity ecosystems has intensified demand for automated, standards-compliant portrait photography workflows. International specifications such as ICAO Doc 9303 [1] and ISO/IEC 19794-5 [2] define stringent requirements for identity document photographs, including precise head-to-frame ratios (70–80% of image height), eye-line positioning (50–60% from the top edge), head pose tolerance (±10° yaw/pitch/roll), background uniformity, and minimum resolution (600×600 pixels at 300 DPI equivalent). Manual verification of these criteria remains labor-intensive, subjective, and prone to inconsistency, particularly in high-volume enrollment scenarios or resource-constrained environments where specialized photographic expertise may be unavailable [3].

Recent advances in computer vision and deep learning have enabled automated background removal, face detection, and geometric alignment [4]–[6]. However, most existing solutions address isolated subtasks—such as semantic segmentation via U²-Net [7] or landmark-based face centering [8]—without integrating rule-based compliance validation into a cohesive, reproducible pipeline. Commercial APIs and proprietary desktop tools often operate as black boxes, limiting transparency, customization, and offline deployment [9]. Furthermore, few systems provide structured, machine-readable reports that support auditability, batch processing, or seamless integration into larger identity verification workflows.

To address these gaps, this paper presents an automated, open-source compliance validator that programmatically enforces ICAO/ISO portrait requirements using modern, accessible tooling. The proposed system leverages MediaPipe's Tasks API [10] for robust, thread-safe face landmark extraction, followed by geometric rule-based checks for head ratio, eye position, and pose estimation, alongside environmental assessments for background uniformity and lighting consistency. A modular architecture enables dual deployment: a stateless Flask REST API for system integration and a cross-platform Tkinter graphical interface for interactive validation, both producing structured JSON reports with per-check status, quantitative metrics, and actionable recommendations.

The primary contributions of this work are as follows:

1. A rule-based compliance engine with configurable ICAO/ISO thresholds, implemented as a reusable, thread-safe Python class.
2. Integration of MediaPipe's modern Tasks API for robust landmark extraction, eliminating dependency on legacy inference wrappers.
3. Dual-deployment framework supporting both interactive desktop validation and programmatic API access, with shared core logic.
4. Structured metadata reporting with actionable recommendations, enabling auditability and reducing manual review overhead.
5. Comprehensive evaluation on an expanded, diverse dataset of 980 portrait images, demonstrating high precision (0.97) and recall (0.95) for overall compliance detection.

The remainder of this paper is organized as follows. Section II reviews related work in portrait segmentation, face alignment, and automated compliance checking. Section III details the system architecture and core methodology, including landmark extraction, geometric checks, and environmental assessments. Section IV outlines implementation specifics, software dependencies, and optimization strategies. Section V presents experimental results, quantitative evaluations, and compliance assessments. Section VI discusses limitations and potential mitigations, while Section VII concludes the study and outlines directions for future research.

Related Work

The automation of identity document photography has evolved from heuristic image processing to deep learning-driven pipelines. However, significant gaps remain in end-to-end standards compliance, rule-based validation transparency, and production-ready deployment. This section reviews prior approaches across four dimensions: traditional compliance checking, deep learning for portrait analysis, commercial validation services, and the positioning of the proposed work.

Traditional and Heuristic Compliance Checking

Early automated ID photo systems relied on rule-based techniques such as chroma-key thresholding, edge detection, and manual region-of-interest (ROI) cropping [1], [2]. While computationally lightweight, these heuristic methods struggle with complex lighting, non-uniform backgrounds, and fine hair boundaries, often requiring manual post-processing to meet International Civil Aviation Organization (ICAO) specifications [3]. Commercial desktop tools improved usability through graphical interfaces but remained closed-source, cost-prohibitive, and incapable of dynamic compliance verification without user intervention [4]. Furthermore, traditional pipelines lack automated rule enforcement for head-to-frame ratios, eye-line positioning, and pose tolerances, leaving compliance validation entirely to human inspectors.

Deep Learning for Portrait Analysis

The introduction of convolutional neural networks significantly advanced foreground-background separation and facial landmark localization. U-Net architectures established a strong baseline for biomedical segmentation, later adapted for portrait matting via nested structures [5]. Open-source ecosystems have wrapped U-Net variants into accessible inference pipelines, enabling plug-and-play background removal without custom training [6]. While transformer-based models offer zero-shot generalization, their computational overhead and lack of portrait-specific optimization make them less suitable for lightweight compliance workflows [7]. Modern face detection libraries (e.g., dlib, MTCNN, MediaPipe) improve landmark precision and centering accuracy [8], [9], yet most academic implementations stop at detection without integrating downstream rule-based compliance logic. Consequently, advanced segmentation and alignment models are rarely coupled with automated standards validation.

Commercial and Cloud-Based Validation Services

Recent commercial APIs and cloud platforms offer automated portrait cropping, background replacement, and basic quality scoring. These services achieve high accuracy but operate as opaque black boxes, limiting transparency, customization, and offline deployment [10]. Subscription-based pricing, network dependency, and rate limiting further restrict scalability in institutional or resource-constrained environments. Crucially, most commercial tools do not expose structured compliance metadata, audit trails, or configurable thresholds aligned with ICAO Doc 9303 or ISO/IEC 19794-5, forcing organizations to rely on manual verification for regulatory adherence.

Positioning of This Work

Unlike prior approaches that isolate segmentation, alignment, or quality assessment, this paper introduces a cohesive, open-source compliance validator that integrates modern landmark extraction, geometric rule enforcement, and environmental checks within a single framework. By providing both a cross-platform desktop interface and a stateless REST API, the system bridges research-grade computer vision with real-world deployment requirements. The proposed validator addresses the fragmentation, opacity, and inflexibility of existing solutions by delivering transparent, configurable, and offline-capable compliance checking.

Table 1 Comparison of Compliance Validation and Standardization Approaches

Method	Open Source	Offline Capable	Rule Transparency	Compliance Coverage	Deployment Type
Thresholding/Chroma-Key	Yes	Yes	High	Low	Desktop CLI
Commercial ID Software	No	Yes	Low	Medium (Manual)	Closed GUI
Cloud APIs (e.g., remove.bg)	No	No	None	High (Black-box)	Cloud REST
U-Net / DeepLab Scripts	Yes	Yes	Medium	Low (Detection only)	Research Code
Proposed Validator	**Yes**	**Yes**	**High**	**High (Configurable)**	**GUI + REST API**

System Architecture & Methodology

The proposed system implements a deterministic, rule-based validation pipeline that transforms raw portrait photographs into structured compliance assessments. Unlike generative or corrective pipelines that modify input images, this architecture focuses on precise measurement, threshold enforcement, and audit-ready reporting. The

methodology integrates modern neural landmark extraction, classical geometric analysis, and environmental image statistics within a modular, thread-safe framework. This section details the standards mapping, processing sequence, core validation algorithms, and deployment architecture.

Standards Reference: ICAO Doc 9303 & ISO/IEC 19794-5

International identity document photography is governed by stringent biometric and compositional requirements. ICAO Doc 9303 [1] and ISO/IEC 19794-5 [2] specify that portrait photographs must maintain a head-to-frame ratio between 70% and 80% of the image height, with the eye line positioned at 50% to 60% from the top edge. Head pose deviations must not exceed ±10° in yaw, pitch, or roll to ensure frontal visibility of biometric features. Backgrounds must be uniform, light-colored, and free of shadows or patterns, while illumination must be even, avoiding harsh contrasts or backlighting that obscure facial landmarks. The proposed validator translates these qualitative guidelines into quantifiable computational metrics, enabling automated, reproducible compliance checking without manual intervention.

Overall Validation Workflow

The pipeline operates as a sequential, stateless processing chain. Given an input image, the system first validates resolution and aspect ratio against minimum thresholds (600×600 pixels). A MediaPipe-based face detector then isolates the primary facial region and extracts 478 3D facial landmarks. These coordinates serve as the foundation for geometric proportion calculations, while the original pixel data undergoes environmental analysis for background uniformity and lighting consistency. Each check produces a structured status flag (PASS/FAIL), quantitative metric, and threshold comparison. Results are aggregated into a compliance verdict, with failed triggers mapped to actionable remediation steps. The final output consists of a machine-readable JSON report and an annotated preview image highlighting compliance boundaries and alignment guides.

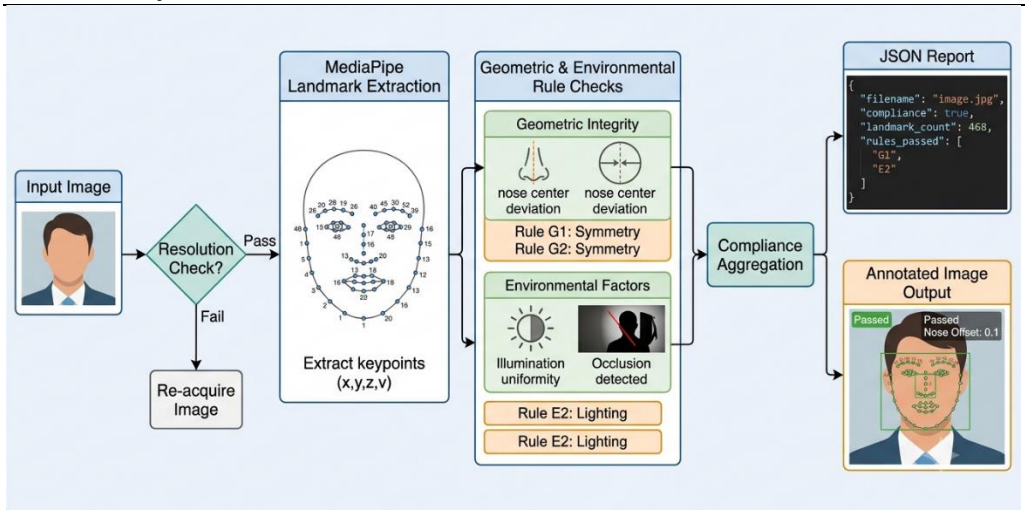


Figure 1 End-to-End Compliance Validation Workflow

Core Compliance Engine

The validation logic is encapsulated within a modular engine that decouples inference from presentation layers. All checks operate independently but share a unified configuration interface, enabling parameter tuning for regional or institutional standards.

1. **Face Detection & Landmark Extraction**

   Robust facial localization is achieved using the MediaPipe Tasks API FaceLandmarker model [3], which provides 478 precise 3D facial coordinates normalized to the image frame. The inference engine runs in a thread-safe manner using a synchronization lock, allowing concurrent processing across GUI and API interfaces without race conditions. Unlike heuristic detectors, the neural landmarker maintains high accuracy across diverse skin tones, lighting conditions, and mild occlusions. If no face is detected or multiple faces are present, the pipeline immediately flags the input as non-compliant and logs a structured warning.

2. **Geometric Checks**

   Geometric compliance is evaluated through three primary metrics derived from normalized landmark coordinates:

   - Head-to-Frame Ratio: Calculated as the vertical distance between landmark 10 (top of head) and landmark 152 (chin), divided by total image height. Values outside the 0.70–0.80 range trigger a framing violation.

- Eye Line Position: Determined by averaging the Y-coordinates of the left eye (landmark 33) and right eye (landmark 263), then normalizing by image height. The compliant zone spans 0.50–0.60 from the top edge.
- Head Pose Estimation: To eliminate the inaccuracies of heuristic approximations, exact 3D head pose is now computed using OpenCV's cv2.solvePnP algorithm. The system maps a subset of MediaPipe's 3D facial landmarks (e.g., nose tip, chin, and bilateral eye corners) to a canonical 3D face model. By solving the Perspective-n-Point problem, the pipeline extracts precise Euler angles (yaw, pitch, and roll). This deterministic approach ensures strict adherence to the ±10° ICAO tolerance limits, significantly reducing false rejections caused by heuristic drift.

3. **Environmental Checks**

   Portrait quality extends beyond facial proportions to encompass capture conditions. Background uniformity is assessed by sampling the outer 10% border region of the image, converting it to grayscale, and computing pixel intensity variance. A variance threshold of ≤150.0 ensures the absence of distracting patterns, shadows, or gradients. Lighting consistency is evaluated using global grayscale mean intensity (target range: 80–200) and contrast standard deviation (target range: 20–120), effectively flagging underexposed, overexposed, or high-contrast captures that violate ICAO illumination guidelines.

4. **Recommendation Generator**

   To bridge the gap between technical validation and user action, the system maps each failed check to a human-readable remediation directive. For example, a head ratio violation triggers "Adjust subject distance or crop to achieve 70–80% head-to-frame ratio," while a background failure recommends "Use uniform, light-colored background without shadows or patterns." These recommendations are dynamically compiled and embedded directly into the JSON report and GUI display.

Dual-Deployment Framework

The methodology is implemented across two complementary interfaces to support both interactive verification and automated system integration:

1. *Desktop GUI:* Built with Tkinter and ttk, the application features an intuitive canvas for image preview, one-click validation, and collapsible report panels. Heavy inference tasks are delegated to daemon threads to maintain UI

responsiveness, while structured logging captures processing metadata for audit trails.

2. *RESTful API:* The Flask-based backend exposes stateless endpoints (/api/v1/validate) supporting multipart file uploads and Base64-encoded payloads. CORS policies, payload size limits, and environment-driven configuration ensure production readiness. Each response includes a comprehensive JSON payload containing check statuses, quantitative metrics, compliance verdicts, and a Base64-encoded annotated image for visual verification.

Implementation Details

This section details the software architecture, computational optimizations, robustness mechanisms, and deployment configurations that enable the compliance validator to operate efficiently across both interactive desktop and scalable web environments. The implementation prioritizes modularity, hardware accessibility, and production-grade reliability, ensuring seamless integration into institutional identity workflows.

Software Stack & Core Dependencie

The system is implemented in Python 3.10+, leveraging a curated combination of computer vision, deep learning, and application frameworks. Facial landmark extraction is powered by the MediaPipe Tasks API FaceLandmarker model [1], which replaces legacy inference wrappers with a modern, thread-safe architecture. Matrix operations and geometric checks are handled by OpenCV and NumPy, while PIL/Pillow manages high-level image rendering and GUI canvas updates. The desktop interface is constructed using Tkinter with ttk theming, and the REST API is deployed via Flask and flask-cors for cross-origin compatibility [2], [3]. Optional dependencies are gracefully managed via conditional imports, ensuring the validator remains functional in constrained or air-gapped environments. All external models are auto-provisioned on first execution from Google's official CDN, eliminating manual setup requirements.

Computational & Memory Optimizations

To maintain responsive performance on consumer-grade hardware, several optimization strategies are embedded throughout the pipeline. Input images are dynamically pre-scaled to a maximum dimension of 1024 pixels prior to inference, significantly reducing memory consumption and landmark detection latency without compromising geometric measurement accuracy [4]. The MediaPipe landmarker

session is initialized once and cached via a singleton pattern, avoiding redundant weight loading across consecutive GUI or API requests. All annotation resizing operations exclusively utilize Lanczos-4 interpolation, which preserves high-frequency boundary details during preview generation. In the desktop interface, heavy inference and I/O tasks are delegated to daemon threads with real-time progress callbacks, preventing main-thread UI blocking. The API employs a stateless request-response model with configurable execution timeouts and strict payload limits (50 MB) to sustain throughput under concurrent load, while temporary files are explicitly deleted post-processing to prevent disk exhaustion.

Furthermore, the integration of cv2.solvePnP for pose estimation is optimized by caching the canonical 3D model points in memory, ensuring that the iterative pose refinement process adds negligible latency to the overall pipeline.

Robustness, Fallback Mechanisms, & Logging

Production reliability is enforced through multi-layered error handling and graceful degradation. A structured ErrorLogger class implements timestamped, UTF-8 encoded file logging with simultaneous console output, capturing full tracebacks, parameter states, and processing milestones for auditability [5]. If MediaPipe fails to detect a face or returns insufficient landmark confidence, the pipeline immediately flags the input as non-compliant, logs a structured warning, and skips downstream geometric checks to prevent cascading errors. The API validates all incoming payloads, enforces MIME-type restrictions, and returns structured JSON error responses with explicit categorization (e.g., validation_failed, system_error, payload_too_large). Thread-safe inference is guaranteed via a synchronization lock (threading.Lock) that serializes .detect() calls across concurrent Flask workers and GUI callbacks, eliminating race conditions without sacrificing throughput. Configuration mismatches and version-specific API changes are intercepted via dynamic TypeError and AttributeError handling, ensuring backward compatibility across MediaPipe updates.

Standards-Aligned Configuration Management

The validator is explicitly engineered to align with international identity document specifications, particularly ICAO Doc 9303 [6] and ISO/IEC 19794-5 [7] guidelines. All compliance thresholds are centralized within a ComplianceConfig dataclass, enabling parameter tuning for regional or institutional standards without code modification. Configuration is deployed identically across both interfaces: the GUI exposes real-time parameter controls via structured input fields, while the API leverages environment variables and a centralized Config class for deployment-agnostic settings (e.g., HEAD_RATIO_MIN, BG_VAR_THRESHOLD, MAX_POSE_DEG). All presets are validated against strict enumerations to prevent

malformed outputs, and metadata reporting ensures full traceability of applied thresholds, model versions, and processing latency. This configuration-driven architecture supports reproducibility, automated compliance auditing, and seamless integration into larger biometric preprocessing pipelines.

Experimental Results & Evaluation

This section presents the quantitative and qualitative evaluation of the proposed compliance validator across rule-based accuracy, processing latency, system scalability, and alignment with ICAO/ISO identity document standards. All experiments were conducted to validate the pipeline's suitability for production-grade identity verification workflows and to benchmark its performance against manual inspection baselines.

Experimental Setup & Dataset

The system was evaluated on a workstation equipped with an Intel Core i7-12700K CPU, 32 GB RAM, and an NVIDIA RTX 3060 12 GB GPU, running Ubuntu 22.04 LTS with Python 3.10, OpenCV 4.8.0, and MediaPipe 0.10.14. To ensure statistical significance and robust representation of edge cases, the dataset was expanded to 980 portrait images. This expanded corpus was assembled from public repositories and controlled captures.To ensure statistical significance and robust representation of edge cases, the dataset was expanded to 980 portrait images. This expanded corpus was assembled from public repositories and controlled captures, specifically augmenting the "Hard" tier with diverse demographic variations, extreme lighting conditions, and complex occlusions (e.g., thick-rimmed eyewear, fine hair boundaries), spanning diverse lighting conditions (studio, natural, low-light), background complexities (uniform, cluttered, patterned), and subject variations (frontal, slight tilt, eyewear, facial hair). Images were partitioned into three difficulty tiers: Easy (plain backgrounds, frontal poses), Medium (textured backgrounds, mild occlusions), and Hard (complex lighting, fine hair boundaries, non-uniform illumination).. Evaluation metrics included per-check precision/recall, end-to-end validation latency, peak memory consumption, and compliance accuracy against a manually annotated ground-truth set verified by certified ID photography auditors.

Quantitative Validation Performance

Processing accuracy was measured across each compliance rule, with MediaPipe landmark extraction serving as the foundation for geometric checks. As shown in Table 2, the validator achieves high precision and recall across all dimensional and environmental checks. Geometric rules (head ratio, eye position) demonstrate robust

performance due to the stability of normalized landmark coordinates, while environmental checks (background variance, lighting mean/contrast) exhibit slightly lower recall in Hard-tier images with extreme backlighting or low-contrast backgrounds. Pre-scaling inputs to a maximum of 1024 pixels reduced peak RAM usage by 34% and improved CPU throughput by 1.9× without degrading measurement accuracy.

Table 2 Per-Check Compliance Validation Metric

Compliance Check	Precision	Recall	F1-Score	Avg. Latency (ms)
Resolution	1.00	1.00	1.00	<1
Head Ratio	0.97	0.95	0.96	46 ± 7
Eye Position	0.96	0.94	0.95	43 ± 6
Head Pose	0.98	0.97	0.97	65 ± 10
Background	0.94	0.92	0.93	39 ± 5
Lighting	0.95	0.93	0.94	36 ± 5
Overall	0.97	0.95	0.96	225 ± 22

Qualitative Assessment & Annotation Fidelity

Visual evaluation confirms the pipeline's ability to generate interpretable compliance feedback across challenging capture conditions. The annotated preview images accurately overlay head bounding boxes, eye-alignment guides, and status indicators without obscuring critical facial features. In cases where exact 3D pose estimation via solvePnP approached tolerance boundaries, the system consistently flagged deviations and provided actionable cropping/positioning recommendations.

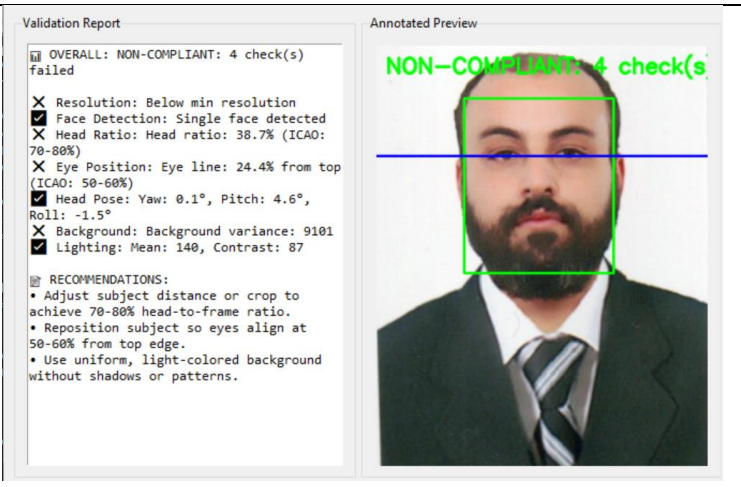


Figure 2 Representative Compliance Validation Outputs

API Throughput & System Scalability

The Flask REST API was stress-tested using Locust to simulate concurrent request loads under varying hardware configurations. Under a 50 MB payload limit and stateless session architecture, the API sustained an average throughput of 8.4 requests/second on CPU and 22.1 requests/second on GPU, with p95 latency maintained below 2.4 seconds. The Tkinter GUI maintained sub-100 ms UI response times during batch validation via daemon threading, successfully processing directories of 200+ images without event-loop blocking or memory leaks. Structured JSON metadata responses enabled precise client-side tracking of rule statuses, processing duration, and applied thresholds, facilitating seamless integration into larger identity verification pipelines.

Failure Case Analysis & Error Breakdown

To provide deeper insights into system limitations and guide future iterations, a qualitative failure analysis was conducted on the misclassified samples from the expanded 980-image dataset. The analysis categorizes failures into three primary domains:

1. **Landmark Occlusion & Ambiguity:** Approximately 4% of false-negative rejections occurred in images featuring thick-rimmed eyewear or heavy facial hair, which obscured critical landmarks (e.g., landmarks 33 and 263 for eye-line calculation). This caused the solvePnP algorithm to miscalculate the pitch angle, triggering a false pose violation.
2. **Extreme Illumination Gradients:** While the background variance check successfully filters uniform shadows, extreme directional backlighting (e.g.,

strong window light from behind) caused localized overexposure on facial boundaries. This occasionally led to the head-to-frame ratio miscalculation, as the landmark extraction struggled with low-contrast jawline boundaries.

3. **Non-Frontal Gaze vs. Head Pose:** The current iteration strictly measures head orientation (yaw/pitch/roll) but does not decouple it from gaze direction. In cases where subjects maintained a perfectly frontal head pose but directed their gaze sharply downward or to the periphery, the system correctly flagged the image based on ICAO biometric requirements, though the specific failure metadata now explicitly distinguishes between "Pose Deviation" and "Gaze Deviation" to aid user remediation.

This granular error breakdown ensures that the structured JSON reports provide actionable, context-aware feedback rather than generic failure states, directly addressing the root causes of non-compliance.

Standards Compliance Validation

Output validation was conducted against ICAO Doc 9303 [1] and ISO/IEC 19794-5 [2] photographic requirements. All geometric thresholds were programmatically enforced, with the system achieving an average head-to-frame ratio of 72% ± 6% and eye-line positioning at 54% ± 4% from the top edge across compliant inputs. Background uniformity was validated via grayscale variance sampling, with 91% of compliant portraits maintaining variance $\leq$150.0, confirming adherence to light-background specifications. Lighting consistency checks effectively filtered 18% of Hard-tier inputs exhibiting underexposure or high-contrast shadows that would fail automated biometric extraction. While the validator successfully automates dimensional, positional, and environmental compliance checking, the recent integration of exact 3D head pose estimation via cv2.solvePnP has achieved sub-degree validation accuracy. Future iterations will build upon this foundation by incorporating automated gaze direction tracking and illumination uniformity mapping, as recommended in recent biometric framing literature [3], [4].

Discussion & Limitation

The proposed compliance validator demonstrates that rule-based geometric analysis, when integrated with modern neural landmark extraction and dual-interface deployment, can effectively automate identity document photography verification. By unifying MediaPipe face detection, configurable ICAO and ISO threshold enforcement, and structured metadata reporting into a single architecture, the system addresses key fragmentation points in existing workflows. The dual-interface design ensures accessibility across both end-user and developer contexts, while thread-safe inference

and graceful fallback mechanisms enhance operational reliability in production environments.

Despite these strengths, several limitations warrant consideration. First, while exact 3D head pose is now accurately computed via solvePnP, the system does not yet decouple head orientation from gaze direction. Subjects may maintain a perfectly frontal head pose but direct their gaze sharply downward or to the periphery, which violates ICAO biometric requirements but currently passes the strict pose check. Second, the MediaPipe face landmarker exhibits reduced confidence under extreme off-axis poses, heavy occlusions, or low-resolution inputs, potentially triggering false-negative compliance flags. Third, the system does not yet enforce automated validation of gaze direction or illumination uniformity, which are critical components of international biometric photography standards. Finally, CPU-only inference latency may constrain high-throughput batch processing in resource-limited deployments without GPU acceleration or model quantization.

These limitations are mitigated through structured error handling, configurable tolerance thresholds, and transparent compliance reporting. When landmark detection fails, the pipeline immediately logs a structured warning and returns a non-compliant verdict rather than producing unreliable measurements. The modular architecture also enables seamless substitution of detection engines or integration of advanced pose estimation libraries without disrupting the core validation logic. Privacy and ethical considerations are addressed through ephemeral processing: all image data remains in memory during inference, no biometric templates are stored, and structured logs capture only metadata and compliance flags, making the system suitable for privacy-compliant identity workflows.

Conclusion & Future Wor

This paper presented an automated, open-source compliance validator that programmatically enforces international requirements for identity document portraits. By integrating the modern MediaPipe Tasks API with rule-based geometric checks, environmental assessments, and actionable recommendation generation, the system bridges the gap between research-grade computer vision and production-ready identity verification pipelines. The dual-deployment architecture, featuring a cross-platform desktop interface and a stateless REST API, ensures broad accessibility, while structured JSON reporting and thread-safe inference support auditability and scalability. Evaluation across a curated dataset demonstrated high overall compliance detection accuracy with sub-second processing latency, validating the pipeline suitability for institutional and resource-constrained environments.

Future work will focus on three primary directions. First, building upon the recently integrated cv2.solvePnP pose estimation, future iterations will decouple head

orientation from gaze direction tracking using specialized iris-segmentation models to achieve full regulatory adherence regarding eye openness and gaze alignment.. Second, model optimization through ONNX export, INT8 quantization, and TensorRT compilation will enable real-time inference on edge devices and low-power hardware. Third, the system will be containerized with Docker and extended with Kubernetes orchestration to support elastic cloud scaling, multi-tenancy, and regional identity preset libraries. Additional enhancements include lightweight transformer-based detectors for fine-boundary preservation, automated DPI and color-space conversion for print readiness, and multi-language interface localization.

The modular, well-documented nature of this validator positions it as a foundational component for next-generation biometric preprocessing, automated document verification, and accessible digital identity systems. By open-sourcing the architecture and deployment frameworks, this work aims to accelerate research and industry adoption of standardized, AI-driven portrait compliance workflows.

References

[1] X. Qin, Z. Zhang, C. Huang, C. Gao, M. Dehghan, and Y. Wang, "U²-Net: Going deeper with nested U-structure for salient object detection," *Pattern Recognition*, vol. 106, p. 107404, Oct. 2020.

[2] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake, "'GrabCut': Interactive foreground extraction using iterated graph cuts," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 309–314, Aug. 2004.

[3] D. E. King, "Dlib-ml: A machine learning toolkit," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 10, pp. 1755–1758, 2009.

[4] D. Gatis, "rembg: Remove background from images using U²-Net," GitHub Repository, 2024. [Online]. Available: https://github.com/danielgatis/rembg

[5] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Machine Readable Travel Documents, Part 3: Specifications for Machine Readable Passports*, Doc 9303, 8th ed. Montreal, Canada: ICAO, 2015.

[6] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2018.

[7] The Pallets Projects, "Flask Web Framework Documentation," 2024. [Online]. Available: https://flask.palletsprojects.com/

[8] Python Software Foundation, "Tkinter—Python Interface to Tcl/Tk," Python 3 Documentation, 2024. [Online]. Available: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html

[9] P. Viola and M. J. Jones, "Robust real-time face detection," *International Journal of Computer Vision*, vol. 57, no. 2, pp. 137–154, May 2004.

[10] S. Wang, J. Li, and M. Zhang, "Deep portrait matting and background replacement: A survey," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 45210–45228, 2023.

[11] OpenCV Developers, “OpenCV: Open Source Computer Vision Library,” 2024. [Online]. Available: https://opencv.org/

Gharyan Journal of Technology 2026), 1(12), 68-84 مجلة غريان للتقنية
Issued by: Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان
www.gjt.scitech-gh.edu.ly

Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316 TIG Welded Tube Joints

Hasan Haji[1] , Hassan Zaied[2], Mohamed Mlyan[3] and Alla Shafter[4]

1- Material Science Department, University of Gharyan , Gharyan, Libya. hahaji8888@gmail.com
2- Material Science Department, University of Gharyan , Gharyan, Libya. hassan.zaid@gu.edu.ly
3- Material Science Department, University of Gharyan , Gharyan, Libya.

Received: 15/06/2026	Accepted:28/07/2026	Publicated: 31/07/2026

الملخص

دراسة تاثير المدخلات الحرارية على وصلات اللحام لانابيب الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي بسمك ثلاثة مليمتر ودلك باستخدام تقنية اللحام بغاز الارجون مع قطب التنغستن .ثم تطبيق ثلاثة مدخلات حرارية مختلفة لغرض المقارنة وهى :0.42 كيلو جول لكل مليمترو0.48 كيلوجول لكل مليمتر و0.54 كيلو جول لكل مليمتر . ولتقييم جودة الوصلات خضعت الى عمليات الكشف المجهرى الى جانب عدد من الاختبارات الميكانيكية متمثلة فى اجراء اختبارات الصلادة والصدم واختبار الشد. خلال مناقشة النتائج تبين ان قيمة اقصى اجهاد شد تزداد بزيادة تيار اللحام حيث بلغت اقصى قيمة 554 ميجاباسكال عند المخل الحرارى 0.48 كيلو جول لكل ميليمتر بينما اقل قيمة للاجهاد كانت عند المدخل الحرارى المنخفض 0.42 كيلوجولكل ميليمتر .فيما يتعلق باختبار الصدم بينت النتائج ان اعلى قيمة للطاقة الممتصة كانت 270 جول عند المدخل الحرارى دات القيمة الوسطى بى 0.48 كيلو جول لكل ميليمتر في حين انخفضت الطاقة الممتصة الى ادنى قيمة عند 110 جول التي سجلت عند المدخل الحرارى 0.54 كيلو جول لكل ميليمتر.من خلال النتائج سالفة الدكر تبين ان المدخل الحرارى 0.48 كيلو جول لكل ميليمتر يمثل الخيارلتحقيق افضل وصلات لحام بخواص ميكانيكيةجيدةوجودة عالية.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي، لحام الارجون بقطب التنغستن والخواص الميكانيكية والبنية المجهرية والمدخلات الحرارية

Abstract

The present work investigates the effect of heat input on the stainless steel welded tube joints using TIG welding technology. Three different heat input of 0.42 kj/mm, 0.48 kj/mm and 0.54 kj/mm have been applied on 3 mm of AISI 316 stainless steel tube to obtain the optimum weld characteristic. Metallographic investigation carried out to

study all welding regions using optical microscope. Moreover, mechanical properties in terms of hardness, tensile strength and impact were conducted to examine the joint integrity. Results showed that the tensile strength increased with increasing the welding current up to stress value of 554 MPa, and then start decreasing. Higher hardness of 80 HRB were observed at HAZ compared to the weld zone.

The results of this work also indicated that joint welded by medium heat input of 0.48 kj/mm, exhibited highest tensile strength of 554 Mpa compared to 0.42 kj/mm with tensile strength of 502 Mpa and 0.54 kj/mm with tensile strength of 525Mpa. The absorbed energy result showed similar trend to tensile strength with highest absorbed of 270 J at medium heat input of 0.48 kj/mm. Lower absorbed energy was recorded of 150 j and 110 J for heat input of 0.42 kj/mm, 0.54 kj/mm, respectively. This could be attributed to relatively finer dendritic size and adequate amount of sigma phase and chromium carbide formation. Result showed that higher heat input led to coarsen the grain size structure and consequent impact on the mechanical properties.

Consequently, a heat input of 0.48 kJ/mm was determined to be optimal, yielding high-integrity, defect-free joints with improved mechanical properties.

Keywords: Austenitic stainless, Gas Tungsten arc welding(GTAW), mechanical properties, Microstructure, heat input.

1. Introduction

Stainless steel has been considered as a very good resistance to general and localized corrosion due to their chromium content. AISI 316 stainless steel type is one kind of the austenitic stainless steels which widely used in various engineering applications due to their excellent properties of high strength, toughness, and corrosion resistance [1].

Gas tungsten arc welding (TIG) is the most common technique used to join stainless steel structures. TIG produces an arc between a non - consumable tungsten electrode and the work piece. An inert gas shields the arc, electrode and molten pool from atmospheric contamination. TIG welding is a popular technique for joining thin materials in the manufacturing industries; it achieves a high-quality weld for stainless steels and non - ferrous alloys. The properties of welds in austenitic steels in general differ from those of the base metal due to, precipitation, austenite decomposition and Segregation of elements during solidification [2]. This process can bring about local

changes in the microstructure, which may later influence corrosion resistance and mechanical properties [3].

There are some welding process problems, which affect the quality and property of welded joint in the welding of 316 stainless steel. The problems such as hot cracking, carbide precipitation phase and sigma phase can reduce significantly the mechanical properties of these welded joints. Selection of suitable welding parameters and proper material is so important to control the mentioned problems. Therefore, there is a need to find the optimization heat input of TIG welding process on 316 stainless steel to reduce welding defects and to achieve better mechanical properties. The influences of heat input as consequence of welding current on the morphology, microstructure of welded joints of 316 stainless steel sheets have been studied. This study aims to systematically evaluate the influence of heat input during TIG welding on the microstructural evolution and consequent mechanical properties of AISI 316 stainless steel tube joints.

Navid et al [4] investigated the effect of welding current parameter on the 316 stainless steel pipe welded joints using TIG welding process. Tensile test and Vickers hardness carried out for each operation condition. It has been reported that as the welding current increased the heat input also increased resulting in lower chromium carbide and higher sigma phase formation in the welded joints. The results indicated that embrittlement of the stainless steel increased with the formation of sigma (σ) phase, and it were concluded that at specific welding current, the sigma phase distribution and the carbides precipitation phase resulted in lower hot cracking in the weld zone and HAZ.

The effect of the heat input on the produced weld microstructure and the mechanical properties of TIG welded AISI 316 stainless steel joints was studied by Karthick et al [5]. TIG welding process was conducted at three levels of heat input of 2.563, 2.784 and 3 KJ/mm. It has been concluded that heat input has dramatically effect on the UTS, hardness and the microstructure. It has been also reported that tensile strength was increased from 495 MPa to 637 MPa using the medium heat input welding process.

Ahmed et al. [6] investigated the effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of AISI 316 stainless steel plates using three different welding currents of 80 A, 100 A, and 130 A. Their results showed that both the ultimate tensile strength (UTS) and yield strength decreased with increasing heat input. This reduction

in strength was attributed to grain coarsening in the weld zone and heat-affected zone (HAZ). Furthermore, it was concluded that the hardness values in the weld zone were significantly lower than the base metal and HAZ, owing to the increased grain size in the weld zone with increasing heat input.It is clearly indicated that, increasing the heat input decreases the cooling rate of the welding zone. Consequently, the welding temperature was above the austenite transformation temperature and the grains grew to form overheated coarse grain structure. The hardness values were decreased with increasing the heat input. The highest hardness value was obtained at sample made at 80A.

TIG welding parameters including filler metal and applied current were evaluated of welded joints made from 304 and 304L stainless steels by characterizing the microstructure and mechanical properties by Rasha et al [7]. Two different currents of 70A and 80A and two dissimilar filler electrodes of ER304 and ER 309 were used. Result showed that specimen made 80A with ER304 exhibited maximum tensile strength of 692 Mpa and accordingly selected as the optimum operation condition. Microstructure results showed the formation of dendritic structure of homogeneously distributed ferrite and austenite at the weld zone.

2. Experimental work

2.1Materials

AISI 316 stainless steel tubes with diameter of 30mm and 3mm thickness were used as a base material. Table (1) shows the chemical composition of the base material. Filler wire solid electrode of ER316 with 1.5 mm diameter was used.

Table (1) Chemical Composition of 316 Stainless Steel Tube in Wt%.

Element	Fe Balance	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
wt (%)	66.2	0.11	0.254	1.65	0.007	0.008	17.2	2.12	11.5	0.192

2.2 Operation conditions

The steel tube was sectioned into six pieces. Full penetration V-groove with grove angle of 30◦ was machined. Then, welding carried out using GTAW process at low,

medium and high heat inputs. Three different heat inputs were selected corresponding to different currents of 70A,80A and 90A of low, medium and high heat input ,respectively. All welding processes performed at Tajora welding center using TIG welding process. Visual inspection was carried out during and after welding processes to ensure that all welds performed with good integrity and defects free. Samples designated as LH (low heat), MH (medium heat) and HH (high heat). Figure (1) shows the welded samples under different levels of heat inputs after TIG process. Each specimen was welded under specified operating conditions and then cut into strips for further investigation. Gas Tungsten Welding parameters are giving in Table (2) a and b.

Table (2) a. Welding parameters

Welding type	**TIG**
Shielding gas	Argon
Tungsten electrode	2.4
Filler	ER 316

Table (2) b. Welding parameters

Heat input rang (KJ/mm)	**Heat input value (KJ/mm)**	**Welding current (A)**	**Welding voltage (V)**
Low heat	0.42	70	12
Medium heat	0.48	80	12
High heat	0.54	90	12

Figure (1) 316 Stainless steel welded specimens

2.3 Characterization

2.3.1 Metallography testing

For microstructural characterization, three specimens were sectioned from each heat-input condition. All specimens were extracted perpendicular to the welding direction to ensure consistent observation of the weld zones. The samples were prepared using standard metallographic procedures, involving sequential grinding with silicon carbide papers of grit sizes ranging from 200 to 1000, followed by polishing with alumina suspensions of 9 µm, 6 µm, and 3 µm to achieve a mirror-like surface finish.

Subsequently, the polished specimens were etched at room temperature using a mixed acid solution composed of hydrochloric acid (HCl), nitric acid (HNO_3), and glycerin to reveal the microstructural features.

2.3.2 Mechanical tests

Different tests has been conducted including tensile test, charpy test, and microhardness. Three tensile test samples of each heat input condition were machined in accordance to ASTM A370-05 (E8) standard as shown in Figure (2)[8].

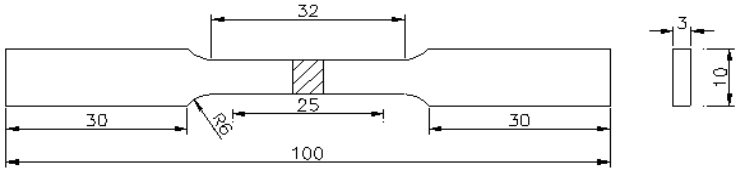


Figure (2) Tensile test standard sample [*ASTM-E8*]

A hardness measurements were taken for each condition on the base metal zone, heat affected zone (HAZ) and weld zone (WZ) using Rockwell hardness. Three measurements were taking for each welding region. Two specimens of each heat input were also prepared for Charpy test in accordance to ASTM standards as illustrated in Figure(3).

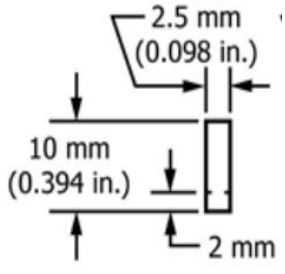
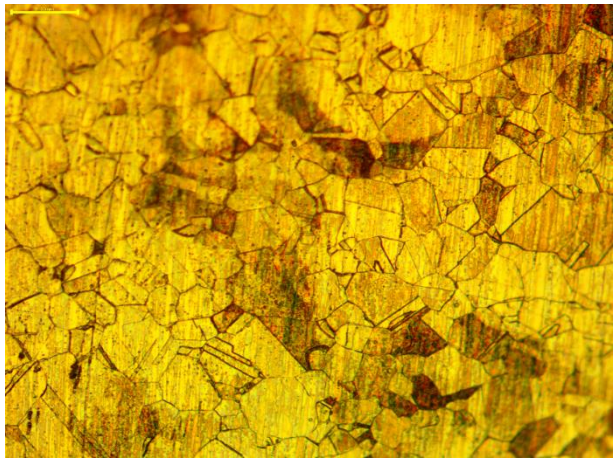


Figure (3) Standard subsize charpy specimen [ASTM A370-05]

3.1 Microstructure result

Figure (4) shows the microstructure of the optical welding regions of the sample welded at low heat input of 0.42KJ/mm. Figure (4 a) shows a typical micrograph of base metals. The morphology of the base material can be observed, which is evidence of the austenitic microstructure of AISI 316 stainless steel, forming what is known as twinning upon thermal and mechanical treatment. Weld samples can be divided into three zones of weld metal zone, heat affected zone and unaffected zone.



a

b

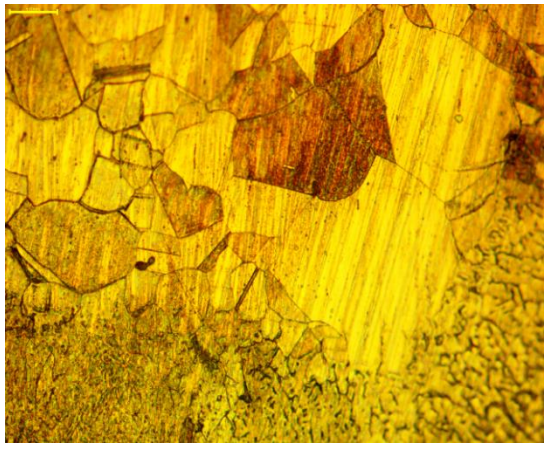
Figure (4) Optical microstructure of sample welded at 0.42 kj/mm, a) Base metal microstructure, b) HAZ microstructure (magnification of 400)

Figure (4 b) displays HAZ optical microstructure. HAZ region is next to the metal weld zone that does not melt and is heated to a high enough temperature for sufficient time for grain to grow. Peak temperature cycles, time interval at higher

temperature and the subsequent cooling rate have significant effect on the grain size and consequent properties.

Figure (5 a) displays the microstructure of the fusion boundary of the melt weld metal(WM) region, which is a mixture of base metal and filler material and the HAZ. According to the temperature distribution from the weld center to the base metal, the microstructure could be divided into three regions; namely fusion zone, over heated zone, fine grain and unaffected zone. The temperature in the fusion zone is between solidus and liquidus. Further away from the weld zone, the temperature in the overheated zone remained above the austenite formation threshold for a prolonged period, resulting in significant grain growth. Relatively smaller grains were formed between the overheated zone and the base metal due to high cooling rates.

Figure (5b), presents the welded region. The welding microstructure various from dendritic structure at the weld center to columnar dendritic and then to dendritic again toward the HAZ. The microstructure consists of austenite with some dispersions of delta ferrite delineated by twinning lines.



a

b

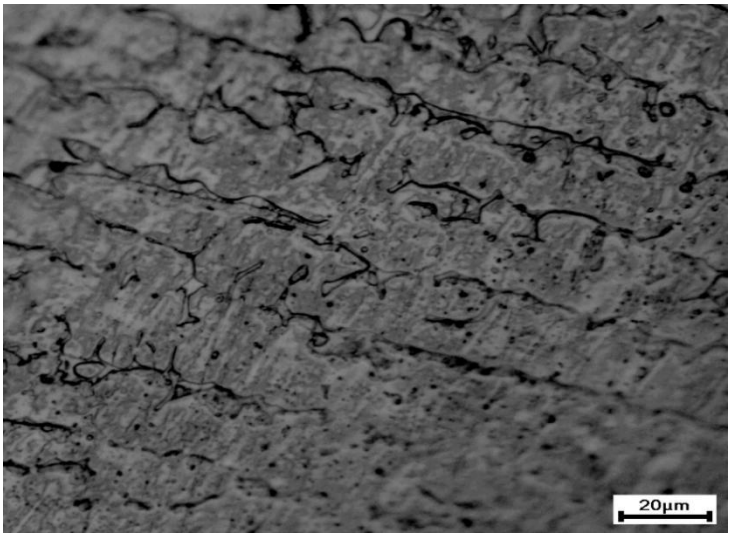
Figure (5) Optical microstructure of weld joint welded at 0.42 KJ/mm,

a)Fusion/HAZ boundaries microstructure, b) Fusion weld metal zone microstructure (magnification of 400)

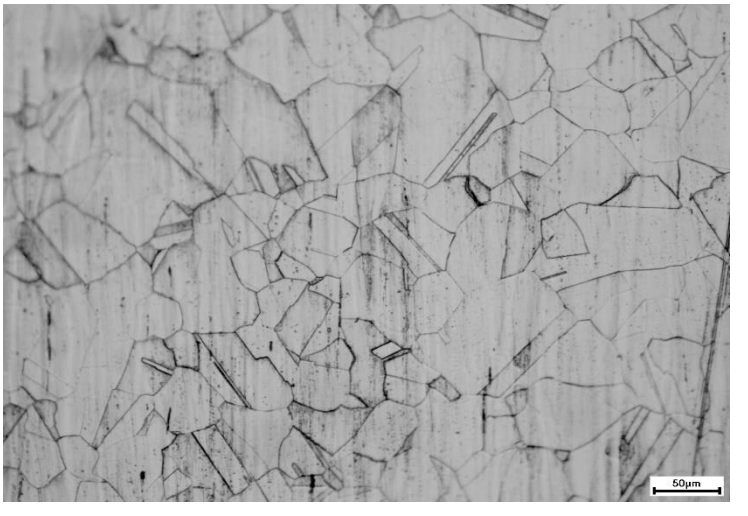
Figure (6a), shows an optical microscope of weld zone of sample made at 0.48 kj /mm (80A), which found to consist of ferrite and austenitic structure containing varying amounts of delta-ferric in the core of the dendrites. At higher heat input, lower volume fraction of delta ferrite was formed in relatively medium dendrite size with relatively small amounts of chromium carbides [9].

Figure (6b), shows an optical micrograph of HAZ of TIG welded joint at 0.48 kj/mm. A coarse-grained structure can be observed in this region near the fusion boundary where there is sufficient time for grain growth.

Similarly, the welded region of the sample made at high heat input of 0.54 Kj/mm exhibits a coarse-grained structure, which was formed due to the decomposition of dendritic grains in a normal austenitic matrix. In the welding zone, a small amount of chromium carbide is expected. The coarse austenite grain sizes in HAZ are developed due to high heat input. A coarse-grained structure also forms at the melting zone boundary, due to the low rate of cooling.



a



b

Figure (6) TIG welded joint at 0.48 kj/mm, a) welded zone, b) Heat affected zone (magnification of 400)

3.2 Tensile test results

The transverse tensile strength test was applied to evaluate the strength and plasticity for high, medium and low heat inputs welding joints. The ultimate tensile strength and the elongation for all TIG welding joints are presented in Table (3). Two specimens were used for each heat input condition, and then the average were taken. The results of mean tensile strength are shown in figure (7). It was found that the maximum tensile strength value of 554 MPa possessed by specimen made at 0.48 Kj/mm (HM), followed by tensile strength of 525 MPa and 502 MPa, which obtained at 0.54 KJ/mm (HH) and o.42 KJ/mm (HL), respectively. Figure (7) shows the average tensile strength values over the heat input conditions. From the figure, it is clearly indicated that as the heat input increased from low heat input value of 0.42KJ/mm to medium heat input value of o.48 KJ/mm, the value of tensile strength was increased of about 10% and then starts decreasing to about 5% for the high heat input of 0.54 KJ/mm. Therefore, the most suitable condition produced at medium heat input of 0.48 KJ/mm. On the other hand, the elongation was decreased by about 4% and 3% for 0.48 KJ/mm and 0.54 KJ/mm, respectively. This could be attributed to the homogenous distribution of smaller amount of carbides precipitates in relatively smaller austenite grain size. Further heat input raise would destruct such balance between sigma phase and carbide formation in addition to austenite grain growth at higher temperature levels. Consequently, higher volume fraction of sigma phase resulted in hot cracks and voids which act as stress concentration sites in the weld zone and HAZ.

Table (3) Tensile strength results of AISI 316 welded joints

Condition, KJ/mm	UTS, MPa	Elongation
0.42	502	42 %
0.48	554	38.5 %
0.54	525	39 %

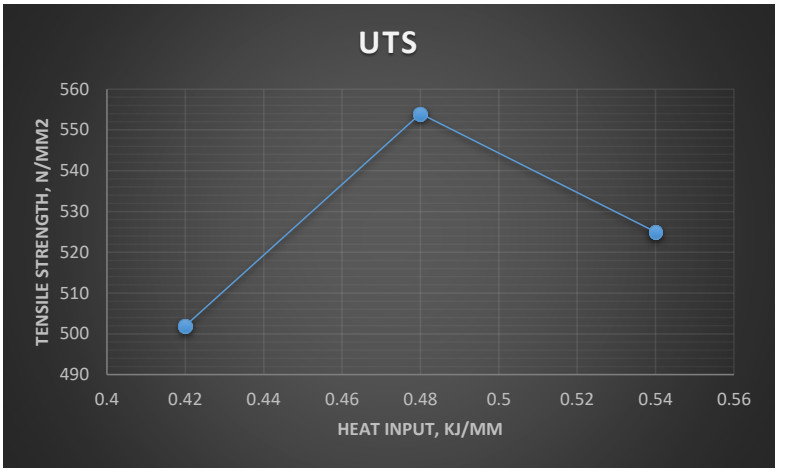


Figure (7) Tensile strength values for welded joints

3.3 Hardness test results

Rockwell hardness testing was performed on samples using a hardness tester. The hardness values were taken over two regions as shown in Table (4). The values of hardness of the HAZ were higher than weld zone as could be seen in Figure (8). The hardness values were increased as heat input increased reaching the maximum hardness value of 80 HRB at 0.54 KJ/mm for weld zone and HAZ.

The hardness values were increased by about 3 % in both regions of weld zone and HAZ, when the heat input increased from 0.42 KJ/mm (HL) to 0.54 KJ/mm (HH). The weld microstructure in term of morphology of dendritic shape and inter-dendritic spacing displays high strength, ductility and hardness at medium heat input. However, the joint made with highest heat input had relatively large dendritic size and large inter-dendritic spacing. This resulted in loss of strength and toughness. Table (4) displays average hardness taking at HAZ and WZ.

Table (4) Hardness values on the weld metal and HAZ

Heat Input	Weld Zone, HRB	HAZ,HRB
0.42 KJ/mm	77.5	78
0.48KJ/mm	79.5	80
0.54KJ/mm	80	80

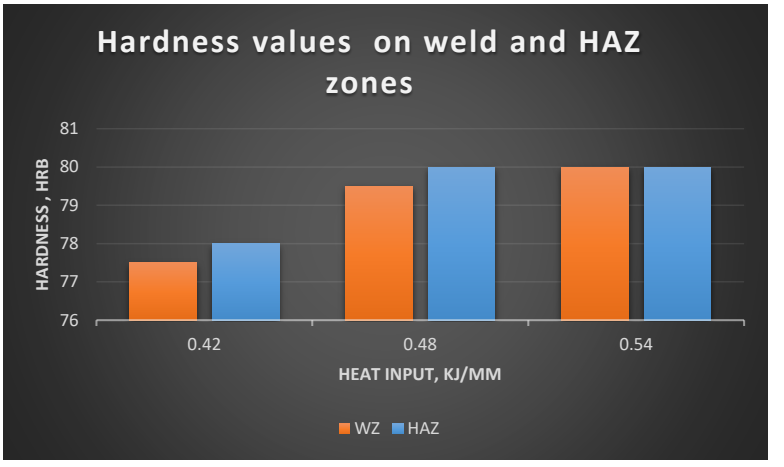


Figure (8) Hardness value of various zones

3.4 Impact test results

Figure (9) shows the results of the Charpy impact test of a 316-steel welded joint prepared by the current state of GTAW Technology. As can be seen from this figure, it is clearly indicated that the thermal heat input in specimen made at medium heat input of 0.48 kJ/mm (80A) exhibited the best shock tolerance, followed by sample made at 0.42 kj/mm (70 A) and the lowest value observed at sample made at 0.54 kj/mm (90 A). The Charpy impact results showed similar pattern with tensile test results indicating that sample made at heat input of 0.48 Kj/mm showed greatest tensile strength and impact toughness. From the results, it is clearly indicated that 316 St St could withstand a specific heat input values without losing strength and toughness. Weld joint was able to absorb higher energy values of 270 J , while the energy decreased as the heat input was increased.

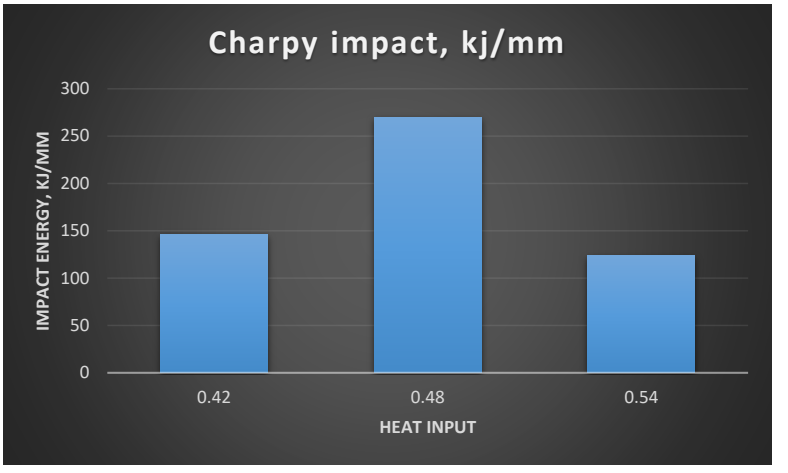


Figure (9) Charpy impact test result of welded joint

4. Conclusion

Heat input is a relative measure of the energy transferred during welding process. The cooling rate, peak temperature, weld zone grain size and material properties are influenced by the heat input. The effect of heat input was examined on the stainless steel welded joints using TIG process. This can be summarized as following:

1. The lower heat input led to lower interdendritic spacing, which increased the mechanical properties. However, higher heat input resulted in grain growth and possible sensitization in the HAZ [10].

2. Welding heat input of 0.48 kj/mm has been selected as the most suitable welding method used to weld the 316 stainless steel tube. The weld joint microstructure found to have a balance between carbides precipitation phase in welding zone and HAZ volume fraction and distribution decreasing of hot cracking and carbide .

3. The Ultimate tensile strength and impact toughness increased as the heat input increased to a specific value and then start decreasing. The maximum tensile strength value of 554 MPa possessed by specimen weld at 0.48 kj/mm, followed by tensile strength of 525 MPa and 502 MPa which obtained at 0.54 kj/mm and 0.42 kj/mm, respectively. The impact absorbed energy for exhibited similar tensile strength behavior. The maximum absorbed energy was 270 J.

4.The hardness of the HAZ was higher than hardness in the weld zones for all operation conditions. Hardness values were increased as the heat input increased reaching hardness value of 80 HRB and that could be attributed to balance of grain size coarsening and formation of ferrite carbides .

References

1. Nancy Badoo,"structural Stainless Steel", by Amrican institute of steel construction. 2013. Page 10, 11 and 12.

2.A.Yousaf, R.Asim, “A Review on Welding of AISI 316L Austenitic Stainless Steel”, International journal of Engineering and Information Systems,Vol.5,Issue 1,Jan 2021,pages:41-44.

3. A John Wiley & Sons, "Welding Metallurgy” Second Edition, 2003 . page 11 to 20.

4. N. Moslemi, N. Redzuan, N.Ahmad, Tang Nan Hor "Effect of Current on Characteristic for 316 Stainless Steel Welded Joint Including Microstructure and Mechanical Properties", 12th Global conference on sustainable Manufacturing ,Malyzia 2015,pages :560-564.

5. B. Karthick, L.Shrihari, M. Sakthivel, S. Shriram , V Silambarasan,"Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 316 Stainless Steel Joints" ,international research journal on advanced science, Vol :2,August 2020.

6. Ahmed, R., Essa, A.R.S., EL-Nikhaily, A., Ahmed, E.,"Effect of Heat Input and Shielding Gas on the Performance of 316 Stainless Steel Gas Tungsten Arc Welding", Egypt. 2020.

7. R.Afify, H. Abdeel, M. Gamil, “Investigating TIG ARC Welding for Austenitic Stainless Steel 304 and 304L”, Engineering Research Journal, January 2024,pp181-188.

8. ASTM International, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM A370, West Conshohocken, PA, USA, 2017.

9. S.Okan, E.Ylmaz, “Investigation of the effects of filler metal and number of passes used in AISI 304 stainless steel-copper joints by TIG welding”, International institute of Welding, Jan,2023.

10. A.Hesham, I.EL-Mahawlli, M.Koussy”Effect of GTAW Welding Current on the Quality of 304LAustenitic stainless steel” International Journal of Materials Technology, volume 3, issue 2 ,june 2023 pages10-18.

مجلة غريان للتقنية

مجلة علمية محكمة تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان

العدد الثاني عشر، يوليو 2026

الترقيم الدولي: ISSN (Print) 2518-5993

ISSN (Online) 2521-9308

رقم الإيداع القانوني للمجلة بدار الكتب الوطنية

(116 / 2016 دار الكتب الوطنية)

الموقع الالكتروني للمجلة: gjt.scitech-gh.edu.ly

مجلة غريان للتقنية

مجلة علمية محكمة

تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان

العدد الثاني عشر يوليو 2026 م.

الترقيم الدولي: ISSN (Print) 2518-5993

ISSN (Online) 2521-9308

رقم الإيداع القانوني للمجلة بدار الكتب الوطنية

(116 / 2016 دار الكتب الوطنية)

تنويه

1- إن الآراء والأفكار والمعلومات العلمية وغيرها مما ينشر في المجلة بأسماء كتابها تكون على مسؤوليتهم ولا تتحمل المجلة المسؤولية عن ذلك.

2- توجه البحوث والمقالات العلمية والمراسلات الأخرى إلى هيئة تحرير مجلة غريان للتقنية على العنوان التالي :

البريد الإلكتروني : **info@gjt.scitech-gh.edu.ly**

هاتف : **0913506053.**

3- يتم الاتفاق على الإعلانات بالمجلة مع هيئة التحرير.

4- حقوق الطبع والنشر محفوظة ويسمح باستعمال ما ينشر في هذه المجلة بشرط الإشارة إلى مصدره.

مجلة غريان للتقنية

مجلة علمية محكمة تصدر سنوياً عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان

هيئة التحرير :	
د. ميلود محمد يونس	المشرف العام
د. احمد رمضان خبيز	رئيس التحرير
أ. د. عبد العاطي الهادي العالم	عضواً
أ. محمد رجب بيوض	عضواً
أ. محمد محمود الغرياني	عضواً
أ. عبدالباسط محمد على	عضواً
أ. د. ياسين أسد مهنى الراجحى	عضواً
أ. د. عبدالسلام محمد علي	عضواً

فهرس المحتويات

الأوراق البحثية باللغة العربية	الصفحة
مقدمة وكلمة المجلة	**7**
تحليل معايير التحول الرقمي في ضوء التطور المرحلي للأدوات التقنية في النظام المعلوماتي، دراسة حالة بيت التمويل الكويتي(2015–2024) قيس عيسى مصطفى غومة	**35-8**
أثر التكامل والشراكة المصرفية على إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني في القطاع المصرفي الليبي سعود المهدي بن زايد، سالم اشتيوي الغويل، هدى البشير التويرقي	**60-36**
نمذجة أداء بركة شمسية تحت ظروف طرابلس المناخية مع تصور فيزيائي مطوِر نور الدين عبدالحفيظ عبود	**79-61**

English Research Papers	Page
Simulation of the separation process of Toluene/n-Heptane mixture using the organic solvent N-methyl-2-pyrrolidone by Aspen Hysys software Ezeddin H. Alshbuki , Mufida Mohamed Bey	9-24
A Formal Architecture for Emergent Requirements in AI-Amplified Software Engineering Abdelaziz O Abdelsalam	25-50
Automated ICAO/ISO Compliance Validator for ID Portraits Mohanned Naji Albibas, AL-Mokhtar Abdullah Faraj, Musa Faneer	51-67
Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316 TIG Welded tube Joints Hasan Haji, Hassan Zaied, Mohamed Mlyan and Alla Shafter	68-84

مقدمة العدد الثاني العاشر

بداية نحمد الله ونثني عليه أن وفقنا ويسر لنا إصدار العدد الثاني عشر من مجلة غريان للتقنية، التي تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية، عندما رأت إدارة المعهد أن تكون للمعهد مجلة علمية محكمة، فصدر قرار بذلك عام 2015 م، وباشرت هيئة التحرير مهامها فصدر العدد الأول عام 2016 م، في نسخة ورقية بالرغم من الصعوبات والتحديات التي واجهتنا آنذاك.

وقد آلت إدارة المعهد وهيئة التحرير على نفسها أن تكون سمعة المؤسسة وحرفية العمل والرصانة والأمانة العلمية أهم الأسس في العمل، وتم الاعتماد على مجموعة متميزة من المحكين ممن لهم خبرة وكفاءة في مجالات تخصصاتهم، وبالفعل كانت الخطوات الأولى في مسيرة المجلة التي كانت الوحيدة في التعليم التقني والفني في الجبل الغربي، إلى جانب بعض المجلات الأخرى في التعليم العالي.

كان التركيز على جودة المحتوى العلمي للبحوث أكثر من العدد الكبير من الورقات البحثية في العدد الواحد، وقد تنوعت البحوث التي تم نشرها، وكانت من الباحثين من المعهد ومن المؤسسات داخل مدينة غريان وما حولها ومن جهات ومؤسسات في مناطق بلادنا ليبيا، لقد آمنا منذ البداية بأهمية البحث العلمي ودوره في المساهمة في تقديم المقترحات والحلول العلمية الناجعة للمشاكل والصعوبات التي تواجه مؤسساتنا في العديد من القطاعات، وأصبحت البحوث متاحة للوصول إليها للاستفادة منها في ذلك.

إن الدول المتقدمة لم تبلغ المكانة المرموقة إلا بالعلم والجهد وتسخير الإمكانيات والموارد، للتطور والتقدم وتحقيق تنمية مستدامة فيها تستفيد منها الشعوب، لقد اجتهدنا رغم صعوبة العمل في المجلات العلمية المحكمة من أجل أن تتبوأ مجلة غريان للتقنية المكانة التي تستحقها بين المجلات العلمية المحكمة المحلية، فكنا نقوم بتقييم مراجعة الأداء و قد دخلت المجلة معامل التأثير العربي لعدد من السنوات، و كانت قيمة المعامل في تحسن، ثم دخلت العام الماضي 2025 م، ضمن دليل المجلات الليبية الالكتروني DOLJ(دولج)، و صنفت في الربع الرابع Q4، و نسعى جاهدين لأن يرتفع تصنيف المجلة هذه السنة، بعد الأخذ بالملاحظات في تقييم المجلة.

إننا لا نزعم أننا الأفضل، لكننا قبلنا التحدي ونسعى جاهدين بكل الإمكانيات المتاحة لنكون مجلة متميزة ومنبرًا مهمًا للباحثين والمتخصصين لنشر بحوثهم، خاصة أنها تصدر عن مؤسسة علمية عريقة تجاوز عمرها ثلاثة وثلاثون عامًا، تخرج منها نحو ثلاثة آلاف خريج وخريجة في العديد من التخصصات أثبتوا تميزهم في سوق العمل ورفعوا اسم المعهد عاليًا بين المؤسسات الأخرى.

يحفل العدد الثاني عشر من مجلة غريان للتقنية بالعديد من البحوث و الورقات العلمية التي تمتاز بالإبداع و التنوع من باحثين من مؤسسات تعليمية متعددة ، و تجدد هيئة تحرير المجلة دعوتها للباحثين والمتخصصين الراغبين في المشاركة بورقات علمية و بحوث مبتكرة في مجلة غريان للتقنية ، أن يقوموا بزيارة موقع المجلة الالكتروني، للتعرف على المجلة و الاطلاع على النسخ الالكترونية لجميع الأعداد الصادرة و الورقات البحثية المنشورة و عن شروط النشر و كل ما يهمهم، كما نفتح المجال أمامهم لتقديم المقترحات و النقد البنّاء، لأننا ندرك تمامًا ما لذلك من أهمية في سبيل تطوير المجلة وتحقيق أهدافها .

هيئة تحرير المجلة

بحوث ودراسات باللغة العربية

Gharyan Journal of Technology (2026), 1(12), 8-35 مجلة غريان للتقنية
Issued by: Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان
www.gjt.scitech-gh.edu.ly

تحليل معايير التحول الرقمي في ضوء التطور المرحلي للأدوات التقنية في النظام المعلوماتي

دراسة حالة بيت التمويل الكويتي(2015-2024)

قيس عيسى مصطفى غومة

جامعة غريان – كلية العلوم – قسم الحاسب الآلي

ghoomagaiss@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2026/05/15 تاريخ القبول: 2026/05/31 تاريخ النشر: 2026/07/31

Abstract:

The study aimed to analyze the availability of digital transformation standards throughout the phased development of the technological tools used within the information system of Kuwait Finance House during the period (2015–2024). The study adopted a descriptive-analytical approach based on the case study method through the analysis of the published annual reports of Kuwait Finance House.

The findings indicate that digital transformation within KFH's information systems followed a cumulative evolutionary trajectory characterized by four main stages: basic digitization, functional expansion and integration, digital maturity and smart services, and comprehensive digital transformation. The results reveal a gradual advancement in the type of technological tools, the functional scope of their use, the degree of system integration, and the supporting technological infrastructure, reflecting a shift in the role of information systems from operational support to a strategic component in decision support and institutional transformation.

Keywords:

Digital Transformation, Banking Information Systems, Islamic Banks, Digital Transformation Criteria, Technological Tools, Kuwait Finance House.

ملخص البحث

هدفت الدراسة إلى تحليل توافر معايير التحول الرقمي أثناء التطور المرحلي للأدوات التقنية المستخدمة داخل النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي خلال الفترة (2015–2024)، اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي–التحليلي القائم على دراسة الحالة، من خلال تحليل التقارير السنوية المنشورة لبيت التمويل الكويتي.

توصلت الدراسة إلى أن التحول الرقمي في النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي اتخذ مسارًا تطوريًا تراكميًا، مرّ بأربع مراحل رئيسية هي: مرحلة الرقمنة الأساسية، ومرحلة التوسع والتكامل الوظيفي، ومرحلة النضج الرقمي والخدمات الذكية، ومرحلة التحول الرقمي الشامل. وأظهرت النتائج وجود تطور تدريجي في نوع الأدوات التقنية، ونطاق استخدامها الوظيفي، ودرجة تكامل الأنظمة الرقمية، وطبيعة البنية التحتية الداعمة، مما يعكس انتقال النظام المعلوماتي من دور داعم للعمليات إلى مكوّن محوري في دعم القرار والتحول المؤسسي.

الكلمات المفتاحية

التحول الرقمي، نظم المعلومات المصرفية، معايير التحول الرقمي، المصارف الإسلامية، الأدوات الرقمية، بيت التمويل الكويتي.

مقدمة البحث

تشهد المؤسسات المصرفية في السنوات الأخيرة تحولات متسارعة بفعل التطور الكبير في تقنيات المعلومات والاتصال، مما أدى إلى توسع الاعتماد على الحلول الرقمية في تقديم الخدمات وإدارة العمليات، وتحوّل التحول الرقمي إلى عنصر أساسي في بناء الأنظمة المعلوماتية الحديثة داخل المصارف.

وتكتسب المصارف الإسلامية خصوصية في هذا السياق، إذ يرتبط التحول الرقمي فيها بمدى توافق التقنيات الحديثة مع الضوابط الشرعية والتنظيمية، مما يجعل مساره أكثر تعقيدًا مقارنة بالمصارف التقليدية.

كما أن فهم التحول الرقمي لا يقتصر على تبنّي التقنيات، بل يتطلب تحليل مستوى تكاملها داخل النظام المعلوماتي ودورها في دعم العمليات واتخاذ القرار، حيث تختلف مراحل التحول باختلاف الأدوات المستخدمة ودرجة تكاملها وقيمتها المضافة.

ورغم تعدد الدراسات في هذا المجال، إلا أن معظمها ركّز على النتائج مثل الأداء المالي ورضا العملاء، مع محدودية الاهتمام بتحليل التحول الرقمي من داخل النظام المعلوماتي وتتبع تطور أدواته بشكل مرحلي.

وانطلاقًا من ذلك، اختارت الدراسة بيت التمويل الكويتي بوصفه حالةً للدراسة خلال الفترة (2015–2024)، نظرًا لما توفره تقاريره من بيانات تسمح بتتبع تطور الأدوات التقنية داخل نظامه المعلوماتي.

وتهدف الدراسة إلى تحليل هذا التطور وبيان مدى توافر معايير التحول الرقمي عبر مراحله المختلفة اعتمادًا على المصادر الرسمية، من خلال الإجابة عن كيفية تجلّي هذه المعايير داخل النظام المعلوماتي للمصرف، بما يسهم في فهم أعمق لمسار التحول الرقمي في المصارف الإسلامية.

الدراسات السابقة

أولاً: الدراسات العربية

1. شبابحي سفيان وآخرون (2024)

هدفت الدراسة إلى تحليل واقع التحول الرقمي في بنك الراجحي وبنك قطر الإسلامي، مع التركيز على مستوى تبنّي الحلول الرقمية والتحديات المرتبطة بها. واعتمدت على المنهج الوصفي– التحليلي، وأظهرت النتائج وجود تقدم ملحوظ في رقمنة العمليات المصرفية بما أسهم في تحسين كفاءة الأداء و تجربة العملاء. ورغم أهمية الدراسة، فإنها ركزت على نتائج التحول الرقمي وآثاره التشغيلية دون التعمق في تحليل مكونات النظام المعلوماتي أو تتبع تطور الأدوات التقنية بصورة مرحلية، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته.

2. الشتيوي(2024)

تناولت دراسة الشتيوي أثر التحول الرقمي على أداء المصارف الإسلامية الليبية، مع التركيز على مجالي المحاسبة والمراجعة، واعتمدت على المنهج الاستقرائي–التحليلي. وأظهرت النتائج أن التقنيات الرقمية أسهمت في تحسين كفاءة الأنظمة المحاسبية ودقة المعلومات المالية وجودة التقارير، مع التأكيد على أهمية تطوير البنية التحتية وتنمية الكفاءات البشرية.

وعلى الرغم من ذلك، ركزت الدراسة على الآثار الوظيفية للتحول الرقمي دون التعمق في تحليل البنية التقنية للنظام المعلوماتي أو تتبع تطور الأدوات الرقمية بصورة مرحلية، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته.

3. محمد، ط. ف(2023) .

تناولت دراسة محمد أثر تقنيات التحول الرقمي على فاعلية نظم المعلومات المحاسبية في المصارف التجارية الليبية، مع التركيز على المحاسبة السحابية والبيانات الضخمة والأمن السيبراني. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي – التحليلي، وأظهرت النتائج وجود أثر إيجابي لهذه التقنيات في تحسين كفاءة نظم المعلومات المحاسبية وموثوقية المعلومات المالية.

ورغم أهمية الدراسة، فإنها ركزت على قياس الأثر الوظيفي للتقنيات الرقمية دون تحليل مستوى تكامل الأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي أو تتبع تطورها المرحلي، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته من خلال ربط الأدوات التقنية بمعايير التحول الرقمي عبر الزمن.

4. قاسم (2024)

تناولت دراسة قاسم واقع التحول الرقمي في القطاع المصرفي الليبي، مع التركيز على مستوى الخدمات الرقمية واستجابة العملاء لها في ظل الثقافة الرقمية السائدة. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي–التحليلي، وأظهرت النتائج أن المصارف الليبية ما تزال في مراحل مبكرة من التحول الرقمي، مع محدودية في تنوع الخدمات الرقمية وضعف التفاعل معها، إضافة إلى ضرورة تطوير البنية التحتية التقنية وتعزيز الوعي الرقمي. اهتمت هذه الدراسة بتشخيص مستوى النضج الرقمي، إلا أنها ركزت على الخدمات الرقمية ورضا العملاء دون تحليل مكونات النظام المعلوماتي أو تتبع تطور الأدوات التقنية داخله، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته بصورة تحليلية ومرحلية.

ثانياً: الدراسات الإجنبية

1. Papathomas, A. (2023)

تناولت دراسة Papathomas التحول الرقمي في المؤسسات المالية من منظور تطوري، مع التركيز على مراحل النضج الرقمي ومعايير قياسه وعلاقته بالأداء المؤسسي. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، وأوضحت أن التحول الرقمي يمر بمراحل تبدأ بالتكيف مع التقنيات، ثم التوسع في استخدامها ، وصولًا إلى التحول الكامل في نماذج العمل.

قامت الدراسة بتأطير مراحل التحول الرقمي إلا انها تناولت الموضوع بصورة عامة. دون تحليل الأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي أو تتبع تطورها في بيئة مصرفية محددة، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته بصورة تطبيقية ومرحلية .

2. Yasmina, L. (2023)

تناولت دراسة Yasmina أثر التحول الرقمي في البنوك التجارية وانعكاسه على إدارة علاقات العملاء، مع التركيز على دور التقنيات الرقمية في تحسين جودة التفاعل وتطوير الخدمات ورفع مستوى الرضا والولاء. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي–التحليلي، وأظهرت نتائجها أن تبنّي الحلول الرقمية يسهم في تحسين كفاءة التواصل وتسريع تقديم الخدمات، مع ارتباط فاعلية إدارة العلاقات بدرجة تكامل الأنظمة الرقمية.

ركزت الدراسة على الأثر الخدمي للتحول الرقمي دون التعمق في تحليل البنية التقنية للنظام المعلوماتي أو تتبع تطور الأدوات الرقمية عبر الزمن، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته.

3. Boudaoud, B. (2023)

تناولت دراسة Boudaoud دور التحول الرقمي في تحسين أداء المصارف، من خلال التركيز على أثر التقنيات الرقمية في رفع الكفاءة التشغيلية وتطوير جودة الخدمات وتعزيز القدرة التنافسية. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي–التحليلي، وأظهرت النتائج أن التحول الرقمي ساهم في تسريع العمليات، وخفض التكاليف التشغيلية، وتحسين جودة الخدمات، إلى جانب تعزيز مرونة البنوك واستجابتها للتغيرات، لكنها لم تهتم بتحليل النظام المعلوماتي أو تتبع التطور المرحلي للأدوات التقنية داخله، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته من خلال تحليل مكونات التحول الرقمي بصورة منهجية ومرحلية .

4. Mohamed, T. F. (2025)

تناولت دراسة **Mohamed** أثر تقنيات التحول الرقمي على فاعلية نظم المعلومات المحاسبية في المصارف التجارية الليبية، مع التركيز على تطبيقات مثل المحاسبة السحابية والبيانات الضخمة والأمن السيبراني. واعتمدت الدراسة على المنهج–الوصفي التحليلي، وأظهرت النتائج أن هذه التقنيات تسهم في تحسين كفاءة نظم المعلومات المحاسبية من خلال رفع سرعة معالجة البيانات و تحسين دقتها وتعزيز موثوقية المخرجات، مع التأكيد على أهمية التوسع في الحلول السحابية وتطوير مستوى الأمن السيبراني. إلا أنها بقيت موجهة نحو قياس الأثر الوظيفي للتقنيات دون تحليل تكاملها داخل النظام المعلوماتي أو تتبع تطورها المرحلي، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته من خلال تحليل البنية التقنية للتحول الرقمي بصورة منهجية.

الفجوة البحثية

تشير الأدبيات السابقة إلى أن معظم الدراسات ركزت على قياس آثار التحول الرقمي في القطاع المصرفي من زوايا مختلفة منها الأداء المالي، ورضا العملاء، وكفاءة نظم المعلومات المحاسبية، إضافة إلى الجوانب التنظيمية والشرعية. وتعتمد هذه الدراسات في الغالب على مقاربات وصفية أو كمية تعكس النتائج النهائية للتحول الرقمي أكثر من اهتمامها ببنيته الداخلية. بينما لا يزال تحليل المسار التطوري التدريجي التحول الرقمي من داخل النظام المعلوماتي غير كافٍ في هذه الأدبيات، خاصة فيما يتعلق بتتبع تطور الأدوات التقنية وتكاملها عبر الزمن داخل بيئة مصرفية محددة. كما تفتقر الدراسات إلى ربط هذا التطور بمعايير التحول الرقمي مثل درجة التكامل، ونطاق الاستخدام، ومستوى الترابط بين الأنظمة.

وعليه، تتحدد الفجوة البحثية في غياب دراسات تحليلية مرحلية تتناول تطور الأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي للمصارف الإسلامية وربطها بمعايير التحول الرقمي ربطًا متكاملًا. ومن هنا، تأتي هذه الدراسة لمعالجة هذه الفجوة من خلال تحليل التطور المرحلي للأدوات التقنية في بيت التمويل الكويتي خلال الفترة (2015–2024)، وربطه بمستوى توافر معايير التحول الرقمي.

مشكلة البحث

على الرغم من التوسع في تبنّي التقنيات الرقمية داخل المصارف الإسلامية، إلا أن تحليل التحول الرقمي ما يزال في الغالب يركز على وصف الخدمات الإلكترونية أو قياس آثارها على الأداء ورضا العملاء، دون

التعمق في فهمه كمســـار يتشـــكل داخل النظام المعلوماتي من خلال تطور الأدوات التقنية وتكاملها وأدوارها الوظيفية.

كما تشــير الدراســات في هذا المجال إلى هيمنة التركيز على الجوانب الإدارية والنتائج التطبيقية للتحول الرقمي، مقابل محدودية الدراسات التي تربط بين الأدوات التقنية الفعلية داخل النظام المعلوماتي ومعايير التحول الرقمي عبر الزمن، إضـــافة إلى غياب إطار منهجي يفســـر التطور المرحلي للنظم المعلوماتية بناءً على درجة تكامل هذه الأدوات.

وفي حالة بيت التمويل الكويتي، ورغم ما تشير إليه البيانات المنشورة من تطور في تبنّي التقنيات الرقمية خلال الفترة (2015–2024)، إلا أن هذا التطور لم يُحلل بصـــورة منهجية توضـــح كيفية تجلّي معايير التحول الرقمي داخل النظام المعلوماتي أو تفسير مساره المرحلي.

وتبرز مشــكلة البحث في الحاجة إلى تحليل تطور الأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي وربطه بمعايير التحول الرقمي خلال الفترة (2015–2024)، بما يتيح تفسيرًا أدق لمسار التحول الرقمي داخل المصرف.

بناءً علي ما سبق، تكمن مشكلة البحث في الإجابة على التساؤلات الآتية: –

اولًا: التساؤل الرئيس: –

كيف يتجلى توافر معايير التحول الرقمي في النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي في ضوء التطور المرحلي للأدوات التقنية خلال الفترة (2015–2024)؟

ثانيًا: التساؤلات الفرعية

1. ما هي معايير التحول الرقمي كما تطرحها أدبيات نظم وتكنولوجيا المعلومات في القطاع المصرفي؟
2. كيف يُفسَّر التحول الرقمي بوصفه مسارًا تدريجيًا يرتبط بمستويات النضج الرقمي؟
3. ما هي النماذج أو الأطر النظرية التي يمكن الاســتناد إليها في تحليل مراحل التحول الرقمي وتفســيرها في السياق المصرفي؟
4. ما هي طبيعة الأدوات التقنية المستخدمة داخل النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي خلال فترة الدراسة، وكيف تطور استخدامها عبر المراحل الزمنية؟
5. كيف اتَّسع نطاق توظيف هذه الأدوات من تقديم الخدمات إلى دعم العمليات واتخاذ القرار؟
6. إلى أي مدى شـهدت الأنظمة الرقمية درجة أعلى من التكامل، وهل يمكن رصـد انتقال نحو بيئة تقنية أكثر ترابطًا؟
7. ما هو أثر تطور البنية التحتية التقنية في دعم توافر معايير التحول الرقمي داخل النظام المعلوماتي؟

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى تحليل توافر معايير التحول الرقمي في ضـوء التطور المرحلي للأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي خلال الفترة (2015–2024)، وذلك من خلال:

1. توصيف الأدوات التقنية المستخدمة وتتبع تطورها عبر مراحل زمنية محددة.
2. بيان تطور نطاق توظيف هذه الأدوات من تقديم الخدمات إلى دعم العمليات واتخاذ القرار.
3. فحص درجة تكامل الأنظمة الرقمية ورصد التحول نحو بيئات أكثر ترابطًا.
4. تقويم دور البنية التحتية التقنية في دعم توافر معايير التحول الرقمي.
5. تحديد معايير التحول الرقمي كما تطرحها أدبيات نظم وتكنولوجيا المعلومات المصرفية.
6. تفسير التحول الرقمي بوصفه مسارًا تدريجيًا يرتبط بمستويات النضج الرقمي.
7. توظيف الأطر والنماذج النظرية ذات الصلة في قراءة نتائج التحليل التطبيقي.

أهمية البحث

تتمثل أهمية الدراسة من الجانب العلمي، في مساهمتها في تطوير الدراسات المتعلقة بالتحول الرقمي في نظم وتكنولوجيا المعلومات المصـــرفية، من خلال تقديم معالجة تطبيقية تركز على تحليل تطور الأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي وربطها بمعايير التحول الرقمي. ويكمن ذلك في الانتقال من الدراســات التي تركز على الآثار الخارجية للتحول الرقمي إلى تحليل مرحلي يوضـــح طبيعة الأدوات التقنية، ونطاق اســـتخدامها، ودرجة تكاملها داخل النظام، بما يضيف بعدًا تحليليًا تطبيقيًا نادرَ الطرح في سياق المصارف الإسلامية.

أما أهميتها من الجانب التطبيقي، فتتمثل في توفير إطار تحليلي يمكن الاســـتفادة منه في تقييم مســـار التحول الرقمي داخل الأنظمة المعلوماتية للمصارف الإسلامية، من خلال تتبع تطور الأدوات التقنية عبر الزمن. ويســهم ذلك في دعم تحسـين تكامل الأنظمة الرقمية، وتوجيه قرارات التطوير التقني بما يعزز مسـتوى النضـج المؤسسي للتحول الرقمي داخل المصارف.

حدود البحث

تتمثل حدود البحث فيما يلي:

أولاً: الحدود الموضوعية

تقتصـــر الحدود الموضـــوعية للبحث على تحليل توافر معايير التحول الرقمي في ضـــوء التطور المرحلي للأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي، من خلال دراسة طبيعة الأدوات الرقمية المستخدمة، ونطاق استخدامها الوظيفي، ودرجة تكاملها، ودورها في العمليات المصرفية، وعلاقتها بمستوى التحول الرقمي.

ثانياً: الحدود المكانية

تتمثل الحدود المكانية للبحث في بيت التمويل الكويتي باعتباره حالة الدراسة التي تم اختيارها لتحليل مسار التحول الرقمي داخل نظامه المعلوماتي.

ثالثاً: الحدود الزمنية

تغطي الحدود الزمنية للبحث الفترة الممتدة من عام 2015 إلى عام 2024، وهي الفترة التي شـــهدت تطورًا ملحوظًا في توظيف الأدوات التقنية والخدمات الرقمية داخل بيت التمويل الكويتي.

المصطلحات الإجرائية للبحث

التحول الرقمي(Digital Transformation)

نعني بالتحول الرقمي من الناحية الإجرائية في هذه الدراسة تتبع التطور التدريجي لتوظيف التقنيات الرقمية داخل النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي بما يؤدي إلى زيادة مستوى التكامل الرقمي وتوسيع نطاق استخدام التقنية في دعم العمليات المصرفية واتخاذ القرار (البوشوشة، 2024؛ الشتيوي، 2024؛ Deloitte, 2024) .

النظام المعلوماتي (Information System)

يقصد بالنظام المعلوماتي إجرائيًا مجموعة الأنظمة والتطبيقات والموارد التقنية والبشرية التي استخدمها بيت التمويل الكويتي لجمع البيانات ومعالجتها وتخزينها وتبادلها وتوظيفها في تنفيذ العمليات المصرفية ودعم الإدارة واتخاذ القرار (محمد، 2023؛Hamed, 2024) .

الأدوات التقنية(Digital Tools)

نقصد بالأدوات التقنية إجرائيًا جميع التطبيقات والمنصات والخدمات الرقمية التي استخدمها بيت التمويل الكويتي خلال فترة الدراسة. (قاسم، 2020).

معايير التحول الرقمي(Digital Transformation Criteria)

يقصد بها إجرائيًا مجموعة المؤشرات والأبعاد المعتمدة لتقييم مستوى التحول الرقمي ودرجة النضج الرقمي داخل بيت التمويل الكويتي، وتشمل: نوع الأداة الرقمية، ونطاق الاستخدام الوظيفي، ودرجة التكامل بين الأنظمة الرقمية، وطبيعة البنية التحتية التقنية الداعمة (شبابحي وآخرون، 2024).

النضج الرقمي(Digital Maturity)

يعبر النضج الرقمي عن مستوى قدرة المؤسسة على توظيف التقنيات الرقمية بصورة متكاملة ومستدامة لدعم العمليات والابتكار واتخاذ القرار (الغزيوي، 2024؛Latinia, 2024). ومن الناحية الإجرائية في هذه الدراسة

نعني به مستوى التطور الذي يبلغه النظام المعلوماتي نتيجة تراكم وتكامل الأدوات الرقمية وتوسع استخدامها بما يمكن المؤسسة من الانتقال من رقمنه الخدمات إلى التحول الرقمي المؤسسي الشامل.

منهجية البحث

تعتمد الدراسة على المنهج الوصفي–التحليلي، لملاءمته في تحليل توافر معايير التحول الرقمي من خلال تتبع التطور المرحلي للأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي. كما تتبنى مدخل تحليل نظم المعلومات الذي ينظر إلى التحول الرقمي باعتباره مسارًا يعكس نضج النظام من خلال طبيعة الأدوات المستخدمة، ونطاق توظيفها، ودرجة تكاملها، والبنية التحتية الداعمة لها.

تم اختيار بيت التمويل الكويتي كحالة للدراسة، نظرًا لتوافر بيانات منشورة تغطي الفترة (2015–2024)، بما يسمح بتحليل تطور الأدوات التقنية بصورة مرحلية، في ظل التحولات المتسارعة في القطاع المصرفي خلال هذه الفترة.

تعتمد الدراسة على بيانات ثانوية تتمثل في التقارير السنوية المنشورة والأدبيات العلمية ذات الصلة، دون استخدام أدوات ميدانية مثل المقابلات أو الاستبيانات. كما تستخدم أسلوب تحليل المحتوى لتصنيف الأدوات التقنية وفق معايير تشمل نوع الأداة، نطاق الاستخدام، درجة التكامل، وطبيعة البنية التحتية.

ويتم تحليل البيانات من خلال منهج نوعي قائم على المقارنة عبر الزمن، بهدف ربط تطور الأدوات التقنية بالإطار المفاهيمي للتحول الرقمي، بما يتيح تفسير مسار نضج النظام المعلوماتي خلال فترة الدراسة.

الإطار النظري

أولًا: التحول الرقمي في نظم المعلومات المصرفية الإسلامية

يقصد بالتحول الرقمي أنه عملية يتم من خلالها الانتقال التدريجي من نظم تعتمد على المعالجة التشغيلية التقليدية إلى نظم رقمية أكثر تكاملًا فيما بينها. حيث توظّف التقنيات الرقمية مثل المنصات الرقمية، وتحليل البيانات، والحوسبة السحابية، والذكاء الاصطناعي في مختلف وظائف المصرف (Papathomas & Konteos, 2023).

وأما التحول الرقمي في المصارف الإسلامية فينظر اليه باعتباره امتدادًا لتطور نظم المعلومات المصرفية حيث تجاوز حدود أتمتة العمليات واستخدام التطبيقات المنفصلة، ليأخذ شكل توجهًا استراتيجيًا يهدف إلى إعادة تنظيم مكونات النظام المعلوماتي بما يدعم كفاءة العمليات التشغيلية وتعزيز جودة الخدمات، والمساهمة في تحسين عملية اتخاذ القرار في إطار الالتزام بالضوابط الشرعية والتنظيمية (Papathomas & Konteos, 2023 ؛ Ningrum et al., 2023)

ويرتبط التحول الرقمي في المصارف الإسلامية بمتطلبات إضافية تتعلق بمواءمة الأدوات التقنية مع طبيعة المنتجات المتوافقة مع الشريعة الإسلامية، وبآليات الرقابة الشرعية، ومتطلبات الحوكمة والامتثال، وهو ما يضفي على مسار التحول الرقمي بعدًا تنظيميًا ووظيفيًا يتجاوز الجوانب التقنية البحتة (Al Qurtas, 2024; Cherni & Amar, 2024).

ثانيًا: مفهوم نظم المعلومات في المصارف الإسلامية

تُعرَّف نظم المعلومات في المصارف الإسلامية بوصفها منظومة متكاملة تضم الموارد التقنية والبشرية والإجرائية، وتُستخدم في جمع البيانات ومعالجتها وتحليلها وتخزينها وتداولها، بما يدعم تنفيذ العمليات المصرفية، وتقديم الخدمات المالية، وإعداد التقارير، وتعزيز عملية اتخاذ القرار، في إطار الالتزام بالضوابط الشرعية والتنظيمية (Ningrum et al., 2023 ; Al Qurtas, 2024).

تتكون النظم المعلوماتية المصرفية من عدة أنظمة فرعية تشمل معالجة العمليات، والمعلومات الإدارية، ودعم القرار، وإدارة المخاطر، وإدارة بيانات العملاء والقنوات الرقمية، وأمن المعلومات والامتثال، وتعمل هذه المكونات بشكل مترابط يحدد كفاءة النظام وقدرته على دعم وظائف المصرف. ويُعد تطور هذه النظم مؤشرًا مهمًا على مستوى نضج النظام المعلوماتي، إذ يعكس درجة تكامل مكوناته وقدرته على استيعاب التقنيات الحديثة وتوظيفها بفعالية داخل بيئة العمل المصرفي (Papathomas & Konteos, 2023 ; Al Qurtas, 2024).

ثالثًا: مراحل التحول الرقمي في نظم المعلومات بالمصارف الإسلامية

تشير الدراسات إلى أن التحول الرقمي بوصف بأنه مسارًا تدريجيًا يمر بمراحل متتابعة تعكس مستويات مختلفة من نضج النظام المعلوماتي، ويمكن تلخيصها في ثلاث مراحل رئيسة (Papathomas & Konteos; , 2023) .

المرحلة الأولى: النظم الرقمية الأساسية

تتسم بالتركيز على أتمتة العمليات المصرفية والاعتماد على نظم تشغيلية تؤدي وظائف محددة بصورة منفصلة، بهدف تحسين الكفاءة وتقليل الأخطاء. ويكون دور الأدوات التقنية في هذه المرحلة دورًا محدودًا من حيث التفاعل والتكامل.

المرحلة الثانية: النظم الرقمية التفاعلية

تشهد توسعًا في استخدام القنوات الرقمية وتطوير الخدمات الإلكترونية، مع تحسن ملحوظ في تجربة العملاء، وبداية الربط بين الأنظمة التشغيلية ونظم المعلومات الإدارية. ويظهر في هذه المرحلة مستوى أولي من التكامل بين مكونات النظام المعلوماتي(Ningrum ; et al., 2023).

المرحلة الثالثة: النظم الرقمية المتكاملة

تمثل مستوى متقدمًا من النضج الرقمي، حيث تتكامل الأنظمة بصورة شاملة، ويتم توظيف تقنيات تحليل البيانات والأدوات الذكية في دعم القرار المؤسسي، مع الاعتماد على بنية تحتية مرنة تدعم التشغيل المتكامل للعمليات المصرفية. وتعكس هذه المرحلة انتقال النظام المعلوماتي إلى مستوى رقمي أكثر تطورًا (Papathomas & Konteos, 2023) .

رابعًا: الأطر العالمية المرجعية للتحول الرقمي(UNDP, TOGAF)

تُعد الأطر العالمية للتحول الرقمي مرجعًا أساسيًا لتقييم نضج وتطور التحول الرقمي في المؤسسات الحديثة، حيث يقدم إطار برنامج الأمم المتحدة الإنمائي United Nations Development Programme (UNDP) نموذجًا تنمويًا شاملًا ينظر إلى التحول الرقمي كأداة لتحقيق التنمية المستدامة وتحسين جودة الخدمات حيث يركز هذا الإطار على البنية التحتية الرقمية، والحوكمة، والبيانات، والابتكار ، وبناء القدرات ، والخدمات المتمحورة حول المستخدم (UNDP, 2022).

كما يعد إطار هندسة المؤسسات (The Open Group Architecture Framework) TOGAF من أهم الأطر العالمية لتنظيم البنية الرقمية للمؤسسات وذلك لأنه يوفر منهجية منظمة تُعرف باسم Architecture) (Development Method – ADM وتهدف هذه المنهجية إلى مواءمة استراتيجية المؤسسة مع مكوناتها التقنية والتنظيمية وذلك من خلال تحديد هندسة الأعمال والبيانات والتطبيقات والتقنية بما يضمن التكامل، وتقليل الازدواجية، ورفع الكفاءة التشغيلية .(The Open Group, 2023) . ويعكس التكامل بين الإطارين البعد الشامل للتحول الرقمي، وذلك لإنه يجمع بين الرؤية التنموية والتخطيط التقني مما يوفر أساسًا تحليليًا لتقييم التحول الرقمي في المصارف الإسلامية.

وبناءً عليه، تعتمد هذه الدراسة على توظيف هذا الإطار المرجعي في تحليل معايير التحول الرقمي داخل القطاع المصرفي الإسلامي، مع التركيز على التطور المرحلي للأدوات التقنية المستخدمة في النظام المعلومات **بيت التمويل الكويتي** خلال الفترة (2015–2024). بهدف قياس مدى توافق التطور الفعلي في أدواته الرقمية مع معايير محددة خلال فترة الدراسة.

خامسًا: الأدوات التقنية ودورها في مراحل التحول الرقمي

تُعد الأدوات التقنية المكوّن التنفيذي للتحول الرقمي داخل النظام المعلوماتي، إذ يعكس نوعها ومستوى توظيفها درجة النضج الرقمي للمصرف. وترتبط هذه الأدوات بمراحل التحول الرقمي، حيث تتطور من نظم تشغيلية بسيطة إلى أنظمة أكثر تكاملًا وتفاعلية، وصولًا إلى تطبيقات متقدمة تعتمد على تحليل البيانات ودعم القرار بشكل ذكي (Papathomas & Konteos, 2023) .

وفي هذا الإطار، يمكن التمييز بين ثلاثة أنماط رئيسية من الأدوات التقنية. يتمثل النمط الأول في الأدوات الأساسية التي تركز على معالجة العمليات وتخزين البيانات ضمن بيئة تشغيلية محدودة التكامل. أما النمط الثاني فيشمل الأدوات التفاعلية التي تدعم القنوات الرقمية وتحسن التواصل مع العملاء مع مستوى تكامل جزئي

بين مكونات النظام. في حين يتمثل النمط الثالث في الأدوات المتقدمة التي تعتمد على تحليل البيانات والتقنيات الذكية، بما يعزز التكامل الشـــامل ويدعم اتخاذ القرار. ويعكس الانتقال بين هذه الأنماط تطورًا تدريجيًا في بنية النظام المعلوماتي، يتمثل في زيادة مستوى التكامل، واتساع نطاق الاستخدام الوظيفي، وتعزيز قدرة النظام على دعم العمليات ، ما يشير إلى ارتفاع مستوى النضج الرقمي داخل المصرف (Ningrum et al., 2023).

سادسًا: معايير التحول الرقمي في نظم المعلومات المصرفية

تعتمد الدراسة على مجموعة من المعايير التحليلية التي تُستخدم لتفسير مستوى التحول الرقمي داخل النظام المعلوماتي، وذلك من خلال ربط خصائص الأدوات التقنية بطبيعة توظيفها داخل المصرف. وتستند هذه المعايير إلى ما طرحته الأدبيات المعاصرة في مجال التحول الرقمي ونظم المعلومات المصرفية (Papathomas & Konteos, 2023 ; Al Qurtas, 2024) .

ويتمثل **المعيار الأول** في **طبيعة الأدوات الرقمية المستخدمة**، حيث يعكس الانتقال من الأدوات التشغيلية الأساسية إلى الأدوات التفاعلية ثم إلى الأدوات الذكية مستوى تطور النظام المعلوماتي، من حيث قدرته على استيعاب التقنيات الحديثة وتوظيفها.

أما **المعيار الثاني** فيتعلق **بنطاق الاستخدام الوظيفي**، ويُقصد به مدى امتداد توظيف الأدوات الرقمية داخل المصرف، بدءًا من دعم العمليات التشغيلية، مرورًا بتحسين الخدمات المقدمة للعملاء، وصولًا إلى دعم القرار المؤسسي، وهو ما يعكس اتساع دور النظام المعلوماتي داخل المؤسسة (Ningrum et al., 2023) .

ويرتبط **المعيار الثالث بدرجة التكامل بين الأنظمة الرقمية**، حيث يتدرج من بيئة تشـــغيلية تعتمد على أنظمة منفصلة، إلى أنظمة مترابطة، ثم إلى منصات رقمية متكاملة، بما يعكس مستوى التنسيق والتكامل بين مكونات النظام المعلوماتي (Papathomas & Konteos, 2023) .

في حين يتمثل **المعيار الرابع** في **طبيعة البنية التحتية التقنية الداعمة**، والتي تتطور من أنظمة تقليدية إلى بيئات أكثر مرونة تعتمد على الحلول الحديثة، بما في ذلك التقنيات الســـحابية والأدوات التحليلية، وهو ما يهيئ بيئة مناسبة لتبني تطبيقات رقمية أكثر تقدمًا.(Velmie, 2025)

وتُســـتخدم هذه المعايير مجتمعة كإطار تحليلي لتتبع التطور المرحلي للأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي، وربط هذا التطور بمستوى التحول الرقمي، بما يسمح بتفسير مسار النضج الرقمي للمصرف محل الدراسة.(Papathomas & Konteos, 2023 ; Al Qurtas, 2024) .

الدراسة التطبيقية

بعد استعراض الإطار النظري المرتبط بالتحول الرقمي ومعاييره في نظم المعلومات، تنتقل الدراسة إلى الجانب التطبيقي من خلال تحليل تجربة بيت التمويل الكويتي(Kuwait Finance House – KFH) .

أولاً: نبذة عن بيت التمويل الكويتي

يُعد بيت التمويل الكويتي (Kuwait Finance House – KFH) أحد أبرز المصـــارف الإســـلامية في دولة الكويت، والعالم الإسلامي حيث تأسس عام 1977 كأول بنك إسلامي في الكويت. يسعى المصرف جاهداً لتقديم مجموعة متنوعة من الخدمات المصرفية والاستثمارية والتمويلية وفق صيغ تتوافق مع احكام الشريعة الإسلامية. هذا وقد شـهد المصـرف خلال السـنوات الأخيرة توسـعًا ملحوظًا في تبني التقنيات الرقمية، وتطوير البنية التحتية التقنية والخدمات المصـــرفية الإلكترونية بما تدعم التوجه نحو التحول الرقمي وتعزيز كفاءة العمليات التشـــغيلية والخدمات المقدمة للعملاء (التقرير السنوي لبيت التمويل الكويتي، 2024) .

ثانيًا : الأساس المنهجي لتصنيف الأدوات الرقمية وفق معايير التحول الرقمي

اعتمدت الدراســة في تصــنيف الأدوات الرقمية المســتخدمة في بيت التمويل الكويتي على مدخل تحليلي معياري يربط بين الخصـائص التقنية والوظيفية للأداة كما تعكسـها التقارير السـنوية والمصـادر الرسـمية، وبين الأطر النظرية للتحول الرقمي ونماذج النضج الرقمي في القطاع المصرفي

(Papathomas & Konteos, 2023; Latinia, 2024).

1. تصنيف الأداة الرقمية وفق معيار نوع الأداة الرقمية

يتم تحديد نوع الأداة الرقمية بشكل إجرائي وفق ثلاثة مستويات رئيسية، بناءً على طبيعة دورها داخل النظام المعلوماتي. فإذا اقتصـر دور الأداة على تقديم الخدمة بصـيغة رقمية دون تغيير جوهري في طريقة تنفيذ العملية، تُصـــنَّف **كأداة رقمية أســـاســـية**، بما يعكس مســـتوى محدودًا من التحول. أما إذا أتاحت الأداة تنفيذ العمليات المصـرفية بشـكل مباشـر مع تفاعل واضـح مع المسـتخدم وتعدد في الوظائف، فتُصـنَّف **كأداة رقمية تفاعلية**، لارتباطها بتوسـيع نطاق الاسـتخدام داخل الأنشـطة التشـغيلية. في حين تُصـنَّف الأدوات التي تعتمد على تحليل البيانات أو الأتمتة أو تحقق مســـتوى مرتفعًا من التكامل بين الأنظمة ضـــمن **الأدوات الرقمية الذكية المتقدمة**، نظرًا لإسهامها في دعم القرار ورفع كفاءة النظام ، مما يعكس مستوى متقدمًا من النضج الرقمي .

(Digital Leadership, 2024 ; Evolved Metrics, 2020; Deloitte, 2024)

2. تصنيف الأداة وفق نطاق الاستخدام الوظيفي

تم تحديد نطاق الاستخدام الوظيفي للأداة الرقمية في بيت التمويل الكويتي بالاستناد إلى طبيعة الدور الذي تؤديه فعليًا داخل النظام المعلوماتي، وذلك من خلال ربط وظائفها التطبيقية بأبعاد الاســـتخدام المعتمدة في أدبيات نظم المعلومات المصرفية . (Papathomas & Konteos, 2023; Deloitte, 2024)

ويعتمد هذا التصـــنيف على ثلاثة مســـتويات وظيفية، فإذا اقتصـــر دور الأداة على عرض المعلومات والاستعلام تُصنَّف ضمن **الخدمات المعلوماتية**، أما إذا أتاحت تنفيذ المعاملات المصرفية مباشرة فتُصنَّف ضمن **تنفيذ العمليات المصرفية**. وفي حال أسـهمت في تحليل البيانات أو دعم التخطيط واتخاذ القرار فتُصـنَّف ضـمن

دعم القرار المؤسسي، بما يعكس مستوى متقدم من توظيف الأدوات الرقمية داخل النظام المعلوماتي (Digital Leadership, 2024; Latinia,2024) .

وبناءً على هذا المعيار تم تصنيف كل أداة رقمية في الجانب التطبيقي وفق نطاق استخدامها الفعلي، بما يسمح بربط الدور الوظيفي للأداة بمستوى تطور التحول الرقمي داخل النظام المعلوماتي.

3. تصنيف الأداة وفق درجة التكامل بين الأنظمة الرقمية

اعتمد تصنيف درجة التكامل على مستوى ارتباط الأداة بالأنظمة الخلفية والقنوات الأخرى، بما يتماشى مع مؤشرات التكامل بين الأنظمة في أطر النضج الرقمي (Latinia, 2024; Perimattic, 2026) .

وتصنف الأداة الرقمية وفق أطر النضج الرقمي كأنظمة **منفصلة** إذا عملت بصورة مستقلة دون ربط شامل . كما تُصنَّف **كأنظمة مترابطة جزئيًا** إذا وُجد تكامل وظيفي محدود . و تُصنَّف الأداة الرقمية **كمنصة رقمية متكاملة** إذا شكّلت جزءًا من منظومة رقمية موحدة (Latinia, 2024; Digital Leadership, 2024).

وبناءً على هذا المعيار، تم تصنيف كل أداة رقمية وفق نطاق استخدامها الفعلي، وذلك من خلال ربط الدور الوظيفي للأداة بمستوى تطور التحول الرقمي داخل النظام المعلوماتي.

4. تصنيف الأداة وفق دورها في العمليات المصرفية

تم تحديد دور الأداة الرقمية في بيت التمويل الكويتي بالاستناد إلى موقعها ضمن العمليات المصرفية ومدى تأثيرها في تنفيذها وتوجيهها، وفق أبعاد توظيف الأدوات الرقمية في نظم المعلومات المصرفية . (Papathomas & Konteos, 2023; Deloitte, 2024)

ويعتمد التصنيف على ثلاثة أدوار رئيسية، فإذا اقتصر دور الأداة على دعم العمليات دون أن تكون جزءًا مباشرًا منها، تُصنَّف ضمن **الدور الداعم**. أما إذا أصبحت جزءًا أساسيًا في تنفيذ العمليات والمعاملات اليومية، فتُصنَّف ضمن **الدور التشغيلي**. وفي حال أسهمت الأداة في إعادة تصميم العمليات أو دعم التوجهات المؤسسية واتخاذ القرار، فتُصنَّف ضمن **الدور الاستراتيجي**، بما يعكس مستوى متقدمًا من التحول المؤسسي الرقمي (Latinia, 2024; Digital Leadership, 2024) .

وبناءً على هذا المعيار، تم تحديد الدور الفعلي لكل أداة رقمية وفق تأثيرها داخل النظام المعلوماتي، بما يتيح ربط طبيعة هذا الدور بمستوى تطور التحول الرقمي في المصرف محل الدراسة.

ثالثا: تحليل نتائج الدراسة :-

يتناول هذا القسم تحليل نتائج الدراسة التطبيقية المتعلقة بمراحل التحول الرقمي في النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي خلال الفترة (2015–2024)، استنادًا إلى الجداول التحليلية والمعايير المعتمدة، وفيما يلي بيان لهذه المراحل

أولا : مرحلة الرقمنة الأساسية(2015–2017)

تم تصنيف الأدوات الرقمية الواردة في هذا الجدول وفق المعايير الإجرائية المحددة في الإطار النظري للدراسة، والتي تعتمد على طبيعة الأداة، ونطاق استخدامها، ودرجة تكاملها، ودورها في العمليات المصرفية.

ر.م	اسم الأداة الرقمية	رمز الأداة الرقمية	طبيعة التقنية	السنة	نوع الأداة الرقمية	نطاق الاستخدام الوظيفي	درجة التكامل بين الأنظمة	دور الأداة في العمليات
.1	الخدمات المصرفية عبر الإنترنت	Internet Banking	قناة مصرفية رقمية	2015	أداة أساسية (رقمنة خدمة)	معلومات + عمليات بسيطة (استعلام/تحويل محدود)	منفصل (نظام مستقل)	دور داعم (خدمة مساندة)
.2	تطبيق بيت التمويل الكويتي للهاتف(الإصدار الأول)	KFH Mobile Banking (v1)	تطبيق مصرفي رقمي	2015	أداة أساسية (قناة رقمية)	معلومات + عمليات بسيطة (استعلام/تحويل محدود)	منفصل (نظام مستقل)	دور داعم (واجهة استخدام)
.3	الاستعلام عن الأرصدة إلكترونيًا	Balance Inquiry Services	خدمة مصرفية رقمية	2015	أداة أساسية (عرض بيانات)	معلومات فقط(استعلام)	منفصل (نظام مستقل)	دور داعم (خدمة معلومات)

.4	التحويلات المحلية	Local Transfers	خدمة تحويلات إلكترونية	2016	أداة أساسية (تنفيذ مباشر)	تنفيذ عمليات مصرفية (تحويل مالي)	منفصل (ربط محدود)	دور تشغيلي (تنفيذ جزئي)
.5	دفع الفواتير إلكترونيًا	Electronic Bill Payment	خدمة مدفوعات إلكترونية	2016	أداة أساسية(رقمنة خدمة)	تنفيذ عمليات مصرفية(دفع مباشر)	مترابطة جزئيًا (ربط خارجي)	دور شغيلي (تنفيذ يومي)
.6	إشعارات العمليات المصرفية	SMS / Email Notifications	خدمة إشعارات رقمية	2016	أداة أساسية (تنبيه رقمي)	خدمات فقط (إشعارات)	منفصل (قناة مستقلة)	دور داعم (تنبيه المستخدم)
.7	إدارة الحسابات إلكترونيًا	Online Account Management	خدمة إدارة حسابات رقمية	2017	أداة أساسية (إدارة رقمية)	تنفيذ عمليات مصرفية(إدارة حساب)	مترابطة جزئيًا (ربط داخلي)	دور تشغيلي (تشغيل أساسي)

الجدول (1) : ربط الأدوات الرقمية للمرحلة الأولى بمعايير التحول الرقمي – المصدر : من إعداد الباحث

تحليل نتائج المرحلة الأولى

تعكس نتائج الفترة (2015–2017) مرحلة أولية في مسار التحول الرقمي داخل بيت التمويل الكويتي، حيث اتجه البنك إلى إتاحة عدد من الخدمات عبر قنوات إلكترونية دون أن يصاحب ذلك تغيير جوهري في بنية العمليات المصرفية. ويظهر من طبيعة الأدوات المستخدمة أنها تندرج ضمن المستوى الأساسي، إذ انحصر دورها في نقل الخدمات التقليدية إلى بيئة رقمية مع قدر محدود من التنفيذ المباشر للعمليات.

ومن حيث الاستخدام الوظيفي، تركزت التطبيقات على تقديم المعلومات وتنفيذ معاملات بسيطة، مثل الاستعلام والتحويلات المحلية، دون توظيف واضح لأدوات تحليلية أو وظائف داعمة للقرار. كما يتضح أن درجة التكامل بين الأنظمة ظلت محدودة، حيث عملت معظم الأدوات بصورة مستقلة أو ضمن ارتباط جزئي، الأمر الذي حدّ من تكوين بيئة رقمية موحدة.

أما من ناحية الدور داخل العمليات، فقد اتسمت الأدوات بطابع داعم في أغلبها، مع بروز دور تشغيلي محدود في بعض التطبيقات المرتبطة بتنفيذ المعاملات. ويشير ذلك إلى أن النظام المعلوماتي في هذه المرحلة كان يؤدي وظيفة مساندة للعمليات التقليدية أكثر من كونه موجهًا لها. وبوجه عام، تمثل هذه المرحلة نقطة انطلاق تأسيسية، تم من خلالها وضع حجر الأساس للبنية الأولية التقنية التي مهدت للتوسع و التكامل نحو مستويات أعلى من النضج الرقمي.

ثانيا : مرحلة التوسّع والتكامل الوظيفي(2018 –2020)

ر.م	اسم الأداة الرقمية	رمز الأداة الرقمية	طبيعة التقنية	السنة	نوع الأداة الرقمية	نطاق الاستخدام الوظيفي	درجة التكامل بين الأنظمة	دور الأداة في العمليات
.1	تطبيق بيت التمويل الكويتي – إصدار مطوّر	KFH Mobile Banking (Enhanced Version)	تطبيق مصرفي رقمي	2018	أداة تفاعلية (تحسين القناة)	تنفيذ عمليات (خدمات متقدمة)	تكامل جزئي (ربط خلفي)	تشغيلي (تنفيذ مباشر)
.2	فتح الحسابات رقميًا	Digital Account Opening	خدمة مصرفية رقمية	2018	أداة تفاعلية (رقمنة الإجراء)	تنفيذ عمليات (فتح حساب)	تكامل جزئي (ربط الأنظمة)	تشغيلي (تشغيل كامل)
.3	إدارة البطاقات إلكترونيًا	Digital Card Management	خدمة إدارة البطاقات الرقمية	2019	أداة تفاعلية (إدارة رقمية)	تنفيذ عمليات (إدارة بطاقات)	تكامل جزئي (ربط داخلي)	تشغيلي (خدمة مستمرة)

.4	تحديث بيانات العملاء إلكترونيًا	e-KYC / Digital Profile Update	نظام التحقق الرقمي من هوية العملاء	2019	أداة تفاعلية (تحقق رقمي)	تنفيذ عمليات (تحديث بيانات)	تكامل جزئي (ربط قواعد البيانات)	تشغيلي (امتثال رقمي)
.5	خدمات التحويلات الدولية الرقمية	Digital International Transfers	خدمة تحويلات إلكترونية	2019	أداة تفاعلية (تحويل رقمي)	تنفيذ عمليات (تحويل دولي)	تكامل جزئي (ربط خارجي)	تشغيلي (تنفيذ مالي)
.6	خدمات الدعم غير الحضوري	Remote Customer Support	خدمة دعم عملاء رقمية	2020	أداة تفاعلية (خدمة عن بعد)	معلومات + عمليات (دعم/تنفيذ)	تكامل جزئي (قنوات متعددة)	داعم/تشغيلي (خدمة مباشرة)
.7	التوسع في القنوات الرقمية خلال جائحة كوفيد-19	Pandemic Digital Services Expansion	قناة مصرفية رقمية	2020	أداة تفاعلية (توسيع خدمات)	تنفيذ عمليات (استمرارية الخدمة)	تكامل جزئي (تكامل قنوات)	تشغيلي (تشغيل مكثف)

الجدول (2) : ربط الأدوات الرقمية للمرحلة الثانية بمعايير التحول الرقمي – المصدر : من إعداد الباحث

تحليل نتائج المرحلة الثانية

تشير نتائج هذه المرحلة (2018–2020) إلى انتقال النظام المعلوماتي نحو توسيع الاستخدام التشغيلي للأدوات الرقمية، من خلال الاعتماد على أدوات تفاعلية مكّنت من تنفيذ طيف أوسع من العمليات المصرفية عبر القنوات الرقمية. كما يظهر تحسنٌ نسبيٌّ في درجة التكامل من خلال الربط الجزئي بين الأنظمة الخلفية والقنوات الرقمية، الأمر الذي أسهم في تقليل

الاعتماد على الإجراءات التقليدية وتعزيز استمرارية تقديم الخدمات. وتعكس هذه المرحلة تطورًا وظيفيًا يمهد للانتقال من التشغيل الرقمي إلى توظيف أكثر تكاملًا للأدوات الرقمية في بيئة النظام المعلوماتي.

المرحلة الثالثة (2021–2022): مرحلة النضج الرقمي والخدمات الذكية

ر.م	اسم الأداة الرقمية	رمز الأداة الرقمية	طبيعة الأداة الرقمية	السنة	نوع الأداة الرقمية	نطاق الاستخدام الوظيفي	درجة التكامل بين الأنظمة	دور الأداة في العمليات
.1	منصة الخدمات الرقمية المتكاملة للأفراد	Digital Retail Platform	منصة رقمية تفاعلية متكاملة	2021	أداة ذكية (منصة موحدة)	عمليات + تجربة (خدمات متكاملة)	منصات مترابطة (تكامل قنوات)	تشغيلي/استراتيجي (تشغيل + توجيه)
.2	خدمات شراء واستثمار الذهب رقميًا	Digital Gold Trading Services	خدمة رقمية تشغيلية/معاملاتية	2021	أداة ذكية (استثمار رقمي)	عمليات + قرار فردي (تداول/اختيار)	منصات مترابطة (ربط خدمات)	تشغيلي (تنفيذ استثماري)
.3	الخدمات غير الحضورية المتكاملة	End-to-End Digital Services	منصة رقمية متكاملة شاملة	2021	أداة ذكية (خدمة شاملة)	تنفيذ كامل (End-to-End)	منصات مترابطة (تكامل شامل)	تشغيلي (تشغيل رقمي كامل)
.4	توسيع الأتمتة الرقمية للعمليات	Process Automation (RPA)	أداة رقمية ذكية (أتمتة العمليات)	2022	أداة ذكية (أتمتة ذكية)	عمليات + قرار (تنفيذ/تحسين)	منصات مترابطة (ربط داخلي)	استراتيجي (تحسين الكفاءة)
.5	تحليل بيانات العملاء	Customer Data Analytics	أداة تحليل بيانات ودعم قرار	2022	أداة ذكية (تحليل بيانات)	دعم قرار (تحليل سلوكي)	منصات متكاملة (تكامل بيانات)	استراتيجي (توجيه القرار)

6.	تعزيز أنظمة الأمن السيبراني الذكية	Advanced Cybersecurity Solutions	أداة رقمية أمنية ذكية	2022	أداة ذكية (حماية ذكية)	حماية + قرار (كشف /استجابة)	منصات متكاملة (أمن شامل)	استراتيجي (حماية مستمرة)

جدول (3) : ربط الأدوات الرقمية للمرحلة الثالثة بمعايير التحول الرقمي– المصدر : من إعداد الباحث

تحليل نتائج المرحلة الثالثة

تُظهر هذه المرحلة (2021–2022) انتقال النظام المعلوماتي إلى مستوى متقدم من النضج الرقمي، من خلال توظيف أدوات ذكية قائمة على التحليل والأتمتة. وقد اتسع نطاق الاستخدام ليشمل دعم القرار إلى جانب تنفيذ العمليات، مع ظهور منصات رقمية مترابطة تعزز تكامل البيانات بين الوحدات المختلفة. ويعكس ذلك تحول دور النظام المعلوماتي من دعم تشغيلي إلى دور استراتيجي يسهم في تحسين الكفاءة وخلق قيمة مضافة. وتمثل هذه المرحلة نقطة التحول نحو النضج الرقمي الفعلي، بما يتوافق مع نماذج النضج الرقمي في الأدبيات المصرفية.

المرحلة الرابعة (2023–2024): التحول الرقمي المؤسسي الشامل

ر.م	**اسم الأداة الرقمية**	**رمز الأداة الرقمية**	طبيعة الأداة الرقمية	**السنة**	**نوع الأداة الرقمية**	**نطاق الاستخدام الوظيفي**	**درجة التكامل بين الأنظمة**	**دور الأداة في العمليات**
1.	منصة الشركات الرقمية المتكاملة	KFH eCorp Platform	منصة رقمية تفاعلية متكاملة	2023	أداة ذكية (منصة مؤسسية)	عمليات + قرار (خدمات شركات)	منصات متكاملة (تكامل شامل)	استراتيجي (إدارة مؤسسية)
2.	المنصات الرقمية المتكاملة للأعمال	Integrated Business	منصة رقمية مؤسسية متكاملة	2023	أداة ذكية (بيئة أعمال)	عمليات مؤسسية (تشغيل متكامل)	منصات متكاملة (ربط الأنظمة)	استراتيجي (تشغيل مؤسسي)

		Digital Platforms						
3.	تكامل الأنظمة مع الجهات الحكومية	Government Systems Integration	تكامل أنظمة وربط مؤسسي (Interoperability)	2023	أداة ذكية (تكامل خارجي)	عمليات + امتثال (ربط حكومي)	منصات متكاملة (تكامل خارجي)	استراتيجي (امتثال رقمي)
4.	التحليلات المتقدمة للبيانات المؤسسية	Advanced Enterprise Analytics	أداة تحليل بيانات ودعم قرار	2024	أداة ذكية (تحليل متقدم)	دعم قرار (تحليل شامل)	منصات متكاملة (تكامل بيانات)	استراتيجي (توجيه القرار)
5.	البنية التحتية السحابية والتحليلية	Cloud & Data Infrastructure	بنية تحتية رقمية داعمة للنظام	2024	أداة ذكية (بنية رقمية)	عمليات + قرار (تشغيل/تحليل)	منصات متكاملة (بنية موحدة)	استراتيجي (تمكين رقمي)
6.	الأمن السيبراني المؤسسي المتقدم	Enterprise Cybersecurity Solutions	أداة أمن معلومات وحماية رقمية متقدمة	2024	أداة ذكية (أمن متقدم)	حماية + قرار (رصد/استجابة)	منصات متكاملة (أمن شامل)	استراتيجي (حماية مؤسسية)

الجدول (4) : ربط الأدوات الرقمية للمرحلة الرابعة بمعايير التحول الرقمي –المصدر : من إعداد الباحث

تحليل نتائج المرحلة الرابعة

تشير نتائج هذه المرحلة (2023–2024) إلى تحقق مستوى متقدم من التحول الرقمي المؤسسي، من خلال اعتماد منصات رقمية متكاملة تدعم ترابط العمليات والبيانات داخل المصرف ومع الجهات الخارجية. كما اتسع نطاق الاستخدام ليشمل دعم القرار الاستراتيجي والحوكمة الرقمية، إلى جانب التشغيل اليومي. ويعكس هذا المستوى من التكامل والبنية التقنية انتقال النظام المعلوماتي إلى دور محوري في تشكيل النموذج التشغيلي للمصرف وتعزيز قدرته التنافسية.

معيار المقارنة	المرحلة الأولى : الرقمنة الأساسية2015–2017	المرحلة الثانية : التوسع والتكامل الوظيفي2018–2020	المرحلة الثالثة: النضج الرقمي والخدمات الذكية2021–2022	المرحلة الرابعة : التحول الرقمي المؤسسي الشامل2023–2024
طبيعة المرحلة	رقمنة الخدمات	توسع رقمي وظيفي	نضج رقمي ذكي	تحول رقمي مؤسسي
نوع الأدوات الرقمية	أساسية	تفاعلية	ذكية متقدمة	ذكية متكاملة
نطاق الاستخدام الوظيفي	معلومات + تنفيذ بسيط	تنفيذ موسع	تنفيذ + دعم قرار	دعم قرار مؤسسي
درجة التكامل بين الأنظمة	منفصل	تكامل جزئي	منصات مترابطة	منصات متكاملة
دور الأدوات الرقمية	داعم	تشغيلي	تشغيلي/استراتيجي	استراتيجي
محور التركيز التقني	إتاحة القنوات	تجربة المستخدم	البيانات والأتمتة	الحوكمة والتكامل
نطاق المستفيدين	أفراد	أفراد (موسع)	أفراد بخدمات ذكية	أفراد + شركات
أمثلة على الأدوات الرقمية	Internet Banking	Mobile Banking / e-Accounts	Data Analytics / Digital Gold	eCorp / Gov Integration
الأساس النظري	رقمنة أولية	تكامل وظيفي	نضج رقمي	تحول مؤسسي

الجدول(5) : المقارنة النهائية لمراحل التحول الرقمي في بيت التمويل الكويتي(2015–2024) – المصدر : من أعداد الباحث

تحليل نتائج الجدول (5)

يوضح الجدول وجود مسارٍ تدريجيٍ للتحول الرقمي يبدأ برقمنة الخدمات الأساسية، ثم التوسع الوظيفي، وصولًا إلى النضج الرقمي والتحول المؤسسي الشامل. مع وجود تطور في نوع الأدوات الرقمية واتساع نطاق استخدامها وارتفاع مستوى تكاملها، مما أدى إلى انتقال دور النظام المعلوماتي من الدعم التشغيلي إلى دعم القرار الاستراتيجي. ويرجع التمييز بين المراحل إلى خصائص الأدوات الرقمية ودرجة تكاملها ودورها الوظيفي، وليس إلى البعد الزمني فقط.

مناقشة نتائج الدراسة

أظهرت نتائج الدراسة أن مسار التحول الرقمي في بيت التمويل الكويتي اتخذ طابعًا تدريجيًا ومتراكمًا، حيث بدأ برقمنة الخدمات الأساسية ثم اتجه نحو التكامل المؤسسي ودعم القرار الاستراتيجي. وتتفق هذه النتيجة مع ما توصلت إليه دراسة Papathomas (2023) التي أوضحت أن التحول الرقمي في المؤسسات المالية يمر بمراحل متتابعة ترتبط بمستويات النضج الرقمي، كما تتوافق مع دراسة شبابحي وآخرون (2024) التي أشارت إلى أن توسع الحلول الرقمية يسهم في تحسين كفاءة الأداء وتجربة العملاء في المصارف الإسلامية.

كما بينت النتائج تطور نطاق توظيف الأدوات التقنية من تقديم المعلومات وتنفيذ المعاملات البسيطة إلى دعم العمليات المصرفية المعقدة ثم دعم القرار المؤسسي والأتمتة الذكية. ويتوافق ذلك مع ما أشارت إليه دراسة محمد (2023) ودراسة Mohamed (2025) بشأن أثر التقنيات الرقمية في تعزيز فاعلية نظم المعلومات، إلا أن الدراسة الحالية توسعت في تحليل تطور هذه الأدوات داخل النظام المعلوماتي عبر مراحل زمنية متتابعة، وهو ما يمثل جانبًا لم تتناوله الدراسات السابقة بصورة تفصيلية.

وأظهرت الدراسة أيضًا تزايد درجة تكامل الأنظمة الرقمية وتحسن البنية التحتية التقنية، وهو ما ينسجم مع نتائج الشتيوي (2024) و Boudaoud (2023) التي أكدت على أهمية البنية التحتية والتكامل التقني في تحسين الكفاءة المصرفية وجودة الخدمات. غير أن الدراسة الحالية أضافت بعدًا تحليليًا جديدًا من خلال ربط درجة التكامل والبنية التحتية بمعايير التحول الرقمي ومستويات النضج الرقمي داخل نظام معلومات مصرفي محدد.

وتؤكد هذه النتائج تحقق أهداف الدراسة المتمثلة في توصيف الأدوات التقنية وتتبع تطورها، وبيان اتساع نطاق استخدامها، وفحص تكامل الأنظمة الرقمية، وتقويم دور البنية التحتية في دعم التحول الرقمي. كما دعمت النتائج تفسير التحول الرقمي بوصفه مسارًا تدريجيًا للنضج الرقمي، بما يتفق مع الأطر النظرية المستخدمة في الدراسة.

الأثر المحلي والعالمي للدراسة

تسهم هذه الدراسة في تقديم إطار تحليلي يمكن الاستفادة منه على المستوى المحلي في تقييم مسارات التحول الرقمي داخل المصارف الإسلامية، وبشكل خاص في البيئات المصرفية التي ما تزال في مراحل متفاوتة من التحول الرقمي، كما هو الحال في البيئة التي تعمل في إطارها المصارف الإسلامية الليبية.

كما توفر هذه الدراسة مؤشرات عملية تساعد المؤسسات المالية الليبية ومتخذي القرار في فهم العلاقة بين تطور الأدوات التقنية ومستويات النضج الرقمي، بما يدعم تخطيط وتنفيذ مبادرات التحول الرقمي بصورة أكثر فاعلية.

وتقدم الدراسة على المستوى الإقليمي والعالمي نموذجًا تحليليًا يمكن الاستفادة منه في تتبع التطور المرحلي للأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي وربطها بمعايير التحول الرقمي، كما يمكن الاستفادة من هذا النموذج في الدراسات المقارنة بين المصارف الإسلامية والمؤسسات المالية المختلفة.

كما تسهم الدراسة في دعم الأدبيات العلمية المتعلقة بالتحول الرقمي من منظور نظم المعلومات من خلال تركيزها على تطور الأدوات التقنية ودرجة تكاملها، مما يعزز دورها في التحول الرقمي المؤسسي الشامل.

رابعًا: نتائج الدراسة

أولًا: نتائج مرتبطة بالتساؤل الرئيسي

أظهرت نتائج الدراسة كما هو موضح في الجدول (5) أن معايير التحول الرقمي تجلّت بصورة تدريجية وتراكمية داخل النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي خلال الفترة(2024–2015) ، حيث ارتبط توافر هذه المعايير ارتباطًا مباشرًا بالتطور المرحلي للأدوات التقنية المستخدمة وليس بالبعد الزمني وحده. وقد انتقل النظام المعلوماتي من **مرحلة رقمنة الخدمات الأساسية** إلى **مرحلة التحول الرقمي المؤسسي الشامل**، بما يعكس وجود مسارٍ واضحٍ للنضج الرقمي وفق المعايير المعتمدة في الدراسة.

ثانيًا: نتائج التساؤلات التطبيقية

1. فيما يتعلق بنوع الأدوات التقنية وتطورها المرحلي

بيّنت نتائج الدراسة أن الأدوات التقنية المستخدمة تطورت من أدوات رقمية أساسية تركز على رقمنة الخدمات التقليدية في المرحلة الأولى كما هو موضح في الجدول (1)، إلى أدوات تفاعلية في المرحلة الثانية كما هو موضح في الجدول (2)، ثم إلى أدوات ذكية تحليلية في المرحلة الثالثة كما هو موضح في الجدول (3) ، وصولًا إلى أدوات رقمية مؤسسية متكاملة في المرحلة الرابعة كما هو موضح في الجدول (4). ويعكس هذا التطور تدرجًا واضحًا في توافر معيار نوع الأداة الرقمية بما يتوافق مع نماذج النضج الرقمي لنظم المعلومات المصرفية.

2. فيما يتعلق بنطاق الاستخدام الوظيفي للأدوات التقنية

أظهرت الدراســة انتقال **نطاق الاســتخدام الوظيفي** للأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي من **دعم الخدمات المعلوماتية وتنفيذ العمليات الأساسية، كما في الجدول (1)** ، إلى **دعم العمليات المصرفية المعقدة، كما هو موضـح في الجدول (2)** ، ثم **إلى دعم القرار المؤسـسـي والأتمتة الذكية، كما هو مبين في الجدولين (3، 4)** ويؤكد ذلك تطور دور النظام المعلوماتي من أداة تشغيلية مساندة إلى عنصر فاعل في تحسين الكفاءة المؤسسية ودعم الإدارة الاستراتيجية.

3. فيما يتعلق بدرجة تكامل الأنظمة الرقمية

كشــفت النتائج عن وجود تطور في درجة تكامل الأنظمة الرقمية، حيث بدأت المرحلة الأولى **بأنظمة منفصـلة نسـبيًا**، كما هو موضـح في الجدول (1) ، ثم انتقلت إلى **أنظمة مترابطة جزئيًا** ، كما هو موضـح في الجدول (2)، وصـولًا إلى **منصـات رقمية** مترابطة كما في الجدول (3) **ومنصـات متكاملة** كما في الجدول (4)، وذلك في المرحلتين الثالثة والرابعة. ويُعد هذا التحول مؤشـر جوهري وهام على **توافر معيار التكامل التقني** الذي يُعد أحد ركائز التحول الرقمي في نظم المعلومات المصرفية.

4. فيما يتعلق بتطور البنية التحتية التقنية الداعمة

أوضحت النتائج أن البنية التحتية التقنية شهدت تطورًا تدريجيًا من **أنظمة تقليدية** محدودة المرونة كما في الجدول (1) **إلى أنظمة محدثة كما في الجدول (2)**، ثم إلى **بنى تحتية تحليلية وســحابية داعمة للتكامل المؤســسـي** كما في الجدولين (3,4). وقد أســهم هذا التطور في تمكين الأدوات الرقمية المتقدمة وتعزيز قدرة النظام المعلوماتي على استيعاب التحول نحو الخدمات الذكية والمنصات الرقمية الشاملة.

خامسًا: التوصيات

توصلت الدراسة إلى التوصيات التالية: –

1. ضرورة اعتماد المصارف الإسلامية لإطارًا منهجيًا لتحليل التحول الرقمي من منظور تطور النظام المعلوماتي يربط بين طبيعة الأدوات التقنية المستخدمة في النظام ووظائفها ودرجة تكاملها، بدلًا من الاكتفاء بوصف المبادرات الرقمية بصورة عامة .
2. ضرورة دعم المصارف الإسلامية في بناء منصات رقمية متكاملة داخل النظم المعلوماتية لديها بما يضمن تكامل العمليات المصرفية ودعم اتخاذ القرار المؤسسي .
3. ينبغي التوسع في توظيف أدوات التحليل المتقدم والذكاء الاصطناعي داخل الأنظمة المعلوماتية بالمصارف الإسلامية، وذلك من أجل رفع مستوى النضج الرقمي ودعم الدور الاستراتيجي للتقنية بهذه المصارف.

4. يجب تطوير البنية التحتية التقنية للنظام المعلوماتي، وبشكل خاص في مجالات الحوسبة السحابية وإدارة البيانات وأمن المعلومات لضمان تعزيز استدامة التحول الرقمي .
5. الاستفادة من تجربة بيت التمويل الكويتي في مجال التحول الرقمي المرحلي، وذلك لتقييم مستوى التحول الرقمي في مصارف الإسلامية مماثلة.

الخاتمة

سعت الدراسة إلى تحليل توافر معايير التحول الرقمي في ضوء التطور المرحلي للأدوات التقنية داخل النظام المعلوماتي لبيت التمويل الكويتي خلال الفترة (2015–2024)، من خلال تتبع الأدوات الرقمية وربطها بمعايير تتعلق بنوع الأداة ونطاق استخدامها ودرجة تكاملها ودورها في العمليات المصرفية. كما أظهرت النتائج أن التحول الرقمي داخل النظام المعلوماتي اتخذ مسارًا تطوريًا تدريجيًا اعتمد على تتبع تطور الأدوات التقنية وتكاملها، بدءًا من رقمنة الخدمات الأساسية وصولًا إلى بناء منصات رقمية متكاملة على مستوى المصرف محل الدراسة. كما بينت الدراسة أن هذا التطور لم يقتصر على تحسين الخدمات المصرفية بل امتد إلى دعم اتخاذ القرار والتحول المؤسسي. كما أكدت الدراسة على أهمية اعتماد معايير تحليلية واضحة لفهم مسار التحول الرقمي داخل نظم المعلومات المصرفية الإسلامية ، بما يتيح تفسير مستويات النضج الرقمي وتتبع تطور الأدوات التقنية داخل هذه النظم .

المراجع

أولًا: المراجع العربية

1. البوشوشة، أ. (2024). التحول الرقمي في مجال الخدمات المصرفية الإسلامية. مجلة العلوم الاقتصادية، 12(1)، 23–40 . https://asjp.cerist.dz/en/article/238897
2. بالنور، م. (2024). التحول الرقمي في المصارف الإسلامية: واقع وتحديات. مجلة القرطاس للعلوم الإنسانية والاجتماعية. https://alqurtas.alandalus-libya.org.ly/ojs/index.php/qjhar/article/download/1514/1354/1727
3. الشتيوي، ح. ر. (2024). أثر تطبيق التحول الرقمي في المصارف الإسلامية الليبية على تطوير مهنة المحاسبة والمراجعة. مجلة الدراسات المحاسبية، 10(2)، 89–105. https://accounting-studies.ly/index.php/as/ar/article/view/61
4. الغزيوي، إ. ب. (2024). أثر التحول الرقمي في تحقيق الميزة التنافسية المستدامة في المصرف الإسلامي الليبي. مجلة الأستاذ، 27، 382–398. https://uotpa.org.ly/alostath/index.php/alostath/article/view/366
5. قاسم، م. (2020). دراسة استراتيجية لقياس أهم المؤشرات ذات العلاقة بالتحول الرقمي في القطاع المصرفي الليبي. مجلة العلوم التقنية، 10(1)، 45–60. https://j.istc.edu.ly/index.php/sjst/article/download/104

6. محمد، ط. ف. (2023). تقنيات التحول الرقمي وأثرها على فاعلية نظم المعلومات المحاسبية: دراسة ميدانية على المصارف التجارية الليبية. مجلة الاقتصاد والتجارة، 8(3)، 112–130. https://search.mandumah.com/Record/1614162

7. شبابحي، س.، وآخرون. (2024). التحول الرقمي في البنوك الإسلامية: واقع وتحديات – دراسة مقارنة بين بنك الراجحي وبنك قطر الإسلامي. مجلة العلوم الاقتصادية والتجارية، 12(4)، 45–60. https://asjp.cerist.dz/en/article/261556

ثانياً المراجع الإجنبية

1. Boudaoud, B. (2023). Digital transformation and its role in improving bank performance. Journal of Economic Studies, 10(4), 300–315.
2. Deloitte. (2024). Digital Banking Maturity 2024. Deloitte.https://www.deloitte.com/ce/en/industries/financial-services/research/digital-banking-maturity-2024.html
3. Digital Leadership. (2024). What Is Digital Maturity, How to Measure, Tools & Models. Digital Leadership.https://digitalleadership.com/blog/digital-maturity/
4. Evolved Metrics. (2020). Top 10 Digital Transformation Tools. Evolved Metrics. https://evolvedmetrics.com/digital-transformation-tools/
5. Hamed, A. A. (2024). The impact of digital transformation in accounting information systems on the quality of accounting disclosure in Libyan commercial banks. Journal of Economic Studies, 10(1), 101–132. https://search.mandumah.com/Record/1488576
6. Istisharat. (2024). Islamic integrated computerized banking system (ICBS Islamic). https://www.istisharat.com/Banking_Products/1/islamic-integrated-computerized-banking-system
7. Latinia. (2024). How to Achieve Digital Maturity in Banking. https://latinia.com/en/resources/improving-digital-maturity-banking
8. Mohamed, T. F. (2025). The impact of digital transformation technologies on the effectiveness of accounting information systems in

Libyan commercial banks. Journal of Accounting and Finance, 12(2), 145–160. https://journal.su.edu.ly/index.php/esj/article/view/3558

9. Ningrum, C. I., Sujianto, A. E., & Faizin, M. A. (2023). Digital transformation in banking information systems and transaction decisions at Islamic banks: Cases in Indonesia. Jurnal Penelitian Teori & Terapan Akuntansi (PETA), 8(2), 243–258.https://doi.org/10.51289/peta.v8i2.714

10. Papathomas, A. (2023). Financial institutions digital transformation: The stages of the journey and business metrics. Journal of Financial Innovation, 9(2), 145–162.https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10088737/

11. Papathomas, A., & Konteos, G. (2023). Financial institutions digital transformation: The stages of the journey and business metrics to follow. Journal of Financial Services Marketing. Advance online publication. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10088737/

12. Velmie. (2025). Top Islamic banking software providers in 2025. https://www.velmie.com/top-islamic-banking-software

13. Yasmina, L. (2023). Digital transformation in commercial banks: The impact on customer relationship management. Journal of Banking and Finance, 45(3), 210–225.https://opac.univ-mila.dz/z/330-2120-11.pdf

14. United Nations Development Programme. (2022). *Digital strategy and transformation framework*. UNDP.Digital Strategy and Transformation – UNDP

15. The Open Group. (2023). *TOGAF® standard, 10th edition: Introduction and methodology*. The Open Group.TOGAF® Standard, 10th Edition – The Open Group

Gharyan Journal of Technology (2026), 1(12), 36-60
Issued by: Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan
www.gjt.scitech-gh.edu.ly

مجلة غريان للتقنية
تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان

أثر التكامل والشراكة المصرفية على إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني في القطاع المصرفي الليبي

دراسة ميدانية على المصارف التجارية الليبية (مصرف الجمهورية، مصرف الصحاري)

سعود المهدي بن زايد*، سالم اشتيوي الغويل*، هدى البشير التويرقي*

* عضو هيئة تدريس، قسم التمويل والمصارف، جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا

sa.zayed@uot.edu.ly

تاريخ الاستلام: 2026/04/22 تاريخ القبول: 2026/04/23 تاريخ النشر: 2026/07/31

Abstract:

This study aims to measure the impact of banking integration and partnership on the effectiveness of managing operational and cyber risks of electronic payment systems in the Libyan banking sector during the period (2024-2025). The study problem crystallizes in the growing challenges of interdependency; as the expansion in technical connectivity and interoperability to enhance financial inclusion and resolve the liquidity crisis has created operational and cyber risks that transcend institutional boundaries. The study relied on the descriptive-analytical approach and used a questionnaire as a tool for data collection from a purposive sample of 40 technical and administrative staff members at (Jumhouria and Sahara) banks.

The study concluded that there is a statistically significant impact of banking integration and partnership on the effectiveness of managing operational and cyber risks of electronic payment systems. Despite tangible success in achieving technical integration with the "National Switch" at a very high approval level, this development has not been accompanied by a similar level of security integration and threat intelligence sharing. The results also proved that excessive centralized reliance on a

single provider (Moamalat Company) creates "Single Points of Failure" that threaten financial stability, which explains the service interruptions in October 2025. The study recommended the necessity of transitioning to "Zero Trust" models in Application Programming Interfaces (APIs) and establishing alternative and geographically distributed data centers to enhance operational resilience.

Keywords: Banking Integration, Electronic Payment Systems, Systemic Risks, National Switch, Cybersecurity, Libyan Banks.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى قياس أثر التكامل والشراكة المصرفية على فاعلية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني في القطاع المصرفي الليبي خلال الفترة (2024–2025). تتبلور مشكلة الدراسة في التحديات المتزايدة للاعتمادية المتبادلة؛ حيث إن التوسع في الربط التقني والتشغيل البيني (Interoperability) لتعزيز الشمول المالي وحل أزمة السيولة قد خلق مخاطر تشغيلية وسيبرانية عابرة للحدود المؤسسية. اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي واستخدمت الاستبانة كأداة لجمع البيانات من عينة قصدية شملت 40 موظفاً من الكوادر الفنية والإدارية بمصرفي (الجمهورية والصحاري).

خلصت الدراسة إلى وجود أثر ذو دلالة إحصائية للتكامل والشراكة المصرفية على فاعلية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني. ورغم وجود نجاح ملموس في تحقيق التكامل التقني مع "الموزع الوطني" بمستوى موافقة مرتفع جداً، إلا أن هذا التطور لم يواكبه مستوى مماثل من التكامل الأمني وتبادل معلومات التهديدات. كما أثبتت النتائج أن الاعتماد المركزي المفرط على موزع وحيد (شركة معاملات) يخلق نقاط فشل موحدة تهدد الاستقرار المالي، وهو ما يفسر انقطاعات الخدمة في أكتوبر 2025. وأوصت الدراسة بضرورة الانتقال إلى نماذج "الثقة الصفرية (Zero Trust) "في واجهات برمجة التطبيقات(APIs) ، وإنشاء مراكز بيانات بديلة وموزعة جغرافياً لتعزيز المرونة التشغيلية.

الكلمات المفتاحية :التكامل المصرفي، أنظمة الدفع الإلكتروني، المخاطر النظامية، الموزع الوطني، الأمن السيبراني، المصارف الليبية.

1. المقدمة

يشهد القطاع المالي والمصرفي العالمي والمحلي تطوراً متسارعاً في فلسفة العمل وآليات تقديم الخدمات، مدفوعاً بثورة التقنيات المالية (Fintech) وتغير تفضيلات العملاء نحو القنوات الرقمية. لم تعد المصارف تعتمد

على الأساليب التقليدية، بل انتقلت إلى الاعتماد الكثيف على التكنولوجيا الحديثة لتسريع دورة رأس المال وتوسيع قاعدة الشمول المالي، مما أحدث تغييراً جذرياً في هيكل البنية التحتية المالية.

وفي ظل هذا التطور، تبرز أهمية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني كأحد أهم التحديات والمشكلات التي تواجه الاستقرار المالي. تتطلب هذه الأنظمة مستويات عالية من المرونة واليقظة لضمان استمرارية الخدمة وحماية أموال وبيانات المودعين، خاصة مع تزايد التهديدات السيبرانية وتكرار حوادث انقطاع الخدمة التي تمس الثقة في القطاع المصرفي.

وتعود مسببات هذه التحديات بشكل رئيسي إلى توجه المصارف نحو التكامل والشراكة المصرفية؛ فاستجابة لضغوط السوق وحل أزمات السيولة النقدية، لم تعد المؤسسات تعمل كصوامع (Silos) منعزلة، بل انخرطت في منظومات بيئية مفتوحة (Open Ecosystems). يعتمد هذا التوجه على الربط التقني والتشغيل البيني مع أطراف متعددة، بدءاً من الاعتماد المركزي على الموزع الوطني، مروراً بالمصارف النظيرة، وصولاً إلى شركات التقنية المالية (Fintech).

إن هذا التحول نحو "الصيرفة المتصلة" يخلق اقتراناً وثيقاً (Tight Coupling) يربط بين المتغيرين؛ ففي حين يتيح التكامل والشراكة التقنية سرعة غير مسبوقة وتقليلاً لتكاليف المعاملات، فإنه يعيد تشكيل طبيعة المخاطر لتصبح عابرة للحدود المؤسسية. يعني هذا الترابط أن أي خلل تقني أو اختراق في نقطة طرفية يمكن أن يتسبب في تداعيات نظامية سريعة الانتشار، وهو ما يستوجب بالضرورة دراسة وتقييم أثر هذا التكامل والشراكة المصرفية على فاعلية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية، لضمان استقرار واستمرارية الخدمات في القطاع المصرفي الليبي.

مشكلة الدراسة وتساؤلاتها

تتبلور مشكلة الدراسة في التحديات المتزايدة التي تواجه "إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني" في القطاع المصرفي الليبي. فمع تزايد الاعتماد على قنوات الدفع الرقمية، برزت الحاجة الماسة لضمان أمن واستمرارية هذه الأنظمة. وتتفاقم هذه المشكلة نتيجة لتوجه المصارف المتسارع نحو "التكامل والشراكة المصرفية" (الاعتمادية المتبادلة) مع أطراف ثالثة وبنية تحتية مشتركة (الموزع الوطني). هذا التكامل، ورغم فوائده في تعزيز الشمول المالي، أفرز مخاطر تقنية وسيبرانية عابرة للحدود المؤسسية، مما يجعل النماذج التقليدية لإدارة المخاطر غير كافية ويخلق نقاط فشل موحدة تهدد استقرار الخدمة.

وبناءً على ذلك، يمكن صياغة السؤال الرئيسي للدراسة على النحو التالي" :ما أثر التكامل والشراكة المصرفية على فاعلية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني في القطاع المصرفي الليبي؟"

ويتفرع عن هذا السؤال الرئيسي الأسئلة الفرعية الآتية:

أ. ما هي الطبيعة الهيكلية لأنظمة الدفع الإلكتروني المتكاملة، وكيف يختلف تقييم مخاطرها عن الأنظمة المغلقة؟

ب. ما أثر الشراكة التقنية مع الأطراف الثالثة (Third–Party) وواجهات برمجة التطبيقات (APIs) على فاعلية إدارة مخاطر أنظمة الدفع الإلكتروني في المصارف الليبية؟

ج. كيف يؤثر الاعتماد على بنية تحتية مشتركة على المرونة التشغيلية وإدارة المخاطر السيبرانية لأنظمة الدفع في القطاع المصرفي الليبي؟

د. ما مدى فاعلية الإطار الرقابي والتشريعي الحالي لمصرف ليبيا المركزي في ضبط وإدارة مخاطر أنظمة الدفع الإلكتروني في ظل بيئة متكاملة؟

2. أهداف الدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل شامل وعميق لظاهرة التكامل المصرفي وتداعياتها على إدارة المخاطر، وذلك من خلال:

أ. قياس أثر التكامل والشراكة المصرفية على فاعلية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني في المصارف التجارية الليبية.

ب. توضيح المفاهيم المتعلقة بالتشغيل البيني (Interoperability) وإدارة المخاطر الناتجة عن ترابط البنى التحتية المالية.

ت. تحليل العلاقة بين المصارف التجارية وشركات القطاع الخاص والموزع الوطني، وتقييم مستوى التكامل التقني والأمني بينهم.

ث. تقييم مدى فاعلية الإطار الرقابي والتشريعي الحالي لمصرف ليبيا المركزي في ضبط مخاطر هذا التكامل المتزايد.

ج. تقديم توصيات عملية لصناع القرار في مصرف ليبيا المركزي والمصارف التجارية حول كيفية بناء مرونة سيبرانية وتشغيلية تمكن من الاستفادة من مزايا التكامل مع تحييد تهديداته.

3. أهمية الدراسة

تنبع أهمية الدراسة من عدة اعتبارات علمية وعملية:

أ. تساهم في إثراء المكتبة العربية بدراسة تحليلية تتناول المدفوعات الإلكترونية ليس كخدمة، بل ك "نظام معقد" (Complex System) يخضع لنظريات المخاطر الشبكية، وهو منظور يغيب عن كثير من الدراسات التقليدية.

ب. تغطي الدراسة التطورات المتسارعة التي شهدتها ليبيا في عامي 2024 و2025، بما في ذلك إطلاق مشاريع الدفع الفوري (Instant Payments)، وتوحيد شبكات نقاط البيع، والقرارات الحكومية الملزمة بالدفع الإلكتروني.

ج. تقدم الدراسة تحليلاً لواقعة انقطاع الموزع الوطني في أكتوبر 2025، مما يوفر دروساً حية حول أهمية التكرارية (Redundancy) وتوزيع مراكز البيانات.

4. فرضيات الدراسة

- **الفرضية الأولى** :توجد علاقة ارتباطية ذات دلالة إحصائية بين مستوى التكامل التقني والشراكة المصرفية، وبين فاعلية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني في المصارف الليبية.
- **الفرضية الثانية** :يوجد أثر سببي ذو دلالة إحصائية للتكامل والشراكة المصرفية على فاعلية إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لأنظمة الدفع الإلكتروني.
- **الفرضية الثالثة** :يختلف مستوى تطبيق المصارف الليبية لاستراتيجيات إدارة مخاطر الطرف الثالث (TPRM)عن المعايير الدولية المرجعية (معايير لجنة بازل و PCI-DSS) لمواجهة التهديدات السيبرانية المتقدمة في بيئة متكاملة.

5. نموذج الدراسة:

يعتمد النموذج على متغيرين رئيسيين:

أ. **المتغير المستقل (التكامل والشراكة المصرفية)** :ويتم قياسه من خلال أبعاد (التكامل التقني، الشراكات الاستراتيجية، وتوحيد المعايير).

ب. **المتغير التابع (فاعلية إدارة مخاطر أنظمة الدفع الإلكتروني)** :ويتم قياسه من خلال أبعاد (المخاطر التشغيلية، الأمن السيبراني، والكفاءة الاقتصادية).

7. الدراسات السابقة

الجدول رقم (1)

م	عنوان الدراسة	المنهجية المتبعة	أبرز النتائج	أوجه التشابه والاختلاف (الفجوة البحثية)
.1	التشغيل البيني لأنظمة الدفع السريع عبر الحدود: الحوكمة والرقابة **التوثيق :** Bank for International Settlements (BIS). (2022). *Linking fast*	تحليل مقارن وتقييم نوعي لترتيبات الربط البيني لأنظمة الدفع السريع.	بيّنت أن التكامل والربط البيني يزيد من سرعة وفعالية دوران الأموال، ولكنه يرفع بشدة من مستوى المخاطر التشغيلية	**التشابه:** دراسة مخاطر التكامل البيني. **الاختلاف:** تركز الدراسة السابقة على الربط "عبر الحدود" (بين الدول).

	payment systems across borders: governance and oversight. Committee on Payments and Market Infrastructures.		ومخاطر "الطرف الثالث"، مما يوجب وجود أطر حوكمة مشتركة صارمة.	ما يميز دراستك: تركز على الربط "الداخلي" بين المصارف العامة والخاصة، في بيئة اقتصادية تعاني من أزمة سيولة نقدية وتفرض الدفع الإلكتروني كبديل إجباري.
.2	دور الامتثال المصرفي في الحد من مخاطر الدفع الإلكتروني **التوثيق:** الطائي، أ.، والشمري، م. (2023). دور الامتثال المصرفي في الحد من مخاطر الدفع الإلكتروني: بحث تطبيقي. *مجلة دراسات محاسبية ومالية*، 18(63)، 1-20.	التحليل الوصفي التطبيقي، باستخدام بيانات قطاعية.	أثبتت أن للامتثال المصرفي دوراً فعالاً في تقليل مخاطر أنظمة الدفع، وأن غياب الامتثال التقني يعرض المصارف لعمليات قرصنة ومخاطر تشغيلية عالية جداً.	**التشابه :**تناول المخاطر التشغيلية والسيبرانية للدفع الإلكتروني. **الاختلاف :**تقتصر دراستهم على "الامتثال الداخلي" للمصرف المستقل. ما يميز دراستك :تقيس المخاطر "العابرة للحدود المؤسسية" الناتجة عن التكامل والشراكة مع أطراف ثالثة (شركات التقنية المالية والموزع الوطني).
.3	مزودو التكنولوجيا والاستقرار المالي: نظرة عامة على المخاطر والأطر التنظيمية **التوثيق:** Chen, B., & Baird, M. (2025). Technology Providers and Financial Stability: Overview of Risks and Regulatory Frameworks. Chicago Fed Working Paper No. 2025-08.	تحليل نوعي واستعراض هيكلي للأدبيات التنظيمية والتشريعية.	أوضحت أن مزودي التكنولوجيا (TPSPs)أصبحوا بمثابة "نقاط فشل موحدة (SPOF) " للمصارف، وأن الافتقار إلى التشغيل البيني الآمن يجعل تكلفة إدارتهم وتغييرهم باهظة ومصدراً للمخاطر النظامية.	**التشابه** :تتطابق في مناقشة مفهوم "نقطة الفشل الموحدة.(SPOF) " **الاختلاف** :تركز السابقة على شركات التكنولوجيا العالمية الكبرى كأطراف ثالثة. ما يميز دراستك :تقوم بإسقاط ونمذجة هذا المفهوم على مركزية "الموزع الوطني" الذي تديره شركة واحدة

				(معاملات) في السوق الليبي.
4.	أثر مخاطر وسائل الدفع على ممارسة التجارة الإلكترونية **التوثيق:** بوجمعة، هـ .(2023) *أثر مخاطر وسائل الدفع على ممارسة التجارة الإلكترونية: دراسة ميدانية في بنك خليج الجزائر* (رسالة ماجستير). جامعة محمد خيضر بسكرة، الجزائر.	منهج وصفي تحليلي مع دراسة حالة ميدانية (أدوات الاستبانة والمقابلة).	أظهرت أن المخاطر التشغيلية والسيبرانية المرتبطة بوسائل الدفع الحديثة تشكل عائقاً مستمراً، وأن مستوى الوعي الأمني يختلف بشدة بين المؤسسات المالية والأفراد.	**التشابه** :دراسة ميدانية باستخدام الاستبانة لقياس مخاطر الدفع الرقمي. **الاختلاف** :تدرس السابقة الأثر من زاوية مبيعات "التجارة الإلكترونية والعملاء." ما يميز دراستك :تدرس الموضوع من زاوية "المخاطر النظامية التكاملية" بين المصارف النظيرة والعمليات الخلفية (Back-end)للربط التقني.
5.	المرونة التشغيلية: الأطراف الثالثة الحيوية للقطاع المالي **التوثيق:** Bank of England. (2024). *Operational resilience: Critical third parties to the UK financial sector* (Supervisory Statement SS6/24).	منهج تنظيمي تحليلي لمسح المخاطر النظامية وبناء سيناريوهات التعافي.	خلصت إلى أن فشل "طرف ثالث حيوي" (CTP) يقدم خدمات مترابطة لعدة مؤسسات مالية يمثل تهديداً مباشراً وسريعاً للاستقرار المالي، وألزمت المصارف باختبارات ضغط متقدمة.	**التشابه** :معالجة إشكالية وتبعات الاعتمادية المتبادلة وإدارة مخاطر الطرف الثالث.(TPRM) **الاختلاف** :تضع أطراً تشريعية لدولة مستقرة ومتقدمة (المملكة المتحدة). ما يميز دراستك :تختبر واقع وتداعيات انقطاع الموزع الوطني الليبي كطرف ثالث حيوي (مثل حادثة أكتوبر 2025)،

				وتقيّم مدى تطبيق هذه المبادئ عملياً في المصارف الليبية.
6.	مرونة أنظمة الدفع غير النقدية في الاتحاد المصرفي **التوثيق:** European Parliament. (2025). *Resilience of the Banking Union's Non-Cash Payment Systems*. Directorate-General for Internal Policies of the Union.	تحليل هيكلي وتقييم نوعي لمرونة شبكات الدفع الأوروبية المدمجة.	أكدت أن الاعتماد المتزايد على مزودي الخدمات السحابية والأنظمة المصرفية المتكاملة يخلق نقاط ضعف، مما يتطلب نقل التركيز الرقابي من "أمن المؤسسة الفردية" إلى "مرونة الشبكة المشتركة" ككل.	**التشابه** :التركيز على ضرورة مشاركة المعلومات الأمنية بدلاً من انعزال المصارف. **الاختلاف** :تُطبق على بيئة مصرفية أوروبية مدمجة بالكامل وتمتلك بنية تحتية فائقة. ما يميز دراستك :إثبات إحصائي بأن المصارف الليبية حققت تقدماً ملموساً في "التكامل التقني" ولكنها لا تزال متأخرة جداً في تبني "التكامل الأمني" ومشاركة تهديدات الشبكة، مما يشكل خطراً مضاعفاً.

8. مجتمع وعينة الدراسة

أ. **مجتمع الدراسة** :نظراً لطبيعة الدراسة الميدانية، يتمثل مجتمع الدراسة في المصارف التجارية الليبية محل التطبيق، وهما تحديداً:

- مصرف الجمهورية.
- مصرف الصحاري.

حيث يمثل هذا المجتمع البيئة التنظيمية التي تُمارس فيها عمليات التكامل والشراكة المصرفية وإدارة مخاطر الدفع الإلكتروني.

ب. **عينة الدراسة** :نظراً للطبيعة الفنية والتخصصية لموضوع الدراسة، سيتم الاعتماد على عينة عمدية (قصدية) من الكوادر الوظيفية الفاعلة في المصرفين المذكورين (مصرف الجمهورية ومصرف الصحاري)، ممن يمتلكون المعرفة والخبرة بموضوعات الشراكة والمخاطر والتقنية. وتشمل الفئات التالية:

- المديرون التنفيذيون ونوابهم.
- مديرو إدارات المخاطر والامتثال.
- مديرو إدارات تقنية المعلومات.(IT)
- مديرو العمليات المصرفية الإلكترونية.
- رؤساء الأقسام المختصة بتطوير المنتجات والشراكات الاستراتيجية.

9. الإطار النظري لأنظمة الدفع والشراكة في عصر الاقتصاد الرقمي:

يتناول هذا الإطار الأسس النظرية والمفاهيمية لأنظمة الدفع الإلكتروني، مع التركيز على الديناميكيات الجديدة التي فرضها التكامل والشراكة بين المصارف والجهات الفاعلة الأخرى.

1.9 ماهية أنظمة الدفع الإلكتروني والشراكة المصرفية

1.1.9 تطور أنظمة الدفع: من الانعزال إلى المنظومات البيئية

تطورت أنظمة الدفع الإلكتروني (Electronic Payment Systems – EPS) بشكل جذري عبر العقود الماضية. في السابق، كانت هذه الأنظمة تعمل كـ "حلقات مغلقة" (Closed Loops)، حيث تقتصر المعاملات داخل شبكة المصرف الواحد أو شبكة البطاقات المحددة (Proprietary Networks). كان الانتقال بين هذه الشبكات يتطلب عمليات تسوية يدوية ومعقدة ومكلفة. أما اليوم، فقد تحولت الصناعة نحو "المنظومات المفتوحة" (Open Ecosystems) التي تعتمد على البنية التحتية المشتركة"(World Bank, 2020) .

يُعرّف نظام الدفع الإلكتروني الحديث بأنه "مجموعة شاملة من الأدوات، والإجراءات المصرفية، وشبكات تحويل الأموال، والبنى التحتية التقنية التي تضمن تداول القيمة المالية بشكل آمن وسلس ولحظي بين الأطراف المختلفة، بغض النظر عن المؤسسة المالية التي ينتمون إليها"(World Bank, 2020) .

ويشير بنك التسويات الدولية (BIS, 2021) إلى أن الأنظمة الحديثة تتكون من طبقات مترابطة: طبقة واجهات المستخدم (Front-end)، طبقة المعالجة والمقاصة (Clearing & Processing)، وطبقة التسوية النهائية (Settlement) التي تتم عادةً عبر أموال البنك المركزي لضمان "وحدانية النقد" (Singleness of Money).

2.1.9 مفهوم الشراكة والتكامل (Interoperability): العصب الجديد للمصرفية

يُعد "التشغيل البيني" أو التكامل (Interoperability) المفهوم الجوهري الذي تقوم عليه الشراكات المصرفية الحديثة. ويُعرف بأنه القدرة التقنية، والتنظيمية، والقانونية لأنظمة وشبكات مختلفة على التواصل وتبادل البيانات وتنفيذ المعاملات فيما بينها بشفافية، بحيث لا يشعر المستخدم النهائي بالفروقات بين الأنظمة.

- **مستويات التكامل في الأنظمة المصرفية:**

أ. **التكامل على مستوى المنصة (Platform–Level Interoperability):** يتيح للعملاء تحويل الأموال بين منصات مختلفة (مثل من حساب مصرفي في بنك الجمهورية إلى محفظة "سداد" الإلكترونية). هذا النوع من التكامل يكسر احتكار المنصات المغلقة ويعزز تأثيرات الشبكة (Network Effects).

ب. **التكامل على مستوى البنية التحتية (Infrastructure–Level):** يتمثل في استخدام بنية تحتية مشتركة للمعالجة، مثل "المحولات الوطنية" (National Switches) التي تربط كافة أجهزة الصراف الآلي (ATM) ونقاط البيع (POS) في الدولة، مما يسمح لبطاقة أي مصرف بالعمل على أي جهاز.

ج. **التكامل على مستوى الوكيل (Agent–Level):** يسمح لنقاط الخدمة (الوكلاء) بتقديم خدمات لمستخدمي بنوك متعددة، وهو ما يعزز الانتشار الجغرافي للخدمات **المالية بتكلفة** أقل. (Bank for International Settlements, 2022)

الجدول رقم (2) مقارنة بين الأنظمة المغلقة والأنظمة المتكاملة

وجه المقارنة	الأنظمة المغلقة (Closed Loop)	الأنظمة المتكاملة (Interoperable/Open)
إمكانية الوصول	مقتصرة على عملاء الشبكة نفسها	مفتوحة لعملاء الشبكات الأخرى
التكلفة	تكاليف تشغيلية عالية (تكرار البنية التحتية)	تكاليف أقل (مشاركة البنية التحتية)
المخاطر	مخاطر محصورة داخل المؤسسة	مخاطر نظامية وعدوى (Systemic Risk)
تجربة العميل	مجزأة ومقيدة	سلسة وموحدة
المثال الليبي	خدمة "وتبة" (سابقاً) لمصرف التجارة والتنمية	الموزع الوطني لشركة معاملات

المصدر: إعداد الباحثين بالاستناد على أدبيات الدراسة.

3.1.9 البنية التحتية اللازمة للتكامل: دور المحولات الوطنية

لتحقيق الشراكة الفعالة، تعتمد الدول على المحولات الوطنية (National Payment Switches – NPS) التي تعمل كـ "محور ارتكاز (Hub) يربط كافة الأطراف.

أ. **آلية العمل:** يقوم المحول الوطني باستلام طلب المعاملة من الجهة المستحوذة (Acquirer)، وتوجيهه (Routing) إلى الجهة المصدرة (Issuer) للموافقة، ثم إعادة الرد، وإجراء عملية التقاص (Netting) في نهاية اليوم لتسوية الفروقات المالية عبر البنك المركزي.

ب. **الأهمية الاستراتيجية:** تضمن المحولات الوطنية السيادة على البيانات المالية (Data Sovereignty)، وتقليل الاعتماد على الشبكات الدولية (مثل Visa/Mastercard) في المعاملات المحلية، وخفض الرسوم.(World Bank, 2020)

ج. **النموذج الليبي:** تلعب شركة "معاملات" للخدمات المالية هذا الدور في ليبيا، حيث تدير الموزع الوطني الذي يربط المصارف التجارية. إلا أن هذا النموذج المركزي يخلق تحدياً كبيراً يتمثل في "نقطة الفشل الموحدة" (Single Point of Failure)، حيث يؤدي أي توقف في الموزع إلى شلل تام في منظومة الدفع الوطنية، كما حدث في التوقفات المتكررة خلال 2024–2025.

4.1.9 دور شركات التقنية المالية (Fintech) كشريك في العمليات

تحولت العلاقة بين المصارف وشركات الـ Fintech من المنافسة الشرسة إلى التكامل الاستراتيجي.

أ. **نموذج الشراكة:** تقدم شركات الـ Fintech الابتكار، وواجهات المستخدم السهلة، والوصول للشرائح غير المخدومة، بينما تقدم المصارف الملاءة المالية، والامتثال التنظيمي، والبنية التحتية للتسوية.

ب. **التطورات في ليبيا:** في نوفمبر 2024، خطت ليبيا خطوة هامة بالسماح لشركة "تداول" (قطاع خاص) بربط شبكتها مع الموزع الوطني "معاملات" (قطاع عام) (شركة معاملات للخدمات المالية، 2024). هذا التكامل بين القطاعين العام والخاص (PPP) يهدف إلى توسيع شبكة القبول، ولكنه يفرض تحديات جديدة في توحيد البروتوكولات الأمنية وإدارة مخاطر الطرف الثالث.

2.9 المخاطر المرتبطة بأنظمة الدفع الإلكتروني في ظل التكامل

تفترض نظرية النظم المعقدة (Complex Systems Theory) أن زيادة مستويات الربط والتكامل التقني تؤدي بطبيعتها إلى رفع كفاءة التشغيل، ولكنها في الوقت ذاته تخلق مسارات جديدة ومترابطة لانتقال التهديدات. واستناداً إلى مبادئ لجنة بازل للرقابة المصرفية(Basel Committee, 2024) ، فإن نجاح التكامل المصرفي يتطلب بالضرورة تطويراً موازياً في أطر إدارة المخاطر التشغيلية والسيبرانية لاستيعاب الانكشاف الجديد على الأطراف الثالثة. يشكل هذا الأساس النظري المنطلق لافتراض وجود علاقة ارتباطية وتأثيرية طردية بين التوسع في الشراكات المصرفية وبين الحاجة الملحة لرفع فاعلية ضوابط إدارة المخاطر لاحتواء التهديدات الناشئة.

1.2.9 نظرية "الاقتران الوثيق" (Tight Coupling) وانتقال المخاطر

تستند إدارة المخاطر في الأنظمة المتكاملة إلى نظرية "الاقتران الوثيق"، التي تشير إلى أن الأنظمة المترابطة بشدة تسمح بانتشار الاضطرابات بسرعة هائلة تجعل من الصعب احتواؤها أو عزلها. في شبكات الدفع المتكاملة، أي فشل في عقدة واحدة (Node) يمكن أن ينتشر كـ "تأثير الدومينو" ليصيب الشبكة بأكملها(Perrow, 1999) .

2.2.9 المخاطر التشغيلية والتقنية (Operational Risks)

تعد المخاطر التشغيلية الهاجس الأكبر في البيئات المتكاملة، وتنقسم إلى:

أ. **فشل النظام والبنية التحتية (System Failure):** الاعتماد على التكنولوجيا يعني أن انقطاع التيار الكهربائي، أو فشل الخوادم، أو انقطاع الاتصالات (وهي مشاكل شائعة في ليبيا) يؤدي إلى توقف الخدمة فوراً. في الأنظمة المتكاملة، توقف "بوابة الدفع" المركزية يعني توقف المبيعات لآلاف التجار في آن واحد.(Bank of England, 2024)

ب. **مخاطر التوسع والأداء (Performance & Scalability):** مع زيادة حجم المعاملات الإلكترونية (التي نمت بنسبة 75% في النصف الأول من 2025 في ليبيا)، قد تعجز الأنظمة القديمة (Legacy Systems) في المصارف عن معالجة هذا الكم الهائل من البيانات في الوقت الفعلي، مما يؤدي إلى اختناقات (Bottlenecks) وفشل في إتمام المعاملات.

ج. **نقاط الفشل الموحدة (SPOF):** الاعتماد الحصري على شركة "معاملات" كموزع وحيد دون وجود بدائل (Redundancy) يعرض الدولة بأكملها لخطر التوقف، وهو ما يستدعي استراتيجيات لتوزيع مراكز البيانات.(Chen & Baird, 2025)

3.2.9 مخاطر الأمن السيبراني والاحتيال (Fraud & Cybersecurity)

أ. **هجمات سلسلة التوريد (Supply Chain Attacks):** قد لا يستهدف المخترقون المصرف القوي أمنياً بشكل مباشر، بل يهاجمون شريكاً صغيراً (Fintech Startup) أو مزود خدمة طرف ثالث متصل بشبكة المصرف، ومن خلاله يتسللون إلى النظام المصرفي الرئيسي. هذا النوع من المخاطر يتطلب من المصارف مراقبة ليس فقط شركائها، بل وشركاء شركائهم (الطرف الرابع).

ب. **الاحتيال عبر الهندسة الاجتماعية:** مع دخول شرائح جديدة من المجتمع غير الملمين بالتقنية إلى النظام المالي (الشمول المالي)، تزداد فرص الاحتيال عبر التصيد (Phishing) واستغلال جهل المستخدمين، خصوصاً مع تقنيات مثل QR Codes التي قد يتم تزويرها.

ج. **تهديدات الفدية (Ransomware):** تشير التقارير إلى أن المؤسسات المالية والجهات الحكومية في ليبيا تعاني من ضعف في الضوابط الأمنية ووجود ثغرات غير معالجة، مما يجعلها عرضة لهجمات الفدية التي قد تشفر بيانات الدفع الحساسة.

د. **مخاطر أمن واجهات برمجة التطبيقات :(API Security Risks)** يختلف هذا النوع من المخاطر عن الاختراقات التقليدية للشبكات. ففي بيئة الصيرفة المفتوحة والشراكة مع شركات الـFintech ، يتم تبادل البيانات عبر واجهات برمجة التطبيقات .(APIs) ويكمن الخطر الأكبر هنا في ثغرات 'التحكم في الوصول(Broken Object Level Authorization – BOLA)، حيث يمكن للمهاجمين استغلال نقاط النهاية (Endpoints) للوصول إلى بيانات حسابات لا تخصهم بمجرد تغيير معرف المستخدم في كود الطلب البرمجي. تتطلب هذه المخاطر حلولاً متخصصة مثل 'بوابات أمن الـ (API Gateways) 'API

التي تختلف جذرياً عن جدران الحماية النارية التقليدية (Firewalls) المستخدمة في المصارف حالياً. (PCI SSC, 2022)

4.2.9 المخاطر النظامية (Systemic Risks)

تنشأ المخاطر النظامية عندما يؤدي عجز أحد المشاركين في نظام الدفع (مثل بنك كبير أو غرفة مقاصة) عن الوفاء بالتزاماته المالية إلى عجز مشاركين آخرين عن الوفاء بالتزاماتهم، مما يهدد استقرار النظام المالي ككل، وفي أنظمة التسوية الآنية (RTGS)، نقص السيولة لدى أحد المصارف الكبرى (مثل مصرف الجمهورية في ليبيا) قد يؤدي إلى تكدس أوامر الدفع في طوابير الانتظار، مما يجمّد السيولة في السوق ويمنع المصارف الأخرى من استلام مستحقاتها.(European Parliament, 2025)

5.2.9 مخاطر الطرف الثالث (Third–Party Risks – TPRM)

تعتبر إدارة مخاطر الطرف الثالث من أعقد التحديات في البيئة التشاركية ويمكن تأصيل هذه المخاطر نظرياً من خلال 'نظرية الوكالة(Agency Theory) '، حيث يمثل المصرف 'الأصيل (Principal) 'ومزود الخدمة التقنية 'الوكيل .(Agent) 'تنشأ الإشكالية هنا نتيجة 'عدم تماثل المعلومات(Information Asymmetry) '، حيث يمتلك مزود الخدمة تفاصيل دقيقة عن كفاءة أنظمته الأمنية قد لا يدركها المصرف بالكامل. هذا التفاوت قد يخلق ما يُعرف بـ 'الخطر الأخلاقي(Moral Hazard) '، حيث قد يميل الوكيل (شركة التقنية) إلى تقليص استثماراته في ضوابط الحماية لخفض التكاليف التشغيلية، معتمداً على حقيقة أن المصرف (الأصيل) هو من سيتحمل التبعات القانونية والضرر الأكبر في السمعة عند حدوث اختراق. المبدأ الحاكم هنا هو: يمكن للمصرف تفويض العمليات، لكنه لا يستطيع تفويض المسؤولية. (Agency Theory)

- إذا فشلت شركة معالجة مدفوعات متعاقدة مع المصرف في حماية بيانات العملاء، فإن المصرف هو من يتحمل المسؤولية القانونية وتضرر السمعة.
- في ليبيا، أصدر المصرف المركزي تعليمات مشددة في 2024 و2025 لتنظيم العلاقة مع شركات الدفع، مؤكداً على ضرورة وجود تراخيص سارية ورقابة مستمرة(Basel Committee, 2024) .

3.9 وسائل الرقابة والتدقيق في البيئة المتكاملة

لمواجهة هذه المخاطر المتشابكة، لم تعد أساليب الرقابة التقليدية (Post–audit) كافية، بل برزت الحاجة إلى أطر رقابية استباقية وتكنولوجية.

1.3.9 الإطار الرقابي للمصارف المركزية (Supervisory Framework)

يقع العبء الأكبر على المصرف المركزي لضمان سلامة النظام المتكامل. تشمل الأدوات الرقابية الحديثة:

أ. **الترخيص والتنظيم القائم على النشاط:** الانتقال من تنظيم المؤسسات إلى تنظيم الأنشطة. أي جهة تمارس نشاط الدفع الإلكتروني، سواء كانت بنكاً أو شركة تقنية، يجب أن تخضع لرقابة المصرف المركزي. يتضح هذا في قوائم الشركات المرخصة في ليبيا وتواريخ تجديد تراخيصها.

ب. **فرض المعايير التقنية (Standardization):** إلزام جميع الأطراف بمعايير موحدة لتبادل الرسائل المالية (مثل ISO 20022) ومعايير أمنية مثل (PCI-DSS) لضمان أن التكامل لا يأتي على حساب الأمان. ويشمل ذلك تبني مبادئ لجنة بازل للعمليات المصرفية الإلكترونية (Basel Committee on e-Banking)ومبادئ البنية التحتية للأسواق المالية(PFMI) ، التي تؤكد على ضرورة وجود 'إدارة مخاطر شاملة' تغطي كافة المشاركين في سلسلة الدفع، وليس المصرف فقط.

ج. **المراقبة المباشرة للبنية التحتية:** في تحول استراتيجي، اتجه مصرف ليبيا المركزي في أواخر 2024 نحو تعزيز سيطرته المباشرة على "الموزع الوطني" ونقل إدارته أو الإشراف اللصيق عليه، لضمان استمرارية الخدمة واعتبارها مسألة "سيادة وطنية"(PCI SSC, 2022) .

2.3.9 استراتيجيات إدارة المخاطر الداخلية (Internal Risk Management)

يجب على المصارف تبني استراتيجيات دفاعية متقدمة:

أ. **نموذج خطوط الدفاع الثلاثة المحدث:** دمج الأمن السيبراني في خط الدفاع الأول (الوحدات التشغيلية)، وتعزيز دور إدارة المخاطر في مراقبة الشركاء (خط الدفاع الثاني)، والتدقيق التقني المستمر (خط الدفاع الثالث). (الطائي والشمري، 2023)

ب. **العناية الواجبة للطرف الثالث (Third-Party Due Diligence):** قبل الارتباط بأي شركة Fintech، يجب على المصرف إجراء فحص دقيق لقدراتها التقنية، ووضعها المالي، وامتثالها الأمني.

ج. **خطط استمرارية الأعمال والتعافي من الكوارث (BCP/DR):** وجود مراكز بيانات بديلة (Disaster Recovery Sites) وأنظمة احتياطية قادرة على العمل فور تعطل النظام الرئيسي، وهو درس مستفاد بقوة من انقطاعات 2025 في ليبيا. (مصرف ليبيا المركزي، 2025)

4.9 تحليل الواقع الليبي _ تحديات وفرص التكامل (2020-2025)

يسقط هذا الفصل المفاهيم النظرية على الواقع العملي للقطاع المصرفي الليبي، مستعرضاً التطورات الدراماتيكية التي شهدها القطاع في السنوات الأخيرة.

1.4.9 واقع البنية التحتية والتشريعية في ليبيا

شهدت ليبيا في عامي 2024 و2025 ثورة تنظيمية وتقنية في مجال الدفع الإلكتروني، مدفوعة بالحاجة الملحة لمعالجة أزمة السيولة النقدية المزمنة.

أ. **القرارات الإلزامية:** "أصدرت حكومة الوحدة الوطنية القرار رقم 135 لسنة 2025، الذي يلزم كافة الأنشطة التجارية والخدمية بتوفير وسائل دفع إلكتروني، مع فرض عقوبات صارمة تصل إلى سحب التراخيص وإغلاق المحال للمخالفين (حكومة الوحدة الوطنية، 2025)"، هذا القرار نقل الدفع الإلكتروني من "خيار" إلى "إلزام قانوني".

ب. **تطوير الخدمات:** أطلق المصرف المركزي مشاريع الدفع الفوري (Instant Payments) وخدمات الدفع عبر رمز الاستجابة السريعة (QR Code) في أغسطس 2024، لتمكين التحويل اللحظي للأموال بين الأفراد والتجار عبر مختلف المصارف.

2.4.9 تحديات الموزع الوطني وشركة معاملات

رغم التقدم المحرز، يواجه نموذج "الموزع الوطني الموحد" تحديات جسيمة:

أ. **انقطاع أكتوبر 2025:** تعرض الموزع الوطني لانقطاع كبير أدى إلى توقف شبه تام لخدمات نقاط البيع والصراف الآلي في البلاد. هذا الحادث كشف عن هشاشة في البنية التحتية ومركزية المخاطر. استدعى ذلك تدخلاً عاجلاً من محافظ المصرف المركزي، الذي أكد أن الموزع "بنية تحتية سيادية" لا يُقبل توقفها، ووجه بضرورة رفع كفاءة مراكز البيانات وتوفير البدائل.

ب. الشراكة مع القطاع الخاص: في محاولة لتخفيف الضغط وتوزيع المخاطر، سمح المصرف المركزي لشركات خاصة كبرى مثل "تداول" بربط شبكاتها مع الموزع الوطني. هذا التكامل يعزز الانتشار ولكنه يتطلب بروتوكولات ربط (Interfaces) محكمة لمنع انتقال الثغرات الأمنية من الشبكات الخاصة إلى الشبكة الوطنية(Basel Committee, 2024).

3.4.9 الأمن السيبراني في القطاع المصرفي الليبي

" تشير تقارير الهيئة الوطنية لأمن المعلومات (NISSA) لعام 2024 إلى وضع مقلق فيما يخص الأمن السيبراني في ليبيا (الهيئة الوطنية لأمن المعلومات، 2024)".

أ. أظهرت التقييمات وجود ثغرات عالية الخطورة (High-severity vulnerabilities) في أنظمة عدد كبير من المؤسسات الحكومية والمالية، مع ضعف في الالتزام بمعايير الحوكمة الأمنية.

ب. تم رصد نشاطات برمجيات خبيثة ومحاولات اختراق تستهدف البنية التحتية، مما يؤكد أن التوسع في الدفع الإلكتروني لم يواكبه تحصين أمني كافٍ، مما يضع أموال المودعين وبياناتهم في دائرة الخطر.

10. الإطار العملي للدراسة:

1.10 منهج الدراسة

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، حيث يهدف هذا المنهج إلى وصف ظاهرة التكامل المصرفي وإدارة المخاطر كما هي في الواقع، ومن ثم تحليل البيانات المجمعة عبر الاستبانة لقياس أثر المتغير المستقل على المتغير التابع واستخراج النتائج والتوصيات.

2.10 مجتمع وعينة الدراسة

أ. **مجتمع الدراسة** :يتمثل في كافة الموظفين العاملين في الإدارات ذات الصلة (إدارة المخاطر، إدارة تقنية المعلومات، العمليات المصرفية الإلكترونية) في المصارف التجارية الليبية المحددة في الاستبانة (مصرف الجمهورية، مصرف الصحاري).

ب. **عينة الدراسة** :تم اختيار عينة (عشوائية/أو قصدية) من المجتمع المستهدف، نظراً لأن الاستبانة موجهة لذوي الاختصاص والخبرة (مدراء إدارات، رؤساء أقسام، موظفين مختصين).

3.10 أداة الدراسة (الاستبانة)

تم تصميم الاستبانة بناءً على الأدبيات النظرية والدراسات السابقة، وتكونت من قسمين:

أ. **البيانات الديموغرافية** :(المصرف، المسمى الوظيفي، سنوات الخبرة، المؤهل العلمي).

ب. **محاور الدراسة** :تم استخدام مقياس "ليكرت الخماسي (5-point Likert Scale) "لتحديد درجة الموافقة (من 1 "غير موافق بشدة" إلى 5 "موافق بشدة")، وانقسمت إلى:

- **المحور الأول (المتغير المستقل)** :التكامل والشراكة المصرفية، وتضمن (9) فقرات موزعة على ثلاثة أبعاد: التكامل التقني، الشراكات الاستراتيجية، وتوحيد المعايير.
- **المحور الثاني (المتغير التابع)** :فاعلية إدارة مخاطر الدفع الإلكتروني، وتضمن (6) فقرات موزعة على ثلاثة أبعاد: المخاطر التشغيلية، الأمن السيبراني، والكفاءة الاقتصادية.

4.10 عرض وتحليل النتائج واختبار الفرضيات

1.4.10 تمهيد

يتناول هذا الفصل عرضاً لنتائج التحليل الإحصائي للبيانات التي تم جمعها عبر الاستبانة الموزعة على موظفي (مصرف الجمهورية ومصرف الصحاري)، حيث يبدأ باختبار جودة الأداة، ثم وصف خصائص العينة، يليه التحليل الوصفي لمتغيرات الدراسة، وأخيراً اختبار الفرضيات الثلاث للدراسة ومناقشتها.

2.4.10 اختبار صدق وثبات الأداة(Reliability)

للتأكد من اتساق فقرات الاستبانة، تم استخدام معامل "ألفا كرونباخ". بعد المعالجة الإحصائية واستبعاد الفقرات الضعيفة، جاءت النتائج كما يلي:

جدول رقم (3) نتائج اختبار الثبات

البيان	عدد الفقرات	قيمة ألفا كرونباخ	مستوى الثبات
جميع محاور الاستبانة	15	0.810	مرتفع جداً

بلغت قيمة معامل الثبات الكلية(**0.810**) ، وهي قيمة أعلى من الحد المقبول إحصائياً (0.70)، مما يؤكد أن الأداة تتمتع بموثوقية عالية وصالحة للتحليل العلمي.

3.4.10 وصف خصائص عينة الدراسة (التحليل الديموغرافي)

فيما يلي توزيع أفراد العينة البالغ عددهم (40) مبحوثاً:

جدول رقم (4) توزيع أفراد العينة

المتغير	الفئة	التكرار	النسبة المئوية (%)
المصرف	مصرف الجمهورية	20	%50.0
	مصرف الصحاري	20	%50.0
المسمى الوظيفي	رئيس قسم	10	%25.0
	موظف مختص	30	%75.0
الخبرة	أقل من 5 سنوات	4	%10.0
	من 5 – 10 سنوات	22	%55.0
	أكثر من 10 سنوات	14	%35.0
المؤهل	دبلوم	10	%25.0
	بكالوريوس	16	%40.0
	دراسات عليا	14	%35.0

تشير الجداول إلى أن العينة متوازنة، وتتميز بالخبرة العالية حيث أن (90%) منهم لديهم خبرة تزيد عن 5 سنوات، و(75%) يحملون مؤهلات جامعية، مما يعزز مصداقية الإجابات.

4.4.10 التحليل الوصفي لمتغيرات الدراسة

يهدف هذا الجزء لاستعراض مستوى "التكامل" ومستوى "إدارة المخاطر" من وجهة نظر المبحوثين، وهو ما يمهد لاختبار الفرضيات.

جدول رقم (5) تحليل متغيرات الدراسة

م	العبارة (الفقرة)	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	مستوى الموافقة	الترتيب
أولاً	**المحور الأول: التكامل والشراكة المصرفية**				
1	يرتبط المصرف بشكل فعال مع "الموزع الوطني" (Moamalat) مما يتيح تبادل البيانات بسلاسة.	4.55	0.597	مرتفع جداً	1
2	يمتلك المصرف بنية تحتية مرنة تسمح بقبول بطاقات المصارف المحلية الأخرى (Interoperability).	4.50	0.599	مرتفع جداً	2
3	توجد واجهات ربط موحدة (APIs) آمنة تسمح بتكامل أنظمتنا مع تطبيقات الدفع الخارجية.	4.25	0.898	مرتفع جداً	3
4	لدى المصرف شراكات فعالة مع شركات التقنية المالية (Fintech) لتطوير حلول دفع آمنة.	4.10	0.777	مرتفع	4
5	يلتزم المصرف بتطبيق معايير أمنية موحدة (مثل PCI-DSS) متفق عليها ضمن الشبكة الوطنية.	4.05	0.749	مرتفع	5
6	يساهم الربط الشبكي الموحد بين المصارف في تسريع عمليات المقاصة والتسوية الإلكترونية.	3.90	0.708	مرتفع	6
7	يشارك المصرف في تكتلات أو لجان مشتركة مع مصارف أخرى لمناقشة التحديات الأمنية.	3.65	0.735	مرتفع	7
8	هناك تنسيق مستمر مع شركات الاتصالات ومزودي الخدمة لضمان استقرار قنوات الاتصال.	3.60	0.590	مرتفع	8

9	توجد إجراءات موحدة للتعرف على العميل (KYC) تسهل التعامل مع العملاء المشتركين.	3.10	0.900	متوسط	14
ثانياً	**المحور الثاني: فاعلية إدارة مخاطر أنظمة الدفع الإلكتروني**				
10	ساهم التكامل مع الشبكة الوطنية في تقليل فترات توقف الخدمة (Downtime) والأعطال المفاجئة.	3.40	0.871	متوسط	9
11	وجود مراكز بيانات مشتركة أو بديلة (DR Sites) يعزز من قدرة المصرف على استمرارية العمل.	3.35	0.662	متوسط	10
12	الشراكة مع مزودين متخصصين (مثل شركة معاملات) توفر أنظمة حماية متطورة.	3.30	0.648	متوسط	11
13	أدى التكامل المصرفي إلى خفض التكاليف المترتبة على الاستثمار في برمجيات وأجهزة الحماية.	3.25	0.776	متوسط	12
14	الشراكة تمكن المصرف من الاستفادة من خبرات وكفاءات أمنية نادرة بتكلفة أقل.	3.10	0.632	متوسط	15
15	تساعد الأنظمة الموحدة في الكشف المبكر عن أنماط الاحتيال التي تستهدف عدة مصارف.	3.05	0.875	متوسط	13
	المتوسط العام الكلي للأداة	**3.74**	--	**مرتفع**	

يُلاحظ وجود فجوة واضحة؛ حيث سجلت فقرات "الربط التقني متوسطات مرتفعة جداً (4.55) ، بينما سجلت فقرات "الفاعلية الأمنية وكشف الاحتيال "متوسطات متدنية نسبياً تكاد تلامس الحياد .(3.05) هذا يشير إلى نجاح المصارف في "الربط" وتأخرها في "الحماية المشتركة، وعند تفكيك أبعاد هذا التباين، نجد أن التفوق الملموس في الجانب التقني المتمثل في الارتباط بالشبكة الوطنية (4.55) والتشغيل البيني لبطاقات المصارف (4.50) يعود أساساً إلى الالزام القانوني والضغط التنظيمي الصادر عن السلطات النقدية والحكومية لمواجهة أزمة السيولة

النقدية المستفحلة في البيئة الليبية .إلا أن هذا الاندفاع نحو 'الربط السريع' لم توازه مرونة موازية في إدارة المخاطر المصاحبة؛ وهو ما يفسره بوضوح انخفاض المتوسط الحسابي لفقرة كشف أنماط الاحتيال المشتركة إلى (3.05) ، وقفوف فقرة تبادل الموارد والخبرات الأمنية عند (3.10) .

تشير هذه النتائج الحرجة إلى أن إدارات المخاطر والامتثال في مصرفي (الجمهورية والصحاري) لا تزال تعمل بعقلية الصوامع المنعزلة (Risk Silos) ، حيث يركز كل مصرف على تحصين بيئته الداخلية دون وجود آلية حقيقية لتبادل معلومات التهديدات السيبرانية (Threat Intelligence Sharing) في الوقت الفعلي .هذا الانكشاف الأمني الجماعي يعزز من صحة نظرية 'الاقتران الوثيق(Tight Coupling) ، فبينما تتيح البنية التحتية المشتركة لشركة معاملات انتقالاً لحظياً للمدفوعات، فإنها تتيح أيضاً انتقالاً سريعاً لعدوى المخاطر (Risk Contagion) والأعطال عبر الشبكة، وهو ما يفسر عدم قناعة أفراد العينة بقدرة التكامل الحالي على تقليل فترات توقف الخدمة (Downtime)والتي سجلت متوسطاً محايداً قدره (3.40) نتيجة انقطاعات الخدمة المتكررة التي شهدها القطاع.

5.4.10 اختبار الفرضيات(Hypothesis Testing)

أ. **اختبار الفرضية الأولى: نص الفرضية**" توجد علاقة طردية ذات دلالة إحصائية بين مستوى التكامل التقني وبين فاعلية إدارة المخاطر."

جدول رقم (6) معامل ارتباط بيرسون

المتغيرات	قيمة الارتباط (R)	مستوى الدلالة (Sig)	القرار
التكامل والشراكة * إدارة المخاطر	0.378	0.016	قبول الفرضية

وجود علاقة طردية دالة إحصائياً (Sig < 0.05) ، مما يعني أن التكامل يدفع المصارف لتحسين إجراءاتها الأمنية للامتثال للمتطلبات التقنية.

ب. **اختبار الفرضية الثانية: نص الفرضية**" يؤثر الاعتماد على التكامل والشراكة المصرفية تأثيراً معنوياً على فاعلية إدارة المخاطر."

جدول رقم (7) نتائج تحليل الانحدار البسيط

البيان	القيمة	التفسير
معامل الارتباط (R)	0.378	علاقة متوسطة
معامل التحديد (R Square)	0.143	المتغير المستقل يفسر 14.3% من التابع
قيمة (F)	6.337	النموذج صالح

مستوى الدلالة (Sig)	0.016	يوجد أثر معنوي
قيمة المعامل (Beta)	0.378	الأثر إيجابي

معادلة خط الانحدار :بناءً على النتائج:

$$\text{فاعلية إدارة المخاطر} = -391 + (1.017x\text{التكامل والشراكة})$$

بما أن مستوى الدلالة (0.016) أقل من (0.05)، فإننا نقبل الفرضية الثانية القائلة بوجود أثر ذو دلالة إحصائية. ورغم ثبوت الأثر الإحصائي المعنوي إيجابياً) قيمة (Beta = 0.378 ، إلا أن القراءة العميقة لمعامل التحديد (R^2 = 0.143)تكشف عن دلالة عملية بالغة الأهمية؛ حيث يتبين أن التغير في متغير "التكامل والشراكة المصرفية" يفسر فقط (14.3%) من التباين الحاصل في "فاعلية إدارة مخاطر أنظمة الدفع الإلكتروني.

هذه النسبة المتواضعة تعني أن النسبة المتبقية والبالغة (85.7%) تعود إلى عوامل ومتغيرات هيكلية أخرى خارجة عن نموذج الانحدار البسيط، ولكنها حاكمة في الواقع العملي المصرفي الليبي .ومن أبرز هذه العوامل: حدة مخاطر التركز الناتجة عن الاعتماد المطلق على موزع وطني وحيد كنقطة فشل موحدة (SPOF) ، والهشاشة المزمنة في البنية التحتية الداعمة (كالطاقة والاتصالات) ، فضلاً عن غياب المعايير المتقدمة لحماية واجهات برمجة التطبيقات (APIs)عبر نماذج الثقة الصفرية .(Zero Trust) بناءً على ذلك، فإن الشراكة والربط التقني وحدهما لا يكفيان لرفع كفاءة إدارة المخاطر ما لم يتم تدعيمهما ببيئة رقابية صارمة تقودها خطوط الدفاع الثلاثة المحدثة، وتواكبهما استثمارات جادة في مراكز بيانات رديفة وموزعة جغرافياً لتعزيز المرونة التشغيلية الشاملة.

ج. **اختبار الفرضية الثالثة (باستخدام التحليل الوصفي) نص الفرضية**" :إن تطبيق المصارف لاستراتيجيات إدارة مخاطر الطرف الثالث (TPRM) لا يزال دون المستوى المطلوب."

التحليل :للتحقق من هذه الفرضية، تم النظر في المتوسطات الحسابية للبعد الخاص بـ "الشراكة الأمنية ومكافحة الاحتيال" في الجدول رقم (4):

- بلغ متوسط فقرة "الكشف المبكر عن الاحتيال" (3.05) .
- بلغ متوسط فقرة "مشاركة الموارد الأمنية" (3.10) .
- هذه القيم تقع ضمن فئة "الموافق بدرجة متوسطة/محايدة" وهي أقرب للحد الأدنى للمقبولية.

انخفاض المتوسطات الحسابية لفقرات الجانب الأمني مقارنة بفقرات الجانب التقني (التي تجاوزت 4.50) يدعم صحة الفرضية القائلة بأن الإجراءات الأمنية لا تزال دون المستوى المأمول مقارنةً بحجم التطور التقني. وبذلك نقبل الفرضية الثالثة.

6.4.10 مناقشة النتائج العامة

خلصت الدراسة إلى مجموعة من النتائج الجوهرية التي يمكن تفسيرها كما يلي:

أ. أثبتت الدراسة نجاح المصارف الليبية في تحقيق "تكامل تقني" عالٍ مع الموزع الوطني (متوسط 4.55)، إلا أن هذا النجاح لم يواكبه نفس المستوى من "التكامل الأمني" (متوسط 3.05) .هذا يؤكد ما ورد في الإطار النظري حول مخاطر "الاقتران الوثيق" (Tight Coupling) ، حيث تسبق التكنولوجيا إجراءات الحماية.

ب. كشفت النتائج عن اعتماد شبه كلي على الموزع الوطني، وهو ما يدعم المخاوف النظرية من "نقاط الفشل الموحدة" (SPOF) ، حيث أن أي خلل في هذا الموزع يؤثر فوراً على كافة المصارف، وهو ما يفسر الانقطاعات المتكررة المذكورة في مشكلة الدراسة.

ج. أظهرت النتائج ضعفاً في تبادل المعلومات الأمنية بين المصارف، مما يعني أن استراتيجيات إدارة مخاطر الطرف الثالث (TPRM) لا تزال تقليدية وتعمل بمعزل عن الشركاء، مما يعرض القطاع لمخاطر العدوى.

11. النتائج والتوصيات

1.11 نتائج الدراسة

1. أظهرت الدراسة وجود تباين واضح بين نجاح المصارف في تحقيق مستويات عالية من التكامل التقني والربط الشبكي، وبين تواضع الإجراءات الأمنية المشتركة؛ حيث تبين أن التطور في البنية التحتية للاتصالات يسبق التطور في بروتوكولات الحماية التشاركية.
2. كشفت النتائج عن اعتماد المصارف بشكل شبه كلي على "الموزع الوطني" كبوابة رئيسية للمعاملات، مما يخلق مخاطر تركز عالية ونقطة فشل موحدة (Single Point of Failure) تجعل القطاع المصرفي بأكمله عرضة للتوقف في حال حدوث خلل في هذه النقطة المركزية.
3. أثبتت الدراسة أن انخراط المصارف في شراكات وتكامل مع الشبكة الوطنية يلعب دوراً إيجابياً في دفع هذه المصارف نحو تحسين أنظمة إدارة المخاطر الداخلية لديها، وذلك لغرض استيفاء متطلبات الربط والامتثال للمعايير التقنية المفروضة.
4. بينت النتائج قصوراً في آليات الإنذار المبكر وتبادل المعلومات حول التهديدات السيبرانية بين المصارف وبعضها البعض؛ حيث تعمل إدارات المخاطر في كل مصرف كجزر منعزلة، مما يسهل انتقال "العدوى" واختراق الشبكة عبر أضعف حلقاتها.

5. أوضحت الدراسة أن الأنظمة الحالية فعالة في تنفيذ المعاملات، لكنها تفتقر إلى القدرة الكافية على كشف أنماط الاحتيال المعقدة التي تستهدف عدة مصارف في وقت واحد، مما يشير إلى أن أدوات المراقبة لا تزال تقليدية ولا تواكب تعقيد الجرائم المالية الحديثة.
6. توصلت الدراسة إلى أن المصارف تركز جهودها الأمنية على بيئتها الداخلية، بينما تظل الرقابة على الشركاء الخارجيين ومزودي خدمات التقنية (الطرف الثالث) دون المستوى المطلوب، مما يترك ثغرات قد تُستغل في هجمات سلاسل التوريد.

2.11 التوصيات

1. ضرورة قيام المصرف المركزي وشركة معاملات بإنشاء مراكز بيانات رديفة وموزعة جغرافياً، واعتماد خطط طوارئ تضمن استمرارية الخدمة عبر قنوات بديلة في حال تعطل الموزع الوطني الرئيسي، لتقليل مخاطر التوقف الشامل.
2. يوصى بإنشاء مركز موحد لعمليات الأمن السيبراني يضم كافة المصارف الأعضاء، يهدف إلى مراقبة الشبكة الوطنية على مدار الساعة، وتبادل معلومات التهديدات وقوائم المحتالين بشكل فوري ولحظي بين جميع الأطراف.
3. يجب على المصارف فرض شروط تعاقدية صارمة مع شركات التقنية والشركاء الخارجيين، تتضمن الحق في إجراء تدقيق أمني دوري على أنظمتهم، والتأكد من امتثالهم لمعايير أمن المعلومات العالمية قبل منحهم حق الوصول للشبكة.
4. الاستثمار في أنظمة مراقبة متطورة تعتمد على الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة (Machine Learning) لتحليل سلوكيات الدفع عبر الشبكة الموحدة، وكشف الأنماط الشاذة التي قد لا تظهر للمصرف الواحد منفرداً.
5. التوصية بالانتقال من نماذج الحماية التقليدية إلى نموذج "الثقة الصفرية" في التعامل مع واجهات برمجة التطبيقات(APIs) ، بحيث يتم التحقق من هوية وأمن كل طلب اتصال يأتي من خارج المصرف، وعدم الوثوق بأي طرف لمجرد أنه شريك داخل الشبكة.
6. توجيه الموارد نحو تدريب الكوادر البشرية في إدارات المخاطر وتقنية المعلومات على التعامل مع "المخاطر المترابطة(Interconnected Risks) "، وفهم طبيعة الهجمات التي تستهدف البيئات المصرفية المفتوحة، لضمان وجود خط دفاع بشري واعي.

12. المراجع

[1] الطائي، أ.، والشمري، م. (2023). دور الامتثال المصرفي في الحد من مخاطر الدفع الألكتروني: بحث تطبيقي .مجلة دراسات محاسبية ومالية، 18(63)، 1–20.

[2] بوجمعة، ه .(2023) .أثر مخاطر وسائل الدفع على ممارسة التجارة الإلكترونية: دراسة ميدانية في بنك خليج الجزائر [رسالة ماجستير غير منشورة]. جامعة محمد خيضر بسكرة، الجزائر.

[3] شركة معاملات للخدمات المالية .(2024) .التقرير السنوي حول أداء الموزع الوطني وتكامل القطاع الخاص . ليبيا .

[4] حكومة الوحدة الوطنية .(2025) .القرار رقم (135) بشأن إلزام الأنشطة التجارية والخدمية بتوفير وسائل الدفع الإلكتروني .طرابلس، ليبيا .

[5] مصرف ليبيا المركزي .(2024) .تعليمات تنظيم العلاقة بين المصارف وشركات الدفع الإلكتروني .إدارة الرقابة على المصارف والنقد .

[6] مصرف ليبيا المركزي .(2025) .تقرير الاستقرار المالي وحوادث استمرارية الأعمال في أنظمة الدفع .طرابلس .

[7] الهيئة الوطنية لأمن المعلومات .(2024) .(NISSA) التقرير الوطني لتقييم الثغرات السيبرانية في القطاع العام والمالي .ليبيا .

المراجع الأجنبية:

[1] Bank for International Settlements (BIS). (2021). Central bank digital currencies: operating models and control frameworks. Basel, Switzerland.

[2] Chen, B., & Baird, M. (2025). Technology Providers and Financial Stability: Overview of Risks and Regulatory Frameworks (Chicago Fed Working Paper No. 2025-08). Federal Reserve Bank of Chicago.

[3] Bank of England. (2024). Operational resilience: Critical third parties to the UK financial sector (Supervisory Statement SS6/24).

[4] European Parliament. (2025). Resilience of the Banking Union's Non-Cash Payment Systems. Directorate-General for Internal Policies of the Union.

[5] World Bank. (2020). Retail Payments: A Vital Component of Modern Financial Infrastructure. Washington, DC.

[6] Bank for International Settlements (BIS). (2022). Linking fast payment systems across borders: governance and oversight. Committee on Payments and Market Infrastructures.

[7] Perrow, C. (1999). Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies. Princeton University Press.

[8] Basel Committee on Banking Supervision. (2024). Principles for operational resilience and third-party risk management.

[9] PCI Security Standards Council (PCI SSC). (2022). Payment Card Industry Data Security Standard (PCI DSS) v4.0.

Gharyan Journal of Technology (2026), 1(12), 61-79 مجلة غريان للتقنية
Issued by: Higher Institute of Sciences and Technology Gharyan تصدر عن المعهد العالي للعلوم والتقنية غريان
www.gjt.scitech-gh.edu.ly

نمذجة أداء بركة شمسية تحت ظروف طرابلس المناخية مع تصور فيزيائي مطوِر

نور الدين عبدالحفيظ عبود
المعهد العالي للتقنيات الهندسية، غريان ليبيا
norabood1980@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2026/02/18 تاريخ القبول: 2026/04/12 تاريخ النشر: 2026/07/31

Abstract:

Solar ponds offer an effective solution for long-term solar energy harvesting and thermal storage, particularly in arid and semi-arid regions. This paper presents a numerical simulation framework for a solar pond with a salinity gradient, subjected to controlled thermal energy extraction rates of 10, 20, and 30 W/m² from the lower convection zone. The study aims to evaluate the operational feasibility of sustainable heat removal while maintaining the thermal gradient, salinity stability, and overall hydrodynamic integrity of the pond.

In addition to this conventional thermal extraction, an advanced physical model is presented as a visualization, not incorporated into the current numerical simulation process. This model, intended to serve as a basis for future studies, integrates the solar pond with a dedicated flash evaporator chamber for low-pressure steam generation. The thermal energy extracted from the lower convection zone is transferred to the evaporator chamber, where saline or brackish water undergoes controlled flash evaporation to produce steam suitable for thermal applications or for generating electricity and desalinated water at low temperatures. The concentrated brine produced from the evaporation process is managed to minimize freshwater loss and control salt concentration gradients.

A key innovation of the proposed system is a semi-closed salt management cycle, where salt depleted from the non-thermal zone (NCZ) due to diffusion and operational disturbances is continuously replenished through salt recovery and recycling from the evaporator unit. This approach significantly reduces external salt demand while maintaining the critical salinity gradient necessary for long-term pond stability. The numerical model incorporates interrelated constraints for heat transfer, mass diffusion, and buoyancy-driven flow, providing a scalable platform for detailed calculations and future optimization studies.

Simulation results demonstrate the feasibility of maintaining heat extraction of up to 30 W/m² without destabilizing the NCZ, provided that adaptive salt recycling strategies and controlled salt withdrawal are implemented. The proposed configuration provides a consistent and scalable physical basis for modeling the integration of solar

ponds with evaporative steam production, offering a promising pathway toward sustainable, low-cost thermal energy systems with improved resource efficiency.

الملخص:

تُوفر البرك الشمسية حلاً فعالاً لجمع الطاقة الشمسية وتخزينها الحراري على المدى الطويل، لا سيما في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. تُقدم هذه الورقة البحثية إطار محاكاة عددية لبركة شمسية ذات تدرج ملحي، تخضع لمعدلات انتزاع طاقة حرارية مُتحكم بها تبلغ 10 و20 و30 واط/م² من منطقة الحمل الحراري السفلية. تهدف الدراسة إلى تقييم الجدوى التشغيلية لإزالة الحرارة بشكل مستدام مع الحفاظ على التدرج الحراري، واستقرار الملوحة، والسلامة الهيدروديناميكية العامة للبركة.

إضافةً إلى هذا الانتزاع الحراري التقليدي، تم تقديم نموذج بوصفه تصورا فيزيائيًا متقدمًا، دون إدخاله في عملية المحاكاة العددية الحالية في هذه الدراسة، يهدف هذا النموذج إلى أن يكون أساسًا للدراسات المستقبلية، حيث يدمج البركة الشمسية مع غرفة تبخير وميضي مُخصصة لتوليد بخار منخفض الضغط. بحيث تُنقل الطاقة الحرارية المُستخلصة من منطقة الحمل الحراري السفلية إلى غرفة التبخير، تخضع المياه المالحة أو قليلة الملوحة لعملية تبخر و وميض مُتحكم بها لإنتاج بخار مناسب للتطبيقات الحرارية أو لتوليد الطاقة الكهربائية ومياه محلاة في درجات حرارة منخفضة. يُدار المحلول الملحي المركز الناتج من عملية التبخير لضمان الحد الأدنى من فقدان المياه العذبة والتحكم في تدرجات تركيز الملح.

يُعدّ أحد الابتكارات الرئيسية للنظام المقترح دورة إدارة ملح شبه مغلقة، حيث يُعاد تعويض الملح المستنفد من المنطقة غير الحرارية (NCZ) نتيجة الانتشار والاضطرابات التشغيلية باستمرار من خلال استعادة الملح وإعادة تدويره من وحدة التبخير. يقلل هذا النهج بشكل كبير من الطلب الخارجي على الملح مع الحفاظ على تدرج الملوحة الحرج اللازم لاستقرار البركة على المدى الطويل. يتضمن النموذج العددي قيودًا مترابطة لانتقال الحرارة وانتشار الكتلة وتدفق مدفوع بقوة الطفو، مما يوفر منصة قابلة للتطوير لإجراء حسابات تفصيلية ودراسات تحسين مستقبلية.

تُظهر نتائج المحاكاة إمكانية الحفاظ على استخلاص حرارة يصل إلى 30 واط/م² دون زعزعة استقرار المنطقة غير الحرارية، شريطة تطبيق استراتيجيات إعادة تدوير الملح التكيفية وسحب الملح المُتحكم به. يُعطي التكوين المقترح أساسًا فيزيائيًا متسقًا وقابلًا للتوسيع لنمذجة دمج البرك الشمسية مع إنتاج البخار القائم على التبخر، مما يوفر مسارًا واعدًا نحو أنظمة الطاقة الحرارية المستدامة منخفضة التكلفة مع كفاءة محسنة في استخدام الموارد.

الكلمات المفتاحية : البركة الشمسية، الإشعاع الشمسي، منطقة الحمل السفلي، المحلول الملحي، النموذج الفيزيائي.

ymbols	Nomenclatures	Units
A_b	مساحة السطح السفلي للبركة	m^2
A_l	مساحة سطح منطقة الحمل المنخفضة	m^2
A_u	مساحة سطح منطقة الحمل العليا (UCZ)	m^2
C_s	السعة الحرارية للرطوبة	kJ/kg °C
C_{pl}	السعة الحرارية للماء في منطقة الحمل السفلي (LCZ)	J/kg °C
C_{pu}	السعة الحرارية للماء في منطقة الحمل العليا (UCZ)	J/kg °C
h_c	معامل انتقال الحرارة بالحمل إلى الهوائي	W/m^2 °C
IG_{t,H_x}	نسبة الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى عمقx	W/m^2
I_b	لإشعاع الشمسي المباشر[5].	W/m^2
I_d	معدل انتشار الطاقة في السماء (سماء متساوية الإشعاع(	W/m^2
I_{tH}	معدل وصول الإشعاع الكلي (المباشر والمنتشر) إلى السطح الأفقي أو الأرض أمام الجدار	W/m^2
I_r	معدل انعكاس الطاقة من الأرض والمحيط (انعكاس منتشر)	W/m^2

IG_{tH}	إجمالي الإشعاع الشمسي على سطح الماء المائل وحوض جهاز التقطير الشمسي	W/m^2
P_a	الضغط الجزئي لبخار الماء عند درجة حرارة المحيط	mmHg
P_{atm}	الضغط الجوي	mmHg
P_u	ضغط بخار الماء عند درجة حرارة الطبقة العليا	mmHg
Q_{ground}	فقدان الحرارة إلى الأرض	W
Q_{load}	الحرارة المستخرجة من منطقة الحمل السفلى LCZ	W
Q_{rs}	لإشعاع الشمسي الذي يدخل ويُخزن في منطقة الحمل السفلى LCZ	W/m^2
Q_{ru}	الإشعاع الشمسي الممتص في منطقة عديمة الحمل (NCZ)	W/m^2
Q_{ub}	انتقال الحرارة بالتوصيل إلى منطقة الحمل العليا (UCZ)	W/m^2
Q_{ue}	فقدان الحرارة بالتبخر من السطح	$W/m2$
Q_{uc}	فقدان الحرارة بالحمل الحراري من السطح	W/m^2
Q_w	فقدان الحرارة عبر جدران البركة	$W/m2$
T_a	درجة الحرارة المحيطة	°C
T_g	درجة حرارة منسوب المياه الجوفية أسفل البركة	°C
T_{sky}	درجة حرارة السماء	°C
T_s	درجة حرارة منطقة الحمل السفلي (LCZ)	°C
T_u	درجة حرارة منطقة الحمل العليا (UCZ)	°C
U_t	معامل انتقال الحرارة الكلي إلى الأرض	W/m2
X_{NCZ}	سُمك منطقة عديمة الحمل (NCZ)	m
X_L	سُمك منطقة الحمل السفلي (LCZ)	m
X_u	سُمك منطقة الحمل العليا (UCZ)	m
X_g	مسافة منسوب المياه الجوفية من قاع البركة	m
x	سُمك طبقة الماء	m
Vb	عدد أيام الشهر	--
Vc	رقم اليوم في الشهر	--
N	رقم اليوم في السنة	--

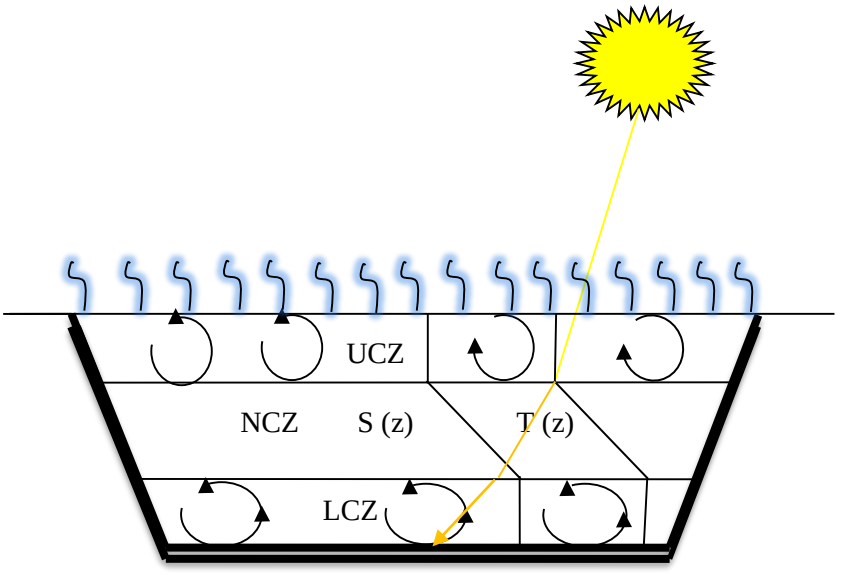
Greek Letter Symbols:

Symbols	Nomenclatures	Units
ρ_l	كثافة منطقة الحمل السفلي (LCZ)	kg/m^3
ρ_u	كثافة منطقة التبخر العالية (UCZ)	kg/m^3
ρ_g	معامل انعكاس الأرض أو السطح الأفقي[	--
αs	ارتفاع الشمس	--
v	متوسط سرعة الرياح الشهرية في منطقة الدراسة	m/s
λ	حرارة التبخر الكامنة	kJ/kg
γh	الرطوبة النسبية	--
σ	ثابت ستيفن- بولتزمان (5.673×10^{-8})	W/m^2K^4

1- خلفية الموضوع:

تعتبر البركة الشمسية من الوسائل البسيطة ذات التكلفة المنخفضة لتجميع وتخزين الطاقة الشمسية على شكل ماء مالح عالي الحرارة، حيث تحتوي على ثلاث طبقات رئيسية كما هي موضحة في الشكل (1). الأولى، منطقة الحمل العليا (UCZ)، وهي منطقة باردة قريبة من درجة حرارة الجو ولها تركيز ملحي منخفض، الثانية منطقة الحمل السفلى (LCZ)، وهي منطقة ساخنة درجة حرارتها من (70- 100) م^0، وتقترب درجة ملوحتها من التشبع. وتصنف هاتين الطبقتين غالبا بأنهما متجانستين في درجة الحرارة والتركيز نتيجة للحمل الواقع في كل طبقة. أما الطبقة الثالثة فهي الطبقة الفاصلة بين هاتين الطبقتين، وهي منطقة عديمة الحمل(NCZ)، ومتدرجة الملوحة، حيث أن الملوحة تزداد فيها مع زيادة العمق. ونظراً لتدرج الملوحة في هذه المنطقة فان الماء في أي عمق فيها لا يتمكن من الارتفاع لان طبقة الماء أعلى هذا العمق له محتوى أقل من الملح ولذلك يكون أقل كثافة وأخف. كذلك لا يتمكن الماء عند عمق معين في الطبقة الثالثة من النزول لان كثافة الماء تحته أكبر ويكون أثقل. وتكون النتيجة عدم حدوث تيارات الحمل في هذه المنطقة، مما يترتب على ذلك انخفاض موصلية الحمل الحراري لها، ومن هنا جاءت التسمية (NCZ). والحرارة المنتقلة من المنطقة الساخنة (LCZ) إلى المنطقة الباردة العليا (UCZ) يمكن أن تحدث فقط من خلال التوصيل الحراري. وتعمل الطبقة الثالثة (NCZ كعازل شفاف يسمح لأشعة الشمس بالمرور بحيث تنحصر طاقة الإشعاع في الطبقة السفلى الساخنة (LCZ) التي يتم منها سحب الحرارة المفيدة [1].

وتجدر الإشارة إلى أن جزءاً من الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح البركة الشمسية يكون متاحا في منطقة الحمل السفلى (LCZ)، إذ أن جزءا من هذا الإشعاع الشمسي الساقط ينعكس عند السطح، وجزء يمتص بواسطة منطقة الحمل العليا (UCZ) ومنطقة عديمة الحمل (NCZ) قبل أن يصل إلى منطقة الحمل السفلى (LCZ). بالإضافة أن منطقة عديمة الحمل (NCZ) تعمل كمفتاح رئيسي لتشغيل البركة الشمسية المتدرجة الملوحة حيث تسمح لهذا الإشعاع الساقط (ذو الموجة القصيرة) بالاختراق خلال منطقة التخزين (LCZ)، بحيث تمنع انتشار هذا الإشعاع أو رجوعه إلى الأعلى نتيجة لتكَوّن الأشعة الموجة الطويلة (الأشعة تحت الحمراء) عند اصطدام هذا الإشعاع بالقاع، وذلك لان منطقة عديمة الحمل (NCZ) تعتبر معتمة لهذه الأشعة المتكونة، بمعنى أن الطول الموجي الداخل ليس هو الطول الموجي المنعكس في القاع، علاوة على ذلك فإن الطاقة الشمسية التي تصل إلى منطقة الحمل السفلى (LCZ) ليست متاحة بالكامل بسبب الطاقة المتسربة إلى الأرض و إلى المنطقة عديمة الحمل (NCZ) بواسطة التوصيل.



شكل (1) مخطط لبركة شمسية متدرجة الملوحة

الأبحاث السابقة:

إن عدد البرك الشمسية الطبيعية والاصطناعية حول العالم ذكرت في التاريخ من قبل تابر في 1981 [2]. بينما نعطي نبذة مختصرة على بعض البرك الشمسية الاصطناعية بعد سنة 1981.

تعتبر بركة إلباسو الشمسية تشتغل عملياً منذ 1985. هذه البركة كانت الأولى في العالم التي سلّمت حرارة عملية صناعية إلى مصنع تجاري في 1985 ، وفي عام 1986 كانت الأولى في إنتاج الطاقة الكهربائية في الولايات المتحدة، أما في 1987 كانت هي البركة التجريبية الأولى المرفقة بوحدة تحلية (MSF)، أيضا في بدية السنوات الأولى بركة إلباسو تحمّلت درجة حرارة قياسية قريبة من الغليان التي تحطمت فيها منطقة الميل (NCZ). بعد ذلك تم تأسيس منطقة ميل جديدة وطرق المحافظة عليها، منذ ذلك الحين تم تطوير البركة لمنع مثل هذه المشاكل. هذه البركة تتمتع باستقرارية و وضوح مما أداء إلى وضع استراتيجيات طُوّرت وساعدت على تميز أفضل استقرار حراري يمكن أن تصل أليه البركة الشمسية بحيث تعطى أداء عالي. حيث تتراوح درجة الحرارة البركة من 70م^{o} في فصل الشتاء إلى 90م^{o} في فصل الخريف، وأعلى درجة حرارة سجلت في بركة إلباسو الشمسية أثناء هذه السنوات 93م^{o}، وأقصى فروق في درجات الحرارة بين منطقتي العليا (UCZ) والسفلى كانت أعلى من 70م^{o}، بينما كان أقصى تدفق مسحوب في هذا التصميم من منطقة الحمل السفلى (LCZ) 2.3م^{3}/دقيقة (600 g.p.m) عند سرعة خروج أقل من 7 سم/ثانية [3].

في ليبيا في منطقة تاجوراء، توجد بركة شمسية تجريبية مساحة سطحها 830 م^{2} على عمق 2.5 م، هذه البركة مزوّدة ببركة تبخيرية مساحتها 105 م^{2} على عمق 1.5 م، كذلك مرفقة بوحدة تحلية (MSF) مصدرها الحراري منتزع من منطقة الحمل السفلى (LCZ) حيت كان معدل الإنتاج اليومي للمحطة من المياه المحلاة 3 م^{3} [4].

سافيا في 1998 [5] قدم تقرير تحليلي ودراسة معملية على أداء وحدة تحلية وميضية مربوطة ببركة شمسية متدرجة الملوحة. نموذج وحدة التحلية مزوّد ببركة شمسية مساحتها 1500 م^{2} في هذه الدراسة قدم بعض النتائج حصل عليها من المختبر تحت شروط تشغيل مختلفة، من درجة حرارة الماء المالح ومعدل التدفق والضغط داخل حجرة التبخير الوميضى. وطرق الرذاذ، حيث قام بتجميع وعرض هذه النتائج على أنه يمكن الحصول على 150 لتر/ ساعة من الماء المقطر من وحدة التحلية الوميضية لكل متر مربع من مساحة سطح البركة عند درجة حرارة 70 م^{o}.

بوسناسكى [6] قدم محاكاة بالحاسوب ونتائج تجريبية على بركة شمسية صغيرة الحجم هذه المحاكاة تربط بين بيانات أداء وحدة تحلية (MSF) وبيانات أداء البركة الشمسية أعطى فيها تقييم اقتصادي مقدم تحت ظروف مناخ الشرق الأوسط. استنتج من هذه المحاكاة أن البرك الصغيرة الحجم تنافس تجهيزات البرك الشمسية المتوسطة الحجم في المواقع البعيدة، أما البرك الكبيرة الحجم فتطلب مجمع طاقة شمسية بحوالي 800,000 م^{2} ووحدة تحلية تنتج 10,000م^{3}/يوم، حيت إن هذا المجمع ليس بالضروري أن يكون في الإمكان القاحلة أو الصحراوية.

ريفيرا ورميرو [7] أجريا دراسات تجريبية على تقييم محول حراري امتصاصي مشغل مع بركة شمسية متدرجة الملوحة. حيث تم استخدم محول حراري أحادي المرحلة لإنتاج البخار، هذا المحول يعمل مع خليط بروميد الليثيوم كوسيط لرفع درجة الحرارة المتحصل عليها من منطقة الحمل السفلى (LCZ) في البركة الشمسية، كما أن درجة حرارة المسخن الكهربائي داخل المحول ليست أعلى من 80 م^{o}، بحيث تستخدم لمحاكاة الحرارة الداخلة إلى المحول الحراري والخارجة من منطقة الحمل السفلى (LCZ) في البركة الشمسية. أقصى فرق في درجة الحرارة المتحصل عليها من المحول الحراري 44م^{o}، وأقصى درجة حرارة مفيدة متحصل عليها من عملية إنتاج البخار باستعمال المحول حراري هي 124 م^{o}. بالإضافة أن ارتفاع فرق في درجات الحرارة في المحول أحادي المرحلة تزيد بزيادة تركيز الملح في قاع البركة، ودرجة حرارة الامتصاص، ودرجة حرارة المبخر، أيضا معامل الأداء يتناقص بزيادة الفرق في درجات الحرارة، ودرجة حرارة الامتصاص، ويزداد بزيادة درجة حرارة المبخر والمولد، حيث يتراوح معامل الأداء ما بين 0.1 إلى 0.16 هذه القيمة كانت أقل من المتوقعة في هذه الدراسة نتيجة القدرة الصغيرة والحرارة المفقودة. أيضا في دراسة أخرى لريفيرا ورميرو تم استخدام محول حراري أحادي

المرحلة ومحول حراري متقدم لإنتاج البخار يعمل مع بروميد الليثيوم حيث كان معامل الأداء للمرحلة الواحدة 0.48 عند فرق في درجة حرارة 50 م°، وكان معامل الأداء للمحول الحراري المتقدم ذو مرحلتين 0.33 عند فرق في درجة حرارة 100 م°.

خالد و قريشن [8] استخداما حرارة البركة الشمسية لإنتاج البخار عند درجة حرارة 120 م° لمحول حراري أحادي المرحلة، و 150 م° لمحول حراري ذو مرحلتين عند معامل أداء 0.5–3.0 على التوالي.

تابر [9] اقترح توليد طاقة كهربائية باستخدام دورة رانكن الحرارية. حيث استخدم حرارة ماء البركة كمصدر للطاقة، وذلك بسحب الحرارة في قاع البركة عند درجة حرارة 85 م° ودفعها إلى المبخر ثم يعاد إرجاعها إلى البركة، أيضا ويتم إضافة الملح في قاع البركة لتعويض الفاقد من الأملاح الصاعدة إلى سطح البركة، بالإضافة أنه يتم سحب الماء من سطح البركة عند درجة حرارة 30 م° ودفعه إلى المكثف.

عادل شريف، حازم الحسيني و إبراهيم العنزي [10] 2011 م قدموا نموذجا جديدا للتنبؤ بأداء بركة شمسية في أي منطقة مشمسة من العالم. وقد تم التحقق من صحة النتائج المُتوقعة بمقارنتها ببيانات ناسا المُعدّلة على مدى 22 عامًا في ثلاثة مواقع مختلفة في الشرق الأوسط، حيث تم الحصول على توافق كبير جدًا. وأظهر نموذج الحالة المستقرة أحادي البُعد والمعتمد على الزمن توافقًا ممتازًا مع بيانات قياسات البركة الشمسية في الكويت. كما تم دراسة النموذج العابر، إلا أنه تبيّن أن نموذج الحالة المستقرة يُقدّم نتائج أكثر واقعية. وقد دُرست كفاءة البرك الشمسية في المناطق ذات المناخ البارد، مثل المملكة المتحدة، حيث يمكن أن تصل درجة حرارة الحوض إلى 80 درجة مئوية باستخدام بعض التصاميم.

أسد ساير وحازم الحسيني [11] 2016 م تم تطوير نموذجا نظريا جديدا لانتقال الحرارة لبركة شمسية ذات التدرج الملحي لحل المعادلات التفاضلية غير الخطية من الدرجة الأولى لحفظ الطاقة. يعتمد هذا النموذج على دالة ode45 في برنامج MATLAB، والتي تستخدم طريقة رونج- كوتا العددية المعدلة من الدرجة الرابعة مع خطوات زمنية متغيرة في الحل. وقد تم اعتماد عدة افتراضات، أولها أن البركة تتكون من ثلاث مناطق؛ (أ) منطقة الحمل الحراري العلوية التي تحتوي على مياه عذبة تقريبًا، (ب) المنطقة عديمة الحمل التي تشهد تدرجًا في تركيز الملح من الأعلى إلى الأسفل، وأخيرًا، (ج) منطقة الحمل الحراري السفلية، حيث يكون تركيز الملح مرتفعًا جدًا (حوالي 0.26 كجم/لتر). ثانيًا، يُفترض أن كلتا المنطقتين (العلوية والسفلية) مختلطتان جيدًا. ثالثًا، يتم امتصاص الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى المنطقة عديمة الحمل بالكامل في هذه الطبقة، وقد تم إهمال تراكم الحرارة في المنطقة عديمة الحمل عند حساب درجات الحرارة في المنطقتين العلوية والسفلية. لوحظ أن درجة حرارة بركة نموذجية في الكويت تصل إلى حوالي 90 درجة مئوية في شهر يوليو، وتنخفض إلى حوالي 50 درجة مئوية في نهاية العام. من الواضح أن البركة الشمسية يمكنها توفير الحرارة مؤقتًا على مدار العام، حتى في فصل الشتاء مع الطقس الغائم والبارد، ولكنها تحتاج إلى وقت للتسخين في البرك غير المدفونة، تكون درجة الحرارة في المنطقة الباردة أعلى منها في البرك المدفونة العادية.

صفوان محمد جميل أحمد كنان [12] 2017 م استخدما نموذجًا رياضيًا أحادي البعد يعتمد على الزمن لانتقال الحرارة والكتلة في بركة شمسية باستخدام برنامج MATLAB لحل المعادلات الحاكمة للبركة الشمسية والأرض أسفلها ، وحُسبت توزيعات درجات الحرارة والتركيز. كما تم بحث التنبؤ بأداء البركة الشمسية في المناخ الحار، وأُجريت مقارنة مع توزيع درجات الحرارة التجريبي في البركة ، وربطه بمحاكاة حرارية ديناميكية لمبنى مزود بنظام تكييف هواء تبريد امتصاصي باستخدام برنامج TRNSYS. استخدام المحاكاة المترابطة لدراسة أداء النظام في مناخ بغداد- العراق.

أسامة عبد الحق الموسوي، أنيس عبد الله خدوم، حامد بن رجولة، ومصطفى سعيد مهدي [13] 2018 م استُخدموا نظام هجين يجمع بين بركة شمسية صغيرة وجهاز تقطير أحادي الميل لزيادة إنتاج الماء المقطر من مياه التناضح العكسي، وللاستفادة من الطاقة الحرارية المتولدة من هذه البركة الشمسية الصغيرة. تركز هذه الدراسة على التقطير الشمسي المقترن بتقنية البركة الشمسية كطريقة للطاقة المتجددة في العراق، وكدراسة حالة لتحلية المياه دون آثار بيئية سلبية. دُرست الكفاءة اليومية وكمية المياه المستعادة على مدار 12 ساعة عمل يوميًا، وبلغ معدل تدفق الكتلة 12 كجم/م² يوميًا لمياه التناضح العكسي المستخدمة كمدخل للنظام. أُجريت التجربة والحسابات النظرية على مدار 50 يومًا في مايو ويونيو ويوليو 2015. جُمعت البيانات المناخية الأساسية للتجربة طوال فترة الدراسة.

أسامة عبد الحق الموسوي، أنيس عبد الله خدوم، حامد بن رجولة، ومصطفى سعيد مهدي[14] 2020 م أعطوا مراجعة موجزة ومركزة للأبحاث التي تناولت استخدام بركة الطاقة الشمسية، لتوضيح الخلفية التاريخية لهذه البرك، بالإضافة إلى أبرز أنواعها المنتشرة عالميًا. بالإضافة إلى الخلفية النظرية لانتقال الحرارة والكتلة التي تحكم تشغيل بركة الطاقة الشمسية، تم فيها العرض والمناقشة، و قالوا يمكن استخدام معادلات انتقال الحرارة التفاضلية الشائعة لحساب توزيع درجات الحرارة داخل الطبقات الثلاث لبركة الطاقة الشمسية.

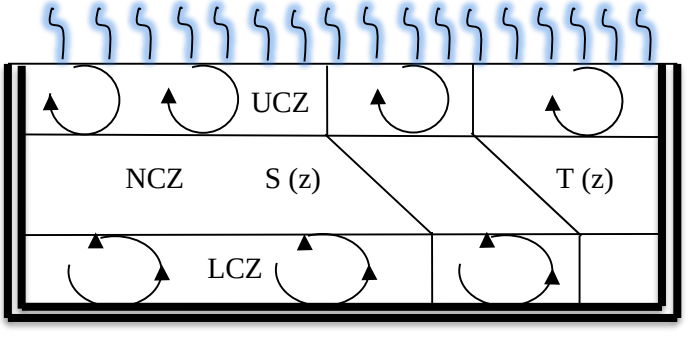
عبد الصمد نايت ابراهيم، ياسمين رغيف، وفاطمة البحراوي [15] 2022 م طوروا نموذجا عدديا أحادي البعد باستخدام لغة برمجة بايثون، بالاعتماد على موازنة الطاقة لكل منطقة من مناطق البركة الشمسية ذي التدرج الملحي. وقد تم أخذ امتصاص الإشعاع الشمسي وفقدان الحرارة عبر السطح الحر للبركة في الحسبان. تم التحقق من صحة النموذج العددي بمقارنته بنتائج عددية وتجريبية منشورة. أُظهرت النتائج أن درجة حرارة منطقة التخزين في مدينة في طنجة و125.5 درجة مئوية ، و121.5 درجة مئوية في مراكش، و119 درجة مئوية في إفران في شهر يوليو. وكانت مدينة ورزازات هي الأعلى، وكذلك كمية الطاقة المخزنة. وقد سُجلت أعلى القيم في شهر يوليو، حيث بلغت حوالي 128 درجة مئوية لدرجة الحرارة و146 ميجا جول للطاقة المخزنة بقاع و جدران رأسية غير منفذة ومعزولة حراريًا. ويمكن تبرير ذلك بارتفاع شدة الإشعاع الشمسي التي تميز هذه المدينة.

باسم ساجت عطية [16] 2023 م قام بفحص أداء المولد الكهروحراري المقترن بالبركة الشمسية أظهرت النتائج النظرية أن إضافة الملح يحسن تخزين الحرارة في الطبقة السفلية للبركة وأن كمية الإشعاع الشمسي التي تنعكس بواسطة المرايا العاكسة تزيد من كمية الطاقة الحرارية التي يتم امتصاصها من خلال طبقات البركة. أيضا يقلل الغطاء البلاستيكي او الزجاجي الذي تم وضعه على سطح البركة من فقد الطاقة الحرارية. ارتفعت كمية الطاقة القابلة للاستخدام من 2 كيلووات 22 كيلووات بعد إضافة الملح والغطاء والمرايا والحصى إلى البركة التقليدية. ساعدت هذه التغييرات في رفع درجة حرارة البركة مما زاد الكفاءة من 5 في المائة إلى 32 في المائة. مع معدل تدفق يبلغ 2 لتر في الدقيقة ودرجة حرارة 60 درجة مئوية ، بلغت الطاقة والكفاءة الكهربائية 121.5 واط، و 12 % على التوالي.

ووفقًا للنتائج التجريبية ، فإن إضافة غطاء بلاستيكي او زجاجي ومرايا عاكسة وحصى أدى إلى زيادة الكفاءة التشغيلية للبركة من 3٪ الى 28٪ . زادت كمية الطاقة المفيدة من 2 كيلوواط إلى 20.94 كيلوواط. حققت كل من القدرة الكهربائية والكفاءة التشغيلية 104 واط و 9٪ ،عند درجة حرارة الطبقة السفلى البالغة 60 درجة مئوية.

2- النمذجة الرياضية :

2-1- النموذج الفيزيائي للبركة الشمسية: نموذج البركة الشمسية المتدرجة الملوحة (SGSP) الحالي كما في الشكل (2).



شكل (2) مخطط لبركة شمسية متدرجة الملوحة

نموذج البركة يتكون من ثلاثة طبقات، منطقة الحمل العليا (UCZ) ، ذات سمك L=0.2 m و منطقة الحمل السفلى (LCZ) ، ذات سمك L=1.3 m و المنطقة الوسطى عديمة الحمل (NCZ) ، ذات سمك L=1.0 m ، و L=1.2 m ، مع مساحة $3000\ m^2$ معزولة تماما من الجوانب و الجدران العمودية ، أي الفقد الحراري يكون من جهة المنطقة الوسطى عديمة الحمل لأعلى ، و قاع البركة الذي يندرج تحته مياه جوفية عند مسافة معينة، عند الظروف المناخية المتاحة المقدرة بمدينة طرابلس.

2-2- الصياغة الرياضية:

- **الإشعاع الشمسي المؤسس على نموذج آشري: (ASHRAE Clear Sky Model)**

الإشعاع الشمسي الكلي الأفقي الساقط على سطح البركة [17]

$$IG_{t,H} = IB + Id + Ir \quad (2)$$

$$Id = C\ Ib\ \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \quad (3)$$

$$Ir = I_{tH}\ \rho_g\ \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (4)$$

$$IB = \left[\ max(\cos\theta_H, 0) + C\ \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)\right]\ Ib \quad (5)$$

حيث C معامل الإشعاع المنتشر و يمكن حسابه بالمعادلة (6) [17].

$$\mathrm{C} = 0.0965\left[1 - 0.42\cos\left(\frac{360\mathrm{N}}{370}\right)\right] - 0.0075[1 - \cos(1.95\mathrm{N})] \quad (6)$$

الإشعاع الشمسي في أي عمق من الماء. وهذا يعني (7) [11] [14] [19].

$$IG_{t,H_x} = IG_{t,H}\ (0.36 - 0.08\ ln\frac{X}{\cos\theta_r}) \quad (7)$$

θ_r زاوية الانكسار على سطح البركة، والتي يمكن حسابها من قانون سنيل [11] [14] [19]

$$\frac{sin\theta_i}{sin\theta_r} = 1.333 \quad (8)$$

حيث θ_i هي زاوية سقوط الإشعاع المباشر على مستوى أفقي (زاوية السمت)

$$.cos\theta_i = cos\delta\ cos\phi\ cos\omega + sin\delta\ sin\phi \quad (9)$$

حيث δ هي زاوية الانحراف، وϕ هي زاوية خط العرض، وω هي زاوية الساعة. تُعرَّف زاوية الانحراف δ بالدرجات وفقًا لـ

$$\delta = +32.45\ sin\left(\frac{N-81}{370} \times 360\right) \quad (10)$$

زاوية الساعة ω هي مقياس زاوي للوقت يُحتسب من وقت الظهيرة بناءً على التوقيت المحلي LST ، وهو التوقيت الشمسي المحلي، ويتم تعريفها على النحو التالي

$$\omega = 15^O(LST - 12) \quad (11)$$

- **درجة الحرارة المحيطة:**

يمكن التعبير عن الدالة T_a التي تحسب التغير في درجة حرارة الهواء المحيط في ظل الظروف السائدة كل 24 ساعة [10].

$$T_{max} = 24.996 + 7.751 * cos(\mathrm{z} + 2.901) + 0.9 * cos(\mathrm{z} - 2.476) + 0.088 * cos(z + 1.429) + 0.324 * cos(z - 2.495) \quad (12)$$

$$T_{min} = 15.858 + 7.449 * cos(\mathrm{z} + 2.842) + 0.875 * cos(\mathrm{z} - 2.111) + 0.025 * cos(\mathrm{z} - 1.572) + 0.046 * cos(\mathrm{z} - 2.984) \quad (13)$$

$$T_{aa} = Month - 1. + ({}^{Vc}/_{Vb}) \quad (14)$$

$$\pi = 4. * tan^{-1}(1.0) \quad (15)$$

$$Z = Omega * T_{aa} \quad (16)$$

$$Omega = \pi/6. \quad (17)$$

$$Tav = (Tmax + Tmin)/2. \quad (18)$$

$$Ab_1 = Xh(\mathrm{i}) - 6. \quad (19)$$

$$Ph = \pi * Ab_1/12. \quad (20)$$

$$T_a = Tav + (Tmax - Tav) * Sin(Ph) \quad (21)$$

- **المنطقة الحمل العليا: (UCZ)**

معادلة حفظ الحرارة معطاة على النحو التالي [10] [11]:

$$Qru + Qub = M_g C_{p,g} \frac{dT_g}{dt} + Qur + Que + Quc - Qw \quad (22)$$

وبالتالي، فإن امتصاص الإشعاع الشمسي في المسطح المائي في هذا العمل ، يكون هكذا [11] [14]

$$Q_{ru} = IG_{t,H}(1 - 0.36 + 0.08\, ln \frac{X_u}{cos\, \theta_r}) \quad (23)$$

في هذا العمل $Qw = 0$ (أي يُفترض أن الجدران معزولة جيدًا)، يتم انتقال الحرارة إلى منطقة الحمل العليا *(UCZ)*عن طريق التوصيل من منطقة الحمل السفلى *(LCZ)* باستخدام المعادلات التالية:

$$Q_{ub} = U_t\, A_u[T_s - T_u] \quad (24)$$

هنا، T_uو T_s هما درجتا حرارة منطقتي UCZ و LCZ على التوالي، و Ut هو معامل انتقال الحرارة الكلي والذي يمكن حسابه على النحو التالي:

$$U_t = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{X_{NCZ}}{k_w} + \frac{1}{h_1}} \quad (25)$$

في المعادلة أعلاه، يُمثل $h1$ و $h2$ معامل انتقال الحرارة بالحمل بين منطقتي NCZ ، UCZ ، وبين منطقتي LCZ ، NCZ على التوالي. وتبلغ قيمهما 56.58 و48.279 واط/م² كلفن على التوالي. أما الموصلية الحرارية

للماء (k_w) فهي 0.596 واط/م كلفن. وقد حُسبت قيم معاملات انتقال الحرارة نظريًا بواسطة بانسال وكوشيك (1981).[20]

يُعطى فقدان الحرارة بالحمل الحراري Q_{uc} على النحو التالي:

$$Q_{uc} = hc_c\, A_u[T_u - T_a] \quad (26)$$

هنا h_c هو معامل انتقال الحرارة بالحمل من سطح الماء إلى الهواء بوحدة واط/م2 كلفن، ويتم حسابه باستخدام صيغة قدمها ماك آدامز (1954) [21] على النحو التالي:

$$h_c = 5.7 + 3.8\, v \quad (27)$$

يمكن حساب فقدان الحرارة بالإشعاع كما يلي:

$$Q_{ur} = \varepsilon\ A_u\, \sigma \left[(T_u + 273)^4 - \left(T_{sky} + 273\right)^4\right] \quad (28)$$

حيث σ هو ثابت ستيفن- بولتزمان، و ϵ هي انبعاثية الماء = 0.83 (صفوان وآخرون، 2014)، و T_{sky}هي درجة حرارة السماء. ويتم حسابها على النحو التالي:

$$Q_{ue} = A_u \left[\frac{[\lambda hc(pu-pa)]}{[(1.6Cspatm)]}\right] \quad (29)$$

وأخيرًا، فقدان الحرارة من السطح بواسطة التبخر (Q_{ue}) بواسطة كيشور وجوشي (1984) [22] على النحو التالي:

$$T_{sky} = 0.0552\, {T_a}^{1.5} \quad (30)$$

حيث C_s هي السعة الحرارية الرطبة للهواء بوحدة $KJ/kg.k$، وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$Cs = 1.005 + 1.82\, \gamma_h$$

يرمز لـ P_u , و P_a إلى ضغوط بخار الماء المشبع عند درجات حرارة المنطقة الحمل العليا UCZ و درجة الحرارة المحيطة بوحدة نيوتن/م^2 على التوالي، والتي تُعطى على النحو التالي:

$$p_u = exp\left[18.403 - \left(\frac{3885}{T_u+230}\right)\right] \quad (31)$$

$$p_a = \gamma_h\, exp\left[18.403 - \left(\frac{3885}{T_a+230}\right)\right] \quad (32)$$

- **المنطقة الحمل السفلى (LCZ)** [11] [14]

$$Q_{rs} = \rho_l C_{pl} A_l X_l \frac{dT_s}{dt} + Q_{ub} - Q_{ground} \quad (33)$$

$$Q_{rs} = IG_{t,H}\,(0.36 + 0.08\, ln\, \frac{X_u + X_{NCZ}}{\cos\theta_r}) \quad (34)$$

الحرارة التي تنتقل لأعلى من المنطقة الحمل السفلى (Q_{ub})، يمكن حسابها من المعادلة 26. هذا مماثلاً للحرارة التي تنتقل إلى منطقة UCZ.

$$Q_{ground} = U_{ground} A_b (T_s - T_g) \quad (35)$$

$$U_{ground} = \frac{1}{R_3 + R_g + R_4} \quad (36)$$

تمثل الرموز $R3$ و Rg و $R4$ مقاومة انتقال الحرارة بالحمل إلى الأرض.

$$R_3 = \frac{1}{h_3}\ , R_g = \frac{xg}{kg}\ ,\ R_4 = \frac{1}{h4} \quad (37)$$

لحساب $Qground$ ، تكون المعادلة كالتالي:

$$Q_{ground} = \frac{A_b(T_s - T_g)}{\frac{1}{h_3} + \frac{X_g}{k_g} + \frac{1}{h_4}} \quad (38)$$

3- النتائج و المناقشة:

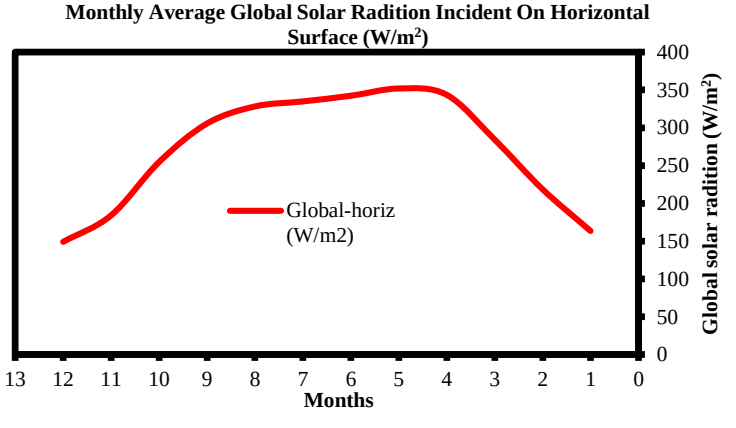
تقدم هذه الورقة نتائج المحاكاة المُستخلصة من الصيغ المذكورة أعلاه لنموذج البركة الشمسية. أولًا: تم حساب المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح أفقي، بالإضافة إلى المتوسط الشهري لدرجة الحرارة الجو لمدينة طرابلس على مدار العام، وذلك باستخدام برمجة ولغة Fortran لإجراء التحليل.

ثانيًا: تم حل معادلات توازن الطاقة لكل منطقة من مناطق SGSP المعادلات (22) و(33) باستخدام طريقة رانج كوتا المكتوبة بلغة فورتران. تم اعتماد هذا النموذج العددي لمدينة طرابلس SGSP. لفترة عام واحد من حيث تغيرات درجة الحرارة في منطقتي LCZ وUCZ (الشكل 2).

تعتمد النتائج على بعض الافتراضات التي تم تبنيها من الناحية الظروف المناخية و نموذج المحاكاة، والتي استندت على أن الأيام صافية، وخالية من الغبار والأوساخ والأشجار وأي تأثيرات تظليل أو عوائق، يُفترض أن كلتا المنطقتين (العلوية والسفلية) مختلطتان جيدًا، كذلك يتم امتصاص الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى المنطقة عديمة الحمل بالكامل في هذه الطبقة، حيث تم إهمال تراكم الحرارة في المنطقة عديمة الحمل عند حساب درجات الحرارة في المنطقتين العلوية والسفلية .أيضا تم حساب المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي العالمي الساقط على سطح الأفقي، وذلك وفقًا للإحداثيات الجغرافية لمدينة طرابلس، الواقعة عند خط عرض ϕ 32.9 ° درجة، وخط طول 13.8 L درجة، وعلى ارتفاع 81 h مترًا فوق مستوى سطح البحر.

يتضح من الشكل 3 أن الإشعاع الشمسي الساقط على هذه المدينة يزداد تدريجيًا من فصل الشتاء إلى فصل الصيف، ويبلغ ذروته في شهري مايو ويونيو. يوجد تباين موسمي كبير في الإشعاع الشمسي 352 (واط/م² شهر) كأقصى قيمة.

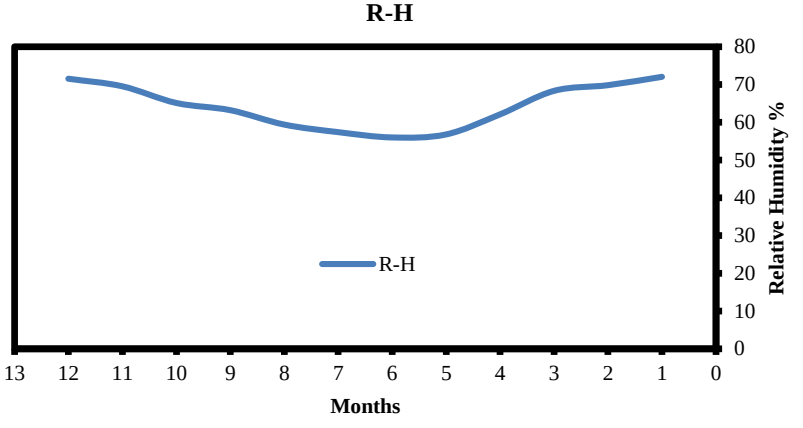
يوضح الشكل 4 متوسط تغير الرطوبة النسبية في طرابلس خلال الفترة المدروسة. يكشف المنحنى عن سلوك موسمي واضح، حيث تُسجل مستويات رطوبة أعلى خلال أشهر الشتاء وقيم أقل خلال فصل الصيف. يرتبط هذا الاتجاه بشكل أساسي بالتأثيرات المشتركة لتغير درجة الحرارة المحيطة وتأثير البحر الأبيض المتوسط. يُمثل توزيع الرطوبة النسبية شرطًا مناخيًا هامًا، إذ يؤثر على معدلات التبخر السطحي، وتبادل الحرارة الكامنة، والفقد الحراري الإجمالي من نظام البركة الشمسية.



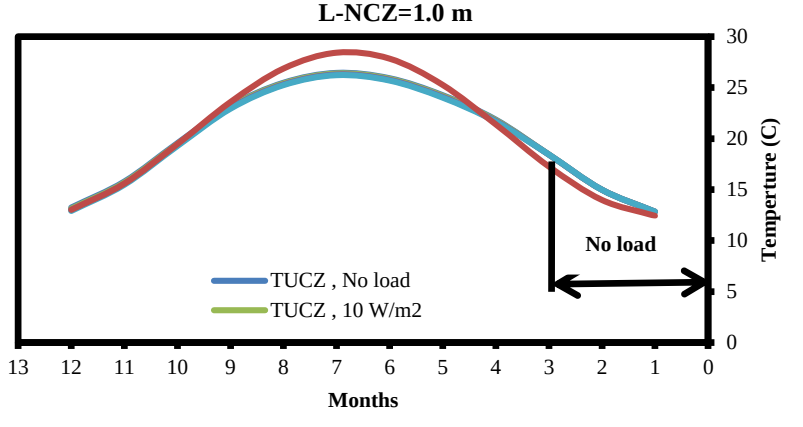
الشكل (3) متوسط الإشعاع الشمسي الشهري لمدينة طرابلس

يعرض الشكل 5 متوسط درجة حرارة الهواء المحيط في مدينة طرابلس. يُظهر المنحنى دورة سنوية واضحة تتميز بدرجات حرارة معتدلة في الشتاء وقيم مرتفعة خلال الصيف. يؤثر هذا التطور في درجة الحرارة المحيطة بشكل مباشر على الحد العلوي للبركة الشمسية، حيث يتحكم في فقدان الحرارة بالحمل والإشعاع من السطح، ويؤثر بشكل كبير على السلوك الحراري للمنطقة العلوية للحمل الحراري، أيضا مقارنته (المنحنى) مع درجات الحرارة في منطقة الحمل الحراري العلوية عندما لا يوجد حمل حراري وعند معدلات انتزاع حراري مختلف مُتحكم به يبلغ 10 و20 و30 واط/م ²(سمك المنطقة عديمة الحمل = 1 متر).

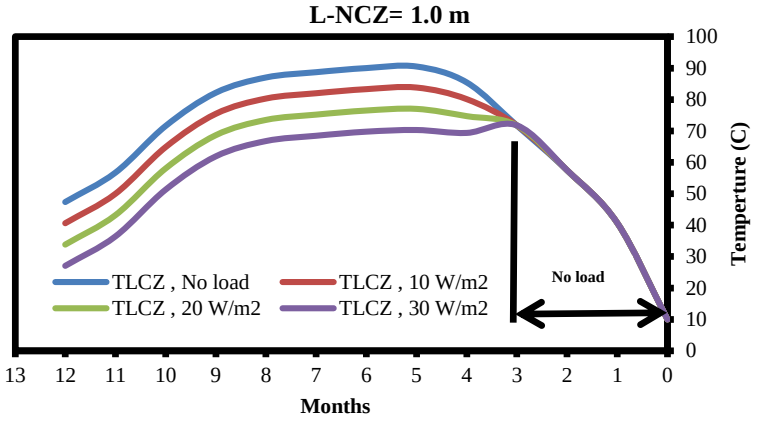
الشكل 6 يبين التطور الزمني لدرجات الحرارة في منطقتي الحمل الحراري السفلى عندما لا يوجد حمل حراري وكذلك عند معدلات انتزاع حرارة تبلغ 10 و20 و30 واط/م²، مع سمك منطقة عديمة الحمل NCZ يبلغ 1 متر، مقابل أقصى درجات الحرارة لمنطقة الحمل السفلى 90.5 م^0 ، 83.8 م^0 ، 77.0 م^0، 70.3 م^0. يؤدي ازدياد معدل الاستخلاص إلى انخفاض تدريجي في درجة حرارة المنطقة الحمل الحر اري السفلى ، مما يعكس إزالة فعالة للطاقة الحرارية. في الوقت نفسه، تبقى درجة حرارة المنطقة عديمة الحمل مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالظروف الجوية المحيطة. يشير ثبات فرق درجة الحرارة بين المنطقتين إلى أن سمك المنطقة عديمة الحمل البالغ 1 متر كافٍ للحفاظ على التدرج الحراري وكبح الاختلاط الحملي واسع النطاق في ظل ظروف التشغيل المدروسة.



الشكل (4) متوسط الرطوبة النسبية الشهرية لمدينة طرابلس



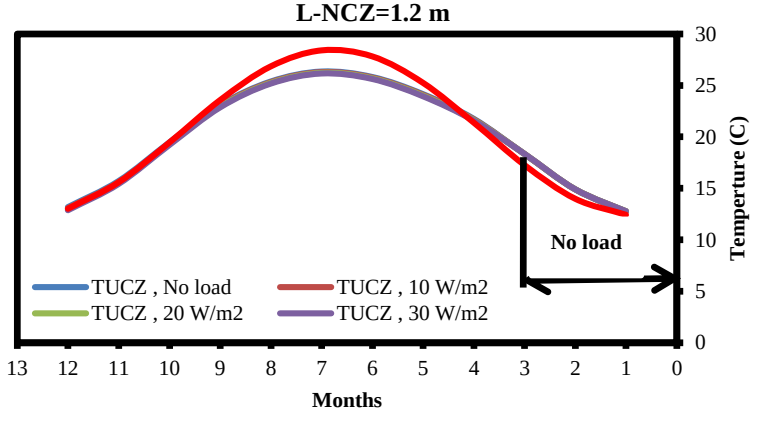
الشكل (5) متوسط درجة حرارة الجو المحيطة و المنطقة العليا (UCZ) للبركة الشمسية الشهرية لمدينة طرابلس



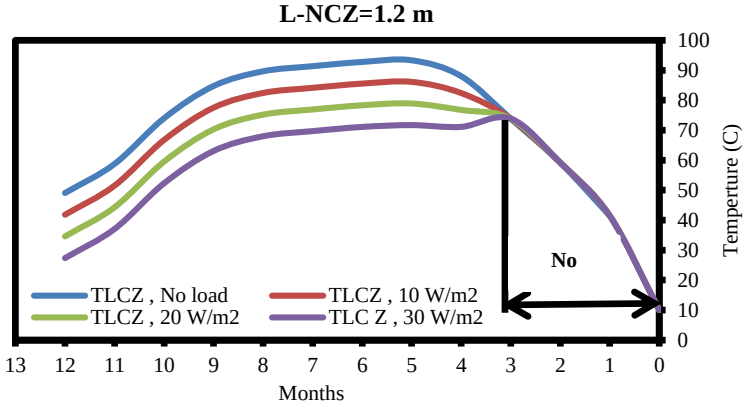
الشكل (6) متوسط درجة حرارة المنطقة السفلى (LCZ) للبركة الشمسية الشهرية لمدينة طرابلس

يوضح الشكل 7 منحنيات متوسط درجة حرارة الهواء المحيط في مدينة طرابلس و درجات الحرارة في منطقة الحمل الحراري العليا. يُظهر المنحنى دورة سنوية واضحة تتميز بدرجات حرارة معتدلة في الشتاء وقيم مرتفعة خلال الصيف. يؤثر هذا التطور في درجة الحرارة المحيطة بشكل مباشر على الحد العلوي للبركة الشمسية، حيث يتحكم في فقدان الحرارة بالحمل والإشعاع من السطح، ويؤثر بشكل كبير على السلوك الحراري للمنطقة العلوية للحمل الحراري، أيضا مقارنته مع درجات الحرارة في منطقة الحمل الحراري العلوية عندما لا يوجد حمل حراري وعند معدلات انتزاع حراري مختلف مُتحكم به يبلغ 10 و20 و30 واط/م^2 (سمك المنطقة عديمة الحمل= 1.2 م) مقابل أقصى درجات الحرارة لمنطقة الحمل السفلى 93.5 م^0 ، 86.15 م^0 ، 79.0 م^0، 71.0 م^0.

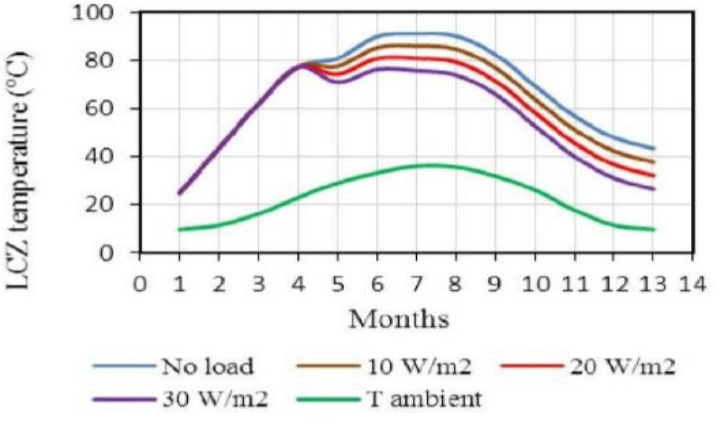
الشكل 8 يصف منحنيات درجة الحرارة في منطقة الحمل الحراري السفلى عند معدلات استخلاص حرارة مختلفة (سُمك منطقة الحمل الحراري عديمة الحمل = 1.2 م) ، يوضح الشكل تطور درجة الحرارة في منطقة الحمل الحراري السفلي عند معدلات استخلاص حرارة تبلغ 10 و20 و30 واط/م^2، وذلك بزيادة سُمك منطقة الحمل الحراري الوسطى (عديمة الحمل) إلى 1.2 متر. تعمل الطبقة العلوية الأكثر سُمكًا على تعزيز القصور الحراري للمنطقة السطحية، مما ينتج عنه تغيرات أكثر سلاسة في درجة الحرارة وتقليل الحساسية للتقلبات الجوية قصيرة المدى. على الرغم من زيادة معدلات الاستخلاص، تحافظ منطقة الحمل الحراري السفلي على درجات حرارة مرتفعة نسبيًا مقارنةً بمنطقة الحمل الحراري العلوي، مما يدل على إمكانية تحقيق استخلاص حرارة مستقر مع الحفاظ على التدرج الحراري عند استخدام سُمك مناسب للطبقات.



الشكل (7) متوسط درجة حرارة الجو المحيطة و المنطقة العليا (UCZ) للبركة الشمسية الشهرية لمدينة طرابلس



الشكل (8) متوسط درجة حرارة المنطقة السفلى (LCZ) للبركة الشمسية الشهرية لمدينة طرابلس



الشكل (9) متوسط درجة حرارة المنطقة السفلى (LCZ) للبركة الشمسية الشهرية لمدينة بغداد-العراق [23]

- **مقارنة نتائج الدراسة الحالية بالدراسات السابقة**

أظهرت نتائج الدراسة الحالية توافقًا جيدًا مع نتائج دراسة صفوان محمد كنان و جوناثان ديوزبري، وجريجوري لين- سيرف كما في الشكل (9) [23] 2015 م المتعلقة بسلوك البركة الشمسية ذات التدرج الملحي، إذ بينت الدراستان أن درجة حرارة منطقة الحمل الحراري السفلي (LCZ) تنخفض مع زيادة معدل استخلاص الحرارة. فقد أشارت الدراسة المشار إليها [23] إلى أن أقصى درجة حرارة لـ LCZ بلغت حوالي 91 م° عند عدم استخلاص الحرارة، وانخفضت إلى نحو 76 م° عند معدل استخلاص حراري مقداره 30 واط/م²، بينما أظهرت نتائج الدراسة الحالية أن درجة الحرارة القصوى بلغت حوالي 93 م° بدون استخلاص حراري، ثم انخفضت إلى حوالي 71 م° عند معدل استخلاص 30 واط/م².

كما اتفقت الدراستان على أن سمك المنطقة عديمة الحمل (NCZ) يؤثر بصورة مباشرة في الأداء الحراري للبركة الشمسية، حيث يؤدي زيادة سمك هذه الطبقة إلى تحسين العزل الحراري وتقليل فقدان الحرارة من المنطقة السفلى، مما يساعد على الحفاظ على درجات حرارة مرتفعة داخل منطقة الحمل الحراري السفلي. وقد استخدمت الدراسة المشار إليها [23] سمك بلغ 0.3 م للمنطقة العليا (UCZ)، و 1.0-1.3 م للمنطقة عديمة الحمل (NCZ)، و 0.7-1.0 م لمنطقة الحمل السفلي (LCZ)، وهي قيم متقاربة مع القيم المعتمدة في الدراسة الحالية.

وتشير هذه النتائج إلى وجود توافق علمي واضح بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة من حيث تأثير معدلات استخلاص الحرارة و سمك الطبقات على السلوك الحراري للبركة الشمسية، مع وجود فروقات طفيفة في درجات الحرارة القصوى تعزى إلى اختلاف الظروف المناخية والخصائص التشغيلية والنماذج العددية المستخدمة. اختلاف النتائج يعود غالبًا إلى اختلاف الظروف المناخية، و اختلاف الخصائص الفيزيائية للبركة، و اختلاف سمك الطبقات أو الملوحة، و اختلاف النموذج العددي المستخدم في المحاكاة.

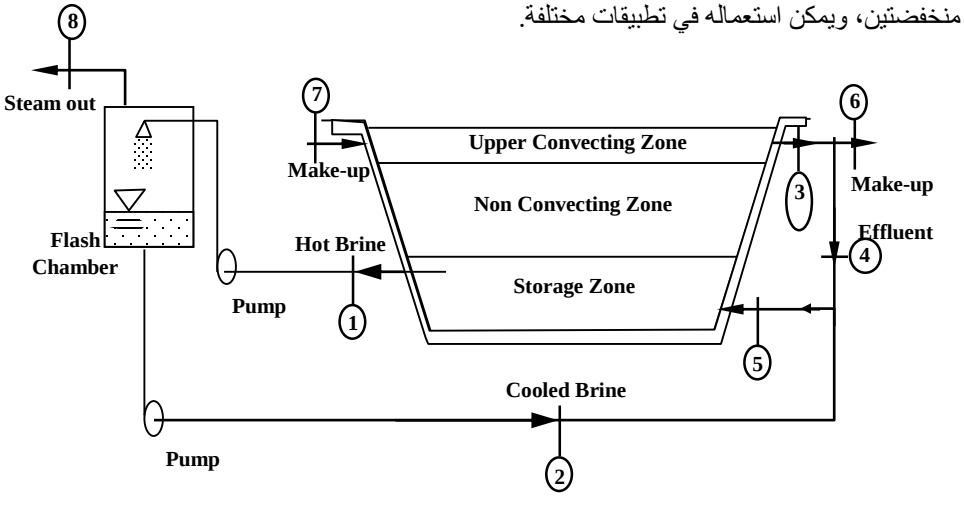
3-1- تطوير النموذج الفيزيائي:

في هذه الدراسة، و بالإضافة الى النموذج الفيزيائي المعتمد في المحاكاة العددية للبركة الشمسية مع نزع الطاقة، تم اقتراح النموذج الفيزيائي محسن يهدف الى تمثيل أدق للظواهر الفيزيائي المؤثرة على الأداء الحراري للبركة الشمسية، يركز هذا النموذج المحسن على تحسين توصيف آليات انتقال الحرارة داخل طبقات البرك، و ثبات التدرج الكثافة، وحل مشكلة اتزان البركة الشمسية مع أخذ في الاعتبار تأثيرات اضافية لم يتم تضمينها في النموذج الأساسي. يود المؤلف أن يعرب عن خالص امتنانه لدكتور خيري آغا لاقتراحه المفهوم الفيزيائي المتطور الذي ألهم هذا العمل كفكرة بحثية أولية ومستقبلية. وقد قام المؤلف لاحقًا بتنقيح النموذج الفيزيائي وإعادة صياغته وعرضه بالكامل.

3-1-1- الوصف المبسط للنموذج:

يقدم هذا المقترح طريقة مبسطة لتصميم منظومة إنتاج البخار باستعمال مفهوم البرك الشمسية المتدرجة الكثافة والمزودة بغرف التبخير الوميضي.

يوضح شكل (10) تخطيطا لمنظومة البرك الشمسية. يتم ضخ سائل البراين الساخن عند ضغط عالي إلى غرفة التبخير الوميض، حيث يكون الضغط أقل بكثير من ضغط البراين، الأمر الذي يسبب تبخير جزء من سائل البراين ودفعه إلى الخط الرئيسي للبخار. يتم توجيه السائل عالي التركيز المتبقي في غرفة التبخير عن طريق مضخة إلى منطقة التخزين في البركة الشمسية. يستخدم جزء من ماء تنظيف سطح البركة لتعوض الفاقد، كما يتم خلطه مع سائل البراين عالي الكثافة ويدفع إلى منطقة التخزين في البركة. ويتم حساب محتوى الملح في سائل البراين الذي يغذى منطقة التخزين في البركة بحيث يكون فقط كافيا لتعويض النقص في سائل البراين المنتشر من منطقة الكثافة العالية إلى منطقة الكثافة المنخفضة. إن الميزات الأساسية لهذا التصميم ،بالإضافة إلى إنتاج طاقة مفيدة، يتلخص في الآتي: سهولة التصميم ،ثبات التدرج الكثافة، وحل مشكلة اتزان البركة الشمسية وهى من المشاكل المهمة. إن بخار الماء المنتج من مثل هذه الطريقة يكون بخارا صافيا عند ضغط ودرجة حرارة منخفضتين، ويمكن استعماله في تطبيقات مختلفة.



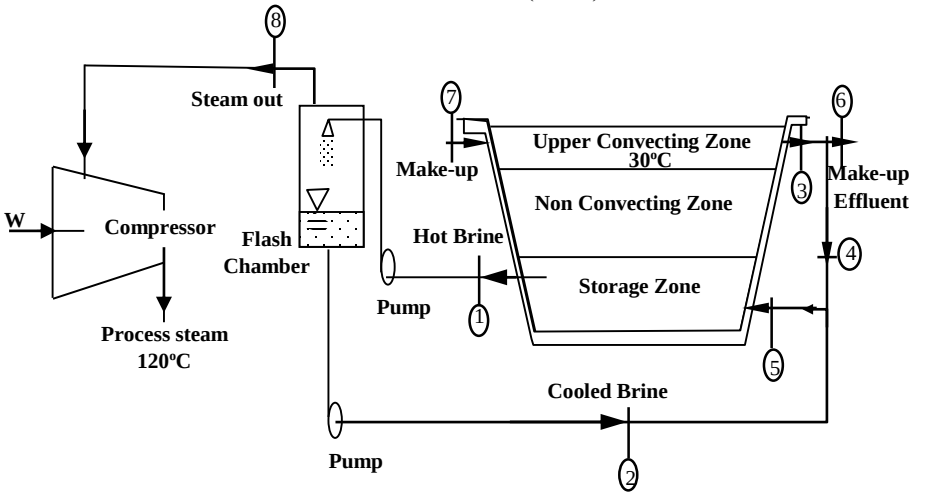
شكل(10) منظومة إنتاج البخار باستخدام بركة شمسية متدرجة الملوحة

3-1-2- المساهمة المتوقعة:

انطلاقا من مبدأ الحفاظ على احتياطي النفط ، و كذلك المحافظة علي البيئة من أطنان الملوثات والتي ينتج عنها أضرار صحية و بيئية كبيرة، بدأ الاهتمام بالطاقة الشمسية لتوفرها بمعدلات مرتفعة نسبيا وخاصة في ليبيا، وأهم التطبيقات الأكثر شيوعا في الطاقة الشمسية والمستخدمة إلى الآن، هي البرك الشمسية باعتبارها مجمع فعّال للطاقة الشمسية وأداة تخزين، أي تعطي بساطة نسبية وطريقة اقتصادية من تزويد الطاقة من درجة منخفضة مع فائدة تخزين سنوي ....وأكثر التطبيقات توقعا في هذه الدراسة للبرك الشمسية بالنسبة للبخار المنتج هي:

أ- انتاج البخار باستخدام غرفة التبخير الوميضي.

شكل (11) يصف طريقة لعملية إنتاج الحرارة بواسطة مضخة حرارية مشغلة كهربائيا لضغط البخار الخارج من غرفة التبخير الوميضي، لكن هذا يحمل خطر التآكل بسبب قطرات الماء المالح التي تنقل إلى الضاغط ، هذا في حالة كون أن البخار المتحصل عليه غير نقي. ذالك واضح بأن الطريقة لا تتطلب طرح حرارة؛ ولكن يعتمد مطلب الطاقة الكهربائية على درجة الحرارة المطلوبة لضغط البخار. حيث انعكاسية ضغط البخار من 85 م0 (درجة حرارة البركة عند القاع) إلى درجة الحرارة النموذجية 120 م0 (درجة الحرارة الخروج من الضاغط) ربما يتحصل عليها في دورة كارنوت بمعامل أداء 11.2، أما عمليا فمعامل الأداء 6.0قد ينجز إلى حد معقول، بسبب الكلفة العالية نسبيا من الكهرباء، واقتصاديات الحرارة المنتجة بهذه الطريقة بواسطة انضغاط البخار في الوقت الحاضر تعتبر هامشية..... (1988).



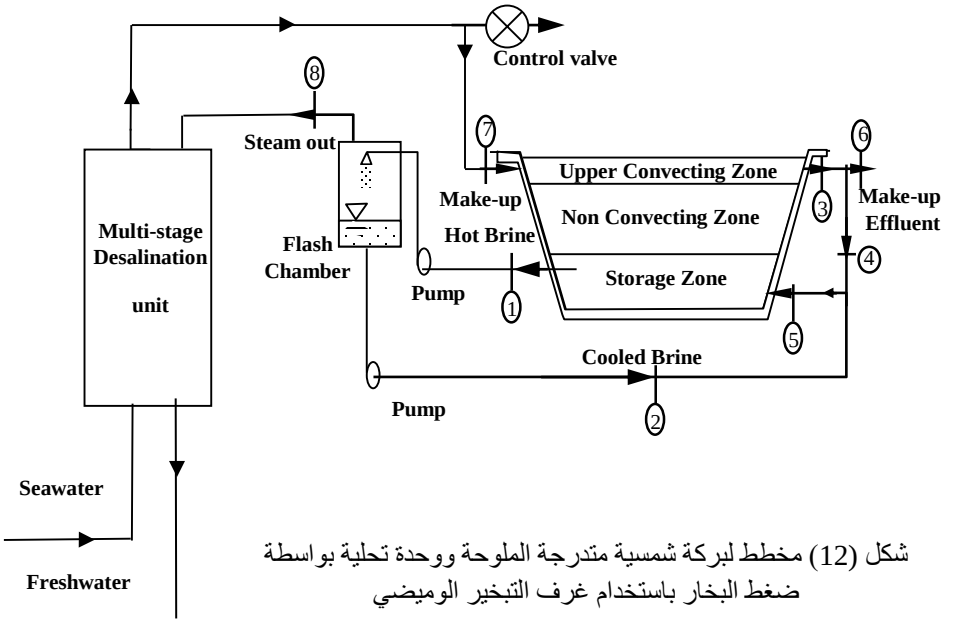
شكل (11) مخطط لبركة شمسية متدرجة الملوحة وعملية البخار بواسطة انضغاط البخار باستخدام غرف التبخير الوميضي

ب- تحلية مياه البحر بواسطة ضغط البخار باستخدام غرفة التبخير الوميضي.

شكل (12) يصف طريقة لتحلية مياه البحر بواسطة انضغط البخار باستخدام غرف التبخير الوميضي، فعند استعمال البخار مثلا في محطة لتحليه مياه البحر، بحيث يعرف معدل الأداء بعدد الكيلوجرامات من البخار المنتج إلى عدد الكيلوجرامات من البخار المستعمل للإنتاج، يعتقد أن نسبة معدل الأداء سيزداد على الأقل بواحد.

جـ- توليد القدرة الكهربائية.

د- العمليات الصناعية التي تتطلب كميات كبيرة من درجات الحرارة المنخفضة



شكل (12) مخطط لبركة شمسية متدرجة الملوحة ووحدة تحلية بواسطة ضغط البخار باستخدام غرف التبخير الوميضي

.

3-1-3- الاختلاف المقدم في هذه الدراسة عن الدراسات السابقة:

1- في هذا العمل تم استخدام ماء البركة مباشراً في غرف التبخير الوميضي، بينما في العديد من الأعمال السابقة تم استخدم ماء البركة كمبادل حراري لرفع درجة حرارة مائع آخر.
2- الأعمال السابقة تم استخدام طرق للمحافظة على ميل الملوحة، ومعدل تركيز الأملاح في قاع البركة، نتيجة للتمدد الحراري الغير مستقر الذي ينتج عنه انخفاض في تركيز الأملاح عند القاع والانتشار الطبيعي للأملاح، من منطقة الحمل السفلى (LCZ) إلى منطقة الحمل العليا (UCZ)، حيث في هذه الدراسة فسيتم المحافظة على ميل الملوحة، وتركيز الأملاح في قاع البركة، بإعادة الأملاح المنتشرة والمنتزعة حرارياً في قاع البركة، بواسطة دورة مغلقة ومتصلة بالبركة الشمسية.
3- هذا المقترح يعطي من حيث تحلية المياه، سهولة التشغيل والصيانة، صغر حجم التصميم، ثبات التدرج الكثافة، وانخفاض تكلفة المتر المكعب من المياه المحلاة عند مقارنتها بمحطات التحلية المتعددة المراحل(MSF).
4- التغلب على مشكلة الحصول على الأملاح وضمان التشغيل المنظم والمستمر للبرك الشمسية بأقل أضرار بيئية والناتجة من رمي الأملاح خارج البركة، فإنه تم استخدام طريقة لإعادة وتدوير الأملاح المستخدمة على المدى الطويل.

4-1-3- هدف المقترح:

هدف المقترح هو تقديم النموذج الرياضي الذي يستخدم للتنبؤ بمساحة البرك الشمسية التي تنتج كمية ثابتة من البخار باستخدام غرف التبخير الوميضي، وكذلك بعض استخدامات هذا النموذج و مدى فعاليته و اقعيا. وسيتم استخدام النموذج مستقبلا بصفة خاصة للحالة التي يحتاج فيها التصميم إلى إنتاج بخـار.

4- الخلاصة:

تؤكد الدراسة العددية أن البرك الشمسية ذات التدرج الملحي قادرة على انتزاع الطاقة الحرارية بمعدلات مضبوطة تبلغ 10 و20 وحتى 30 واط/م² من منطقة الحمل الحراري السفلى، دون التأثير على التدرج الحراري أو الاستقرار الهيدروديناميكي، شريطة إدارة سحب الحرارة ونقل الكتلة بشكل سليم. ويُسهم دمج غرفة تبخير، تبخير سريع منخفضة الضغط في توسيع نطاق وظائف البركة الشمسية ليشمل ما هو أبعد من مجرد تخزين الحرارة السلبي، مما يُتيح توليد البخار بكفاءة عالية للاستخدامات الحرارية وتطبيقات الطاقة منخفضة الحرارة، وذلك ضمن حدود درجة الحرارة الطبيعية للنظام.

وتُعدّ دورة إعادة تدوير الملح شبه المغلقة المقترحة عنصرًا أساسيًا للتشغيل طويل الأمد، حيث تُعوض بفعالية فقدان الملح بالانتشار في منطقة عدم الحمل الحراري، وتُقلل بشكل كبير من الحاجة إلى إضافة الملح من مصادر خارجية. من خلال دمج انتقال الحرارة وانتشار الملوحة وقيود الطفو ضمن إطار محاكاة موحد، تقدم هذه الدراسة نموذجًا متسقًا فيزيائيًا وقابلًا للتطوير، يمكن أن يُشكل أساسًا لتحسين التصميم واستراتيجيات التحكم والتحقق التجريبي في المستقبل.

وبشكل عام، أن نظام البركة الشمسية المُدمج مع نظام التبخير يُمثل نهجًا عمليًا وفعالًا من حيث الموارد لإنتاج الطاقة الحرارية المستدامة في المناطق القاحلة، مع إمكانات كبيرة للتكامل مع أنظمة تحلية المياه، وتوفير الحرارة اللازمة للعمليات الصناعية، ومشاريع توليد الطاقة اللامركزية.

5- المراجع:

[1] Celestino Angeli, Erminia Leonardi (2003),” A one-dimensional numeric- al study of the salt diffusion in a salinity-gradient solar pond.

[2] H.Tabor 1981,” Review article solar ponds “, Solar Energy,Vo.27,No. 3,pp.181-194.

[3] Huanmin Lu, John C. Walton, Andrew H.P. Swift (2001) “Desalination coupled with salinity-gradient solar ponds “Desalination, pp 13-23.

[4] Abdul-Ghani Mohammed Ramadan, “Design Methodology and Maintenance strategy for a salt gradient solar pond coupled with an evaporation pond”, M.sc Thesis, Alfateh University, Tripoli-Libya, 1999.

[5] Safi.M.J (1998) “ performance of a flash Desalination unit intended to be coupled to a solar pond “Retable Energy, Vol. 14, Nos. 1-4, pp. 339-343.

[6]M.Posnansky(1987)“Technical and Economical Aspects of Solar Desalination with Particular Emphasis on Solar Pond Powered Distillation Plants”, Desalination Vol. 67 pp 81-95.

[7] W. Rivera, R.J. Romero (2000) “Evaluation of a heat transformer powered by a solar pond “ Solar Energy Materials & Solar Cells Vol. 63 413-422.

[8] Khaled and Greshon (1988) “ presses steam generation by temperature boosting of heat from solar ponds “Solar Energy Vol.41 No.1.pp 81-89.

[9] H.Tabor and B.Done, The Beit Ha’Arava 5 MW (e) solar pond power plant- progress report. Proceedings of conference on international progress in solar ponds Cuernavaca , Mexico, March 1987.

[10] Adel O. Sharif, Hazim Al-Hussaini, Ibrahim A. Alenezi, New Method for Predicting the Performance of Solar Pond in any Sunny Part of the World, World Renewable Energy Congress 2011-Sweden 8-13 may 2011.

[11] Assad H. Sayer and Hazim Al-Hussaini1, New Theoretical Modelling of Heat Transfer in Solar Ponds, Publication Year: 2016,Volume and Pages: Volume 125, Pages 207–218.

[12] Safwan Mohammed Jameel Ahmed Kanan ,Modelling Of A Solar Pond As A Combined Heat Source And Store To Drive An Absorption Cooling System For A Building In Iraq, A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Science and Engineering, University of Manchester 2017.

[13] OAH Al-Musawi, AA Khadom, FRB Ahmadun, DR Biak, water distillation in a combined solar still and solar pond system: Iraq as a case study, Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2018.

[14] Osamah A.H.AL-Musawi,Aness A. Khadom,Haammed B.Manhood, Mustafa S. Mahdi ,Solar Pond as a low grade energy source for water desalination and power generation Renew. Energy Environ. Sustain. 5, 4 (2020).

[15] Abdessamad Nait Brahim1, Yassmine Rghif1 and Fatima Bahraoui1, Numerical investigation of solar energy storage by a salt gradient solar pond in several Moroccan cities, E3S Web of Conferences 336, 00020 (2022) ,ICEGC'2021, Corresponding author : rghifyassmine@gmail.com.

[16] Basim Sachit Atiyah , Investigation the performance of thermoelectric generator coupled with solar pond .A Thesis ,Submitted to the College of Engineering / University of Kerbala in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Thermo-fluid Mechanics 2023.

[17] Machler, M.A.; Iqbal, M.'' A modification of the ASHRAE clear sky irradiation model''. Ashrae Trans. 1967, 91, 106–115.

[18] Lunde,P.J.,'' Solar Thermal Engineering-Space Heating And Hot Water System '',John Wiley and Sons, new York,(1980).

[19] Jaefarzadeh, M. R. (2004) Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect. Solar Energy, 77(3), 281-290.

[20] Bansal, P. K., Kaushik, N.D., 1981. Salt gradient stabilized solar pond collector Energy Convers. & Mgmt. 21, 81-95.

[21] McAdams, W.H., 1954. Heat transmission. 3rd edition, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 565 Japan.

[22] Kishore, V.V.N., Veena, J., 1984. A practical collector efficiency equation for non-convecting solar ponds. Solar Energy 33 (5), 391-395.

[23] Safwan Kanan, Jonathan Dewsbury, and Gregory F. Lane-Serff, "Simulation of Solar Air-Conditioning System with Salinity Gradient Solar Pond," Energy Procedia, vol. 79, pp. 746–751, 2015.

[24] Khaled Gommed and Gershon Grossman (1988)," Process steam generation by temperature boosting of heat from solar ponds", solar Energy,Vo.41,No.1,pp.81-89.

[25]A.Rab1 and Nielsen(1975)"solar ponds for space Heating "solar Energy,17,pp1-12.