جامعة مصراتة

كليــة الهندســة

قســم الهندسة الكهربائية والإلكترونية

شعبة الاتصالات

مشروع تخرج بعنوان

تصميم وتنفيذ وكيل ذكي ذاتي التعلم لتشخيص أعطال شبكات LTE باستخدام تقنية التوليد المعزز بالاسترجاع (RAG)

قدم هذا المشروع استيفاء متطلبات الحصول على الدرجة الجامعية الأولى (البكالوريوس) في الهندسة الكهربائية والإلكترونية بكلية الهندسة بجامعة مصراتة.

إعداد الطالبتان

ندى محمد أبـوفناس (2001002)

غيداء عمر الدعيكي (2001003)

إشراف:

د. علي عبد الشاهد

الفصل الدراسي: خريف 2025-2026م

بِسْـــمِ اللَّـهِ الرَّحْمَـٰنِ الرَّحِيمِ

﴿هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَّرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ وَالْحِسَابَ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَٰلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ نُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ﴾.

سورة يونس- الآية 5.

الإهـــــــــــداء

بسم الله الرحمن الرحيم

ابتداءً، نحمد الله تعالى الذي يسّر لنا طريق العلم، وألهمنا الصبر والمثابرة، وأعاننا على إتمام هذا العمل بعد جهد متواصل.

ثم نصلي ونسلّم على سيدنا محمد ﷺ، الذي كان العلم في سيرته رسالة، والعمل أمانة، والنية أساس كل سعي نافع.

نُهدي هذا العمل إلى أسرنا الكريمة، الذين كانوا العون بعد الله، والدافع الصادق للاستمرار، والحضور الثابت في كل مرحلة من مراحل هذه الرحلة العلمية.

إلى من أحاطونا بالدعم والتشجيع، وتحملوا معنا عناء الطريق، وآمنوا بقدرتنا على إتمام هذا العمل، فكانوا سندًا نفسيًا ومعنويًا لا غنى عنه، ومصدر قوة في لحظات التعب والتحدي.

وإلى كل من شاركنا طريق التعلّم، ورافقنا في مسيرته بما حملته من صعوبات وتجارب وإنجازات، نهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع، إلى كل من كان له أثر في تشكيل وعينا العلمي، أو أسهم في توسيع مداركنا، أو شاركنا لحظات البحث والاجتهاد، ونسأل الله العليّ القدير أن يجعل هذا العمل خالصًا لوجهه الكريم، وأن يبارك في الجهد المبذول فيه، وأن ينفع به كل من يطّلع عليه، ويجعله خطوةً صادقة في طريق العلم النافع والعمل الصالح،

إنه وليّ ذلك والقادر عليه.

الشكر والتقدير

نتوجّه أولا بالشكر لله سبحانه وتعالى، الذي منحنا التوفيق والقدرة على إتمام هذا العمل، ونسأله أن يجعله عملا نافعا ومقبولا.

كما نتقدّم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى مشرف المشروع الدكتور علي عبد الشاهد، على ما قدّمه من متابعة علمية دقيقة، وتوجيهات منهجية بنّاءة، كان لها الدور المحوري في ضبط مسار هذا المشروع والارتقاء بجودته الأكاديمية.

ونعبّر عن تقديرنا العميق لأساتذتنا الكرام في قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، لما بذلوه من جهد في تعليمنا، وتوجيهنا، وإرساء أسس التفكير الهندسي والمنهجي لدينا.

ولا يفوتنا أن نشكر كل من قدّم لنا دعمًا علميًا أو عمليًا أو معنويا خلال تنفيذ هذا المشروع، وساهم ولو بشكل غير مباشر في إنجازه.

ونسأل الله أن يجزي الجميع خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل سببا في نفعٍ علمي ومعرفي، وأن يكون خطوة في طريق التعلم المستمر والعطاء.

فهرس المحتويات

فهرس الأشكال

فهرس الاختصارات

الاختصار	المصطلح
AIOps	Artificial Intelligence for IT Operations
API	Application Programming Interface
BBU	Baseband Unit
BER	Bit Error Rate
BERT	Bidirectional Encoder Representations from Transformers
CDR	Call Drop Rate
CNNs	Convolutional Neural Networks
CPU	Central Processing Unit
CSV	Comma-Separated Values
CSSR	Call Setup Success Rate
EPC	Evolved Packet Core
3GPP	3rd Generation Partnership Project
GPT	Generative Pre-trained Transformer
GPU	Graphics Processing Unit
ITU	International Telecommunication Union
KB	Knowledge base
KPIs	Key Performance Indicators
LLMs	Large Language Model
LSTM	Long Short-Term Memory
LTE	Long Term Evolution
MAS	Multi-Agent Systems
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
NLP	Natural Language Processing
NOC	Network Operations Centers
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OSS	Operations Support System
PDF	Probability Density Function
PRB	Physical Resource Blocks
PRTG	Paessler Router Traffic Grapher
PSTN	Public Switched Telephone Network

PyQt6	Python bindings for Qt 6
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAM	Random Access Memory
RF	Radio Frequency
RNNs	Recurrent Neural Networks
SDR	Service Drop Rate
SIEM	Security Information and Event Management
SSSR	Session Setup Success Rate
WAN	Wide Area Networks

الملخص

يهدف هذا المشروع إلى تصميم وتطوير منصة ذكية داعمة لاتخاذ القرار الهندسي، متخصصة في تحليل وتشخيص إنذارات شبكات الجيل الرابع (LTE)، وذلك من خلال اعتماد نهج هجين يجمع بين الأنظمة الخبيرة وتقنيات الذكاء الاصطناعي القائمة على معالجة اللغة الطبيعية.

تعتمد المنصة على قاعدة معرفة هندسية منظمة، تم بناؤها استنادًا إلى مراجع معيارية وممارسات تشغيلية شائعة، بهدف التعامل بكفاءة مع الإنذارات الواضحة والمتكررة، وتقديم تشخيصات مفسَّرة وقابلة للتتبع.

تقوم المنصة باستقبال ملفات الإنذارات بصيغ شائعة مثل CSV وExcel، ثم تمريرها عبر مسار معالجة يشمل توحيد البيانات، وبناء تمثيل نصي للإنذار، واسترجاع المعرفة ذات الصلة باستخدام تقنيات إحصائية مثل TF–IDF، وفي الحالات التي يتعذر فيها الوصول إلى تشخيص مباشر من قاعدة المعرفة، يتم تفعيل نمط استنتاجي مرن يعتمد على نموذج لغوي كبير يعمل كعنصر داعم، ضمن إطار يراعي قابلية التفسير وعدم الادعاء بتقديم قرار قطعي.

تم تنفيذ النظام باستخدام لغة Python، مع واجهة رسومية تفاعلية مبنية على PyQt6، ومعمارية متعددة الطبقات تفصل بين إدخال البيانات، ومحرك التشخيص، والطبقة الاستنتاجية، وواجهة المستخدم، كما شمل التقييم العملي للنظام تحليل مجموعة مختارة من الإنذارات ذات مستويات وضوح مختلفة، ومقارنة مخرجات التشخيص بالتقييم الهندسي البشري، باستخدام مقياس تقييمي نوعي.

تُظهر نتائج التقييم أن المنصة قادرة على تقديم دعم تشخيصي منظم يسهم في تقليل الزمن التحليلي على المهندس، مع الحفاظ على دور العنصر البشري كمرجع أساسي في اتخاذ القرار، ويُعد هذا المشروع خطوة أولية نحو تطوير أنظمة مساعدة ذكية أكثر تكاملًا لدعم تشغيل وصيانة الشبكات الخلوية.

-

الفصــل الأول

المقدمــة

1.1 المقدمة

لم تعد شبكات الاتصالات الخلوية الحديثة مجرد وسيلة لنقل البيانات، بل تحولت إلى بنية رقمية حيوية تقوم عليها كافة الخدمات اليومية للأفراد والمؤسسات، ومع التحول المتسارع نحو شبكات ذات سعات فائقة وزمن استجابة ضئيل تطورت هذه المنظومات إلى أنظمة هندسية معقدة تتكامل فيها طبقات النفاذ الراديوي مع أنظمة النقل والنواة ضمن إطار تقني موحد، ورغم أن هذا التعقيد يمثل متطلبا أساسيا لمواكبة التطور التقني، إلا أنه في المقابل فرض تحديات تشغيلية غير مسبوقة جعلت من الحفاظ على استقرار الخدمة وتوفرها (Availability) تحديا مستمرا يواجه مهندسي ومشغلي الشبكات [1] [2].

وفي هذا السياق التشغيلي، تواجه مراكز عمليات الشبكة (Network Operations Centers – NOC) تدفقا هائلا من الإنذارات الصادرة عن أنظمة المراقبة المختلفة، وعلى الرغم من الأهمية البالغة لهذه التنبيهات في الكشف عن الأعطال، إلا أن الواقع العملي يشير إلى أن التحدي الأساسي لم يعد في رصد الخلل بقدر ما يكمن في تفسيره بدقة [1]، خاصة في ظل الكم الكبير من الإنذارات المتداخلة والمتكررة، والتي تفتقر في كثير من الأحيان إلى توصيف واضح للسبب الجذري أو الإجراء التصحيحي الفوري، وقد أدى هذا التضخم الرقمي في رسائل الموردين (Vendors) إلى زيادة العبء المعرفي على فرق التشغيل، مما يستلزم وقتا وجهدا كبيرين في عمليات البحث والتحليل اليدوي مما قد يترتب عليه تأخير في معالجة الأعطال الحرجة [2].

وانطلاقا من هذا الإطار، يهدف هذا المشروع إلى تقديم حل هندسي مقترح لتشخيص أعطال شبكات الجيل الرابع (Long Term Evolution – LTE) من خلال بناء منظومة ذكية تشكل طبقة ربط وظيفية بين البيانات الخام والمعرفة التطبيقية؛ ويعتمد النظام المقترح على توظيف وكيل ذكاء اصطناعي (AI Agent) مدعوم بقاعدة معرفة موثوقة وآلية استرجاع معلومات دقيقة (Retrieval-Augmented Generation – RAG). ويتمثل الهدف النهائي في تحويل إدارة الأعطال من عملية يدوية تفاعلية بطيئة إلى استجابة ذكية قائمة على الفهم والتفسير، بما يسهم في تقليل زمن الإصلاح وتحسين جودة تجربة المستخدم في بيئة اتصالات التي تتسم بالاستمرارية والتعقيد المتزايد.

2.1 مشكلة البحث

على الرغم من التطور الكبير في أنظمة مراقبة الشبكات وقدرتها العالية على رصد الأعطال لحظيا، إلا أن عملية التشخيص الفني ما تزال تعتمد بدرجة كبيرة على الخبرة البشرية والتحليل اليدوي المجهد، وتتمثل المشكلة الجوهرية في وجود فجوة معرفية وسياقية بين الإنذار بوصفه رسالة نصية خام، وبين التشخيص بوصفه معرفة تقنية قابلة للتنفيذ؛ ففي

بيئة تشغيلية معقدة مثل شبكات الجيل الرابع (LTE) غالبا ما تكون رسائل الإنذار مختصرة أو غامضة، وتفتقر إلى الربط المباشر بالسبب الجذري للعطل لا سيما في ظل تباين صيغ هذه الرسائل بين الموردين، وغياب توصيف موحّد للأعطال ضمن الأدلة المرجعية الخاصة بأنظمة المراقبة.

ويؤدي هذا الاعتماد المفرط على ذاكرة المهندس بدلا من قاعدة معرفة منهجية إلى سلسلة من التحديات التشغيلية الحرجة، إذ يترتب عليه ارتفاع العبء المعرفي الواقع على الكوادر الفنية، وربط سرعة الاستجابة التشغيلية بمدى توفر الخبرة الفردية وتراكمها، مما ينعكس سلبا على اتساق القرارات التشغيلية ويؤدي إلى تباين في جودة التشخيص وإطالة زمن الإصلاح (Mean Time To Repair – MTTR) [1]. علاوة على ذلك، فإن غياب آلية ذكية قادرة على تفسير رسائل الإنذار وتحويلها إلى مفاهيم هندسية موثقة ومستندة إلى المعايير العالمية، يحدّ من إمكانية توثيق الخبرات المتراكمة ويجعلها عرضة للضياع عند تغير الكوادر أو انتقال الخبرات.

وانطلاقا من ذلك، تتمثل مشكلة هذا البحث في غياب نظام استدلالي ذكي قادر على تجاوز حدود المطابقة النصية التقليدية، من خلال الجمع بين دقة الأنظمة الخبيرة ومرونة النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs)، إذ يواجه المجال التشغيلي فجوة واضحة في تحويل البيانات التشغيلية إلى رؤى تشخيصية قابلة للتطبيق، نتيجة افتقاره إلى وكيل ذكي (Agentic AI) يمتلك القدرة على فهم السياق التقني للإنذارات، وتحليلها بصورة منهجية، وتقديم توصيات تشغيلية مفسرة وموثقة، ويؤدي هذا القصور إلى بطء أو عدم دقة التشخيص اليدوي التقليدي مما ينعكس مباشرة على استقرار الخدمة وجودة تجربة المستخدم.

3.1 أهمية المشروع

تستمد هذه الدراسة أهميتها من كونها تمثل استجابة تقنية وعملية لفجوة تشغيلية في قطاع الاتصالات، تتمثل في محدودية الانتقال من مرحلة الرصد اللحظي للأعطال إلى مرحلة الرؤى التشخيصية القائمة على الفهم والتحليل، وتتجسد القيمة العلمية والتطبيقية للمشروع في أربعة محاور رئيسية:

- تحويل المعرفة الضمنية إلى معرفة تقنية موثقة: يسعى المشروع إلى تجميع وتوثيق خبرات المهندسين المشتتة وأدلة الموردين ضمن قاعدة معرفة مهيكلة وقابلة للتوسع، مما يحول التشخيص من عملية تعتمد على ذاكرة الأفراد والخبرة الشخصية إلى عملية مؤسسية مستدامة.

- تعزيز الشفافية والتشخيص المفسر: بخلاف الأنظمة المغلقة، يركز هذا النظام على قابلية التفسير؛ حيث لا يقدم نتائج تشخيصية مجردة، بل يربط كل قرار تشخيصي بمفاهيم هندسية وفئات فنية موثقة، مما يعزز ثقة مهندس التشغيل في النتائج المستخرجة.
- التحكم التشغيلي المحلي في البيانات وحماية الخصوصية: من خلال توظيف النماذج اللغوية المحلية (On-Device LLMs)، يقدم المشروع نموذجا آمنا لبيئات الاتصالات الحساسة، حيث تتم معالجة البيانات واستنتاج الحلول دون الحاجة لإرسال معلومات الشبكة إلى السحابة، مما يضمن أمن المعلومات وسرعة الاستجابة.
- بناء نظام ذكي متطور: لا يقتصر النظام عند حدود البرمجة، بل يتطور عبر حلقة تغذية راجعة (Feedback Loop) تسمح باستيعاب خبرات المهندسين وتخزينها في ملف التعلم، مما يقلل من ظواهر الهلوسة الرقمية ويزيد من دقة النظام بمرور الوقت.

4.1 أهداف المشروع

يهدف هذا المشروع بشكل رئيسي إلى تصميم وتطوير منصة تشخيص ذكية قادرة على تحليل إنذارات شبكات الجيل الرابع (LTE) بصورة شبه آلية، من خلال الجمع بين دقة الأنظمة الخبيرة ومرونة تقنيات الذكاء الاصطناعي التوليدي، ولتحقيق هذا الهدف، يسعى المشروع إلى إنجاز المهام التالية:

1. هيكلة المعرفة الهندسية: بناء قاعدة معرفة متكاملة تربط الإنذارات التشغيلية الخام بمفاهيمها التقنية وأسبابها الجذرية وإجراءاتها التصحيحية وفق توصيف تقني قابل التحديث.
2. تطوير وكيل استدلالي هجين: تصميم وكيل تشخيص (Diagnosis Agent) يعتمد على خوارزميات TF-IDF للمطابقة الدقيقة، مع القدرة على الانتقال الذكي لاستخدام النماذج اللغوية (Gemma) في الحالات المعقدة أو الغامضة.
3. ضبط السلوك الاستنتاجي: ضمان تقديم نتائج التشخيص بصيغة مهيكلة ومنظمة تدعم غرض اتخاذ القرار الفني السريع.
4. التحقق والتقييم: بناء واجهة مستخدم تفاعلية تسمح للخبراء بتقييم مخرجات النظام وتغذيتها بالآراء الفنية لضمان مطابقتها للواقع التشغيلي.

5.1 منهجية المشروع

يعتمد المشروع على منهجية التطوير التطبيقية، والتي تهدف إلى بناء نظام هجين يجمع بين القواعد المعرفية وتقنيات الذكاء الاصطناعي. وتتمثل خطوات العمل في المسارات التالية:

- أولا: مرحلة حصر وبناء المعرفة

البدء بجمع البيانات التقنية من المراجع المعيارية المعتمدة مثل 3GPP وأدلة الموردين، ثم تنظيمها ضمن قاعدة معرفة مركزية لضمان دقة وموثوقية عملية التشخيص.

- ثانيا: مرحلة التصميم الهندسي للنظام

بناء معمارية برمجية متعددة الطبقات، تبدأ من استقبال البيانات الخام وتوحيدها، مرورا بمحرك استدلالي ذكي يدمج بين التحليل الإحصائي والفهم السياقي للنصوص، وصولا إلى واجهة تفاعلية للمستخدم.

- ثالثا: اختيار الأدوات والتقنيات

اختيار الأدوات والتقنيات بما يتوافق مع متطلبات بناء النظام الهجين، حيث تُستخدم أدوات معالجة النصوص والتحليل الإحصائي، إلى جانب نماذج لغوية كبيرة تعمل محليا، لدعم تنفيذ مراحل التشخيص المختلفة.

- رابعا: مرحلة التحقق والتطوير المستمر

تقييم الخبراء لنتائج النظام، وتصميم آلية تسمح للنظام بـ "التعلم" من التغذية الراجعة البشرية، مما يضمن تحسن دقة الاستنتاجات بمرور الوقت.

6.1 الدراسات السابقة

تم تصنيف الدراسات السابقة ضمن ثلاث محاور رئيسية مرتبط مباشرة بفكرة المشروع.

أولا: تطور تقنيات كشف الأعطال في الشبكات

أجرى Edozie وآخرون [1] مراجعة منهجية شملت أكثر من (160) دراسة بحثية بهدف تحليل أحدث تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في كشف الشذوذ والأعطال داخل شبكات الاتصالات؛ وقد بيّنت المراجعة أن الأساليب التقليدية

المعتمدة على النماذج الخطية والقواعد الإحصائية تعجز عن التعامل مع البيانات الشبكية الضخمة وسريعة التدفّق، ولا تستطيع رصد الأعطال الدقيقة أو الديناميكية.

استعرض الباحثون تفوق نماذج التعلم العميق مثل LSTM و Autoencoders في تعلم الأنماط المعقدة، مؤكدين على أهمية دمج المعرفة بالمجال لتعزيز موثوقية التنبؤ وتقليل الأعطال، وهو ما يعزز الحاجة للانتقال من الطرق التقليدية إلى الذكاء الاصطناعي كوسيلة فعّالة لمعالجة تحديات كشف الأعطال في شبكات الاتصالات المتطورة.

اختبر Cerdà-Alabern وآخرون [4] فعالية خوارزميات التعلّم غير الخاضع للإشراف في كشف أعطال الشبكات اللاسلكية، بالاعتماد على دمج مؤشرات الحركة المرورية مع مؤشرات استهلاك موارد النظام مثل وحدة المعالجة والذاكرة. وقارنت الدراسة أداء عدد من الخوارزميات الإحصائية والتوليدية حيث توضح النتائج أهمية تقنيات تفسير النماذج في تحليل مسببات الأعطال والاتجاه نحو توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحليل أعطال الشبكات المعقّدة. فتعد فكرة المشروع امتداد لهذا التوجه من خلال تجاوز محدودية الدراسة السابقة التي ركزت على سيناريو عطل واحد، عبر تصميم نظام قادر على تحليل وتشخيص مجموعة متعددة من الأعطال التشغيلية باستخدام نماذج لغوية توليدية (LLMs).

ثانيا: أنظمة المعرفة والاسترجاع المعزز

قدّم Koudouridis وآخرون [5] تحليلا لأساليب تمثيل المعرفة في قطاع الاتصالات، تناول دور الأنظمة المعتمدة على المعرفة في تعزيز كفاءة الشبكات وذكائها وقدرتها على التكيّف مع التعقيد المتزايد. واعتمدت الدراسة إطارا تصنيفيا يربط تقنيات تمثيل المعرفة بآليات الاستدلال وحالات الاستخدام المختلفة، كما قيّمت هذه المناهج وفق معايير شملت الدقة، وقابلية الشرح، وقابلية التوسّع. أكدت الدراسة أن دمج المعرفة التشغيلية مع تقنيات التعلم والاستدلال يمكّن الشبكات من تحويل البيانات إلى رؤى عملية تدعم اتخاذ القرار، وتحسين الأداء في الزمن الحقيقي، وتقليل التكاليف التشغيلية، والكشف المبكر عن الأعطال والشذوذات قبل تأثيرها على الخدم؛ مما يدعم فكرة أهمية قاعدة المعرفة في رفع موثوقية الشبكات وتعزيز قدرة الأنظمة الذكية على تفسير الأعطال وفهم أسبابها، بما يتوافق مع هدف المشروع في تصميم نظام تشخيصي يعتمد على بنية معرفية قابلة للتوسّع وقابلة للتفسير.

قدّم Huang وآخرون [6] دراسة تجريبية تناولت دمج تقنية الاسترجاع المعزّز بالتوليد (RAG) مع نماذج اللغة الكبيرة لتحسين استرجاع وتحليل المحتوى الفني المعقّد ضمن مواصفات 3GPP. وطوّر الباحثون إطارا متخصصا(Chat3GPP) يجمع بين الاسترجاع التقليدي والدلالي مع آليات للحفاظ على السياق، ما مكّنه من التعامل بكفاءة مع الوثائق الطويلة والمعقّدة.

وتكمن أهمية هذه الدراسة للمشروع الحالي في تأكيدها جدوى توظيف نماذج لغوية مدعومة بآليات استرجاع معرفي دقيق لفهم الوثائق التقنية المعقّدة، وهو ما يدعم فكرة بناء نظام ذكي قادر على تفسير الأعطال وتحليل أسبابها بالاعتماد على معايير ومواصفات شبكات الاتصالات.

ثالثا: الأنظمة الهجينة والتوجهات المستقبلية

تناولت دراسة Vitui وChen [2] استراتيجيات دمج النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs) ضمن منظومات إدارة العمليات الذكية لمعالجة أوجه القصور في الأنظمة التقليدية. واقترح الباحثان إطارا هجينا يجمع بين كفاءة النماذج التنبؤية الإحصائية والقدرات التفسيرية المتقدمة للذكاء الاصطناعي التوليدي، بما يتيح تحليل البيانات غير المهيكلة بكفاءة، خاصة سجلات النظام (Logs).

وتشكل هذه الدراسة الأساس النظري للمعمارية المعتمدة في المشروع، إذ تبرّر دمج الخوارزميات القائمة على التمثيل الإحصائي مثل TF-IDF مع النماذج اللغوية المتقدمة مثل Gemma، لتحقيق توازن بين سرعة المعالجة وعمق الفهم السياقي.

قدّم Zhang وآخرون [3] مسحا شاملا وتحليلا نقديا لعدد (183) دراسة حديثة تناولت توظيف النماذج اللغوية الكبيرة في تطبيقات إدارة العمليات الذكية AIOps، وركّزت الدراسة على التحديات الأساسية المرتبطة بهذه النماذج لتخلص إلى أن المعماريات الهجينة التي تدمج الاسترجاع المعزّز بالتوليد (RAG) مع الوكلاء الأذكياء (Agents) تمثل النهج الأكثر فاعلية للحد من ظاهرة الهلوسة وسد فجوة المعرفة التخصصية.

تدعم نتائج هذا المسح صحة التوجه المنهجي للمشروع، إذ يتوافق الهيكل الهندسي للنظام المقترح بشكل مباشر مع هذه التوصيات، معتمدا على التكامل بين الاسترجاع المعرفي والقدرات التوليدية لتحقيق تشخيص دقيق ومستويات عالية من الموثوقية التشغيلية.

7.1 هيكلية المشروع

لأجل تقديم عرض متسلسل ومنطقي للمشروع، تم تنظيم المشروع على النحو التالي:

- **الفصل الأول (المقدمة):** يعرض الخلفية العامة لمجال شبكات LTE وتحديات التشخيص، ويحدد مشكلة البحث وأهمية المشروع وأهدافه ومنهجيته وهيكل المشروع.

- **الفصل الثاني:** يقدم الإطار التقني لشبكات LTE ومفاهيم جودة الخدمة ومؤشرات الأداء وأنظمة المراقبة وتصنيف الأعطال.
- **الفصل الثالث:** يعرض الأسس النظرية للأنظمة الخبيرة والنماذج اللغوية وتقنيات الاسترجاع المعزز بالمعرفة (RAG) والوكلاء (Agents) ودور قاعدة المعرفة في التشخيص.
- **الفصل الرابع:** يشرح التصميم المقترح للنظام وبنيته متعددة الطبقات وتدفق البيانات ووكلاء التشخيص والواجهة، مع توضيح دور خوارزمية TF–IDF والنموذج المحلي وطبقة التغذية الراجعة.
- **الفصل الخامس:** يعرض نتائج تطبيق النظام المقترح على بيانات الشبكة، مع تحليل مخرجات التشخيص، وتقييم أداء النظام في اكتشاف الأعطال.
- **الفصل السادس:** يقدّم الاستنتاجات العامة المستخلصة من نتائج النظام، ويعرض التوصيات المقترحة لتحسينه وتطويره.

الفصـل الثانـي

الخلفية التقنية والتشغيلية لشبكات الجيل الرابع (LTE)

1.2 المقدمة

تُعد شبكات الاتصالات الحديثة أنظمة تقنية معقدة تتكوّن من طبقات متعددة وعناصر تشغيلية متداخلة، مما يجعل فهم بنيتها المعمارية أساسا لتقييم أدائها وتحليل جودة الخدمة المقدَّمة للمستخدمين؛ وقد أثبتت شبكات التطور طويل الأمد (LTE)، بما تتضمنه من موارد راديوية متقدمة وبنية مبسّطة تعتمد على بروتوكولات الإنترنت أنها تمثل نقلة في طريقة تصميم وتشغيل الشبكات اللاسلكية [7].

ومع تزايد الاعتماد على هذه الشبكات في تقديم خدمات البيانات والصوت، أصبحت جودة الخدمة (Quality of Service-QoS) ومؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs) أدوات لا غنى عنها لقياس استقرار الشبكة وقدرتها على تلبية متطلبات المستخدم؛ كما باتت عمليات رصد الأعطال وتصنيفها جزءا جوهريا من منظومات التشغيل، نظرا لدورها في الحفاظ على جاهزية البنية التحتية وتقليل زمن الانقطاع.

وانطلاقا من ذلك، يقدم هذا الفصل الأساس التقني لفهم مكوّنات شبكات LTE، والتقنيات التمكينية المستخدمة فيها، والمفاهيم المتعلقة بجودة الخدمة ومؤشرات الأداء، إضافة إلى التصنيف المعياري للأعطال وآليات مراقبتها داخل شركات الاتصالات، ويهدف هذا الفصل إلى ترسيخ الأسس النظرية التي تُستخدم لاحقا في تفسير الظواهر التشغيلية وفهم العوامل المؤثرة في استقرار الشبكة.

2.2 شبكات الجيل الرابع (Long Term Evolution - LTE)

بدأ تطور قطاع الاتصالات اللاسلكية بتقنية الجيل الأول (1G) القائمة على الإشارات التناظرية لنقل الصوت، مرورا بالجيل الثاني (2G) الذي أتاح الخدمات الرقمية الأساسية، ليتطور بعدها إلى الجيل الثالث (3G) الذي مكّن من نقل البيانات وخدمات الإنترنت، ثم جاء الجيل الرابع (4G) ليمثّل نقلة نوعية في معايير الاتصال وأداء الشبكات، وصولا إلى الجيل الخامس (5G) الذي قدم سرعات فائقة واعتمادية عالية، مع زمن استجابة منخفض مكّن من دعم التطبيقات الحرجة والاتصالات واسعة النطاق.

اعتمد الجيل الرابع على تقنية التطور طويل الأمد (Long Term Evolution - LTE)، التي ظهرت لأول مرة ضمن حزمة المواصفات القياسية الثامنة لمنظمة 3GPP المعروفة بـ (3GPP Release8)، ومثلت تحولا في بنية شبكات الاتصالات اللاسلكية من نظام مبدل الدارات (Circuit-Switched) إلى نظام يعتمد كليا على بروتوكول الإنترنت-All)

(IP System، وقد مكّن هذا التحول مدعوما بتقنيات مثل OFDMA وMIMO من تحقيق معدلات بيانات نظرية تصل إلى بين 200 ميجابيت\ثانية و1 جيجابيت\ثانية في حالات الحركة المنخفضة [8].

تعمل شبكات LTE باستخدام عرض نطاق للقناة (Channel Bandwidth) يتراوح بين 1.4 ميغاهيرتز و20 ميغاهيرتز، وفي وقت لاحق، تم التوصية بتقنية LTE-Advanced في الإصدار العاشر (Release10) لتعزيز قدرات الشبكة، حيث يمكنها الوصول إلى عرض طيف يصل إلى 100 ميجاهرتز لتقديم أداء أفضل [7].

الدوافع والأسس التاريخية لظهور LTE

نشأت تقنية LTE استجابة لتحديات رئيسية لم تستطع الأجيال السابقة مواجهتها، وهي [8]:

1. القصور في تلبية متطلبات عرض النطاق الترددي: لم يعد الجيل الثالث (3G) قادرا على تلبية الزيادة الهائلة في الطلب على البيانات، مما استدعى تطوير تقنية توفر معدلات بيانات أعلى بكثير.
2. تحويل الشبكة إلى (All-IP): كان الهدف الأساسي هو إعادة تصميم شبكة الوصول اللاسلكي بشكل كامل لتصبح نظاما مُحسنا ومُحولا بالكامل إلى حزم (Packet-Switched Optimized System) يعتمد كليا على بروتوكول الإنترنت (IP)، مما يقلل زمن التأخير ويزيد الكفاءة.
3. تحسين جودة الخدمة (QoS): ضرورة دعم تطبيقات الوقت الفعلي مثل VoIP (الصوت عبر بروتوكول الإنترنت) وخدمات الفيديو، مع الالتزام بمتطلبات جودة الخدمة الصارمة.

1.2.2 البنية المعمارية والتقنيات التمكينية للجيل الرابع LTE

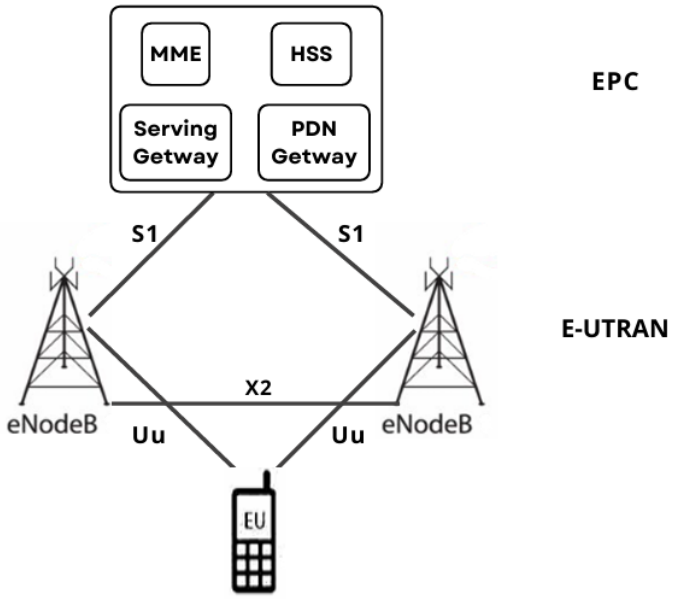
البنية المعمارية لشبكة LTE

اعتمدت تقنية LTE على بنية شبكية مبسطة ومسطحة كما في الشكل (2−1) تهدف إلى زيادة كفاءة الشبكة وتقليل زمن التأخير. وتتكون هذه البنية من جزأين رئيسيين [8]:

1. شبكة الوصول الراديوي المتطورة (E-UTRAN): تمثل الجزء المسؤول عن الاتصال اللاسلكي بين المستخدمين والشبكة، وتتألف من:

- محطات القاعدة المتطورة (eNodeB/eNB): وهي محطات القاعدة اللاسلكية في شبكة LTE، تتولى إدارة الموارد الراديوية وجدولة المستخدمين والتحكم بالاتصالات دون الحاجة إلى وحدة تحكم مركزية (RNC) كما في شبكات الجيل الثالث، مما يقلل من تعقيد الشبكة وزمن التأخير.
- معدات المستخدم (User Equipment - UE): وهي الأجهزة الطرفية التي يستخدمها المشترك للوصول إلى الشبكة، مثل الهواتف الذكية والأجهزة اللوحية ووحدات المودم.

2. الشبكة الأساسية للحزم المتطورة (Evolved Packet Core - EPC): تمثل القلب النابض للشبكة، وتدير حركة البيانات وخدمات المستخدم.



الشكل(2−1): بنية شبكة LTE

2.2.2 التقنيات التمكينية للجيل الرابع LTE

اعتمدت تقنية LTE على مجموعة من التقنيات الراديوية الحديثة التي شكّلت الأساس لرفع كفاءة الشبكة وتحسين سعتها. ومن أبرز هذه التقنيات [7]:

1. الوصول المتعدد بتقسيم الترددات المتعامدة (OFDMA): تُعد التقنية الأساسية في قناة الهبوط (Downlink)، وتعتمد على تقسيم الطيف الترددي إلى كتل موارد فيزيائية (Physical Resource Blocks - PRB)، تُخصص

ديناميكيا للمستخدمين وفقا لظروف القناة؛ توفر OFDMA كفاءة عالية في استخدام الطيف وقدرة مميزة على مقاومة التلاشي الانتقائي للترددات.

2. الوصول المتعدد بتقسيم الترددات أحادي الناقل (SC-FDMA): تُستخدم في قناة الصعود (Uplink) وتتميز بانخفاض نسبة الذروة إلى المتوسط في القدرة، مما يجعلها أكثر ملاءمة لاستهلاك الطاقة في أجهزة المستخدم.

3. تقنية المدخلات والمخرجات المتعددة (MIMO): تتيح استخدام أكثر من هوائي للإرسال والاستقبال، بما يرفع معدل نقل البيانات وسعة القناة دون الحاجة إلى موارد ترددية إضافية، وذلك من خلال الاستفادة من التنوع المكاني (Spatial Multiplexing).

4. الأداء ومعدلات البيانات: وفرت تقنيات الجيل الرابع (LTE/LTE-A) معدلات بيانات نظرية عالية تتراوح بين 200 ميجابت\ثانية و1 جيجابت\ثانية في ظروف الحركة المنخفضة، حيث جاء تطوير LTE-Advanced ليعزز هذه القدرات ويحقق متطلبات معايير الجيل الرابع من خلال الوصول إلى السعات العليا لهذا النطاق.

ورغم ما توفره تقنيات OFDMA وMIMO من قدرات متقدّمة لزيادة السعة وتعزيز معدلات النقل، فإن التحدي الجوهري يتمثل في ضمان ترجمة هذه القدرات إلى أداء مستقر وملموس لدى المستخدم النهائي، وهنا تبرز أهمية مفهوم جودة الخدمة (QoS) ومؤشرات قياسها بوصفها الأداة الرئيسة لتقييم مدى تحقق هذا الأداء على أرض الواقع.

3.2 جودة الخدمة QoS ومؤشرات الأداء الرئيسية KPIs

1.3.2 جودة الخدمة (Quality of Service - QoS)

تُعد جودة الخدمة (QoS) أحد المفاهيم المحورية في تقييم أداء شبكات الاتصالات الحديثة، إذ تمثل مقياسا شاملا لجودة التجربة التي يتلقاها المستخدم النهائي، تُعرَّف جودة الخدمة وفقا للتوصية الدولية ITU-T Recommendation E.800 (2008) بأنها مجموعة الخصائص الكلية لخدمة الاتصالات التي تؤثر في قدرتها على تلبية الاحتياجات المعلنة والضمنية لمستخدم الخدمة [9]. وتتكون جودة الخدمة من عنصرين رئيسيين [9]:

- أداء الشبكة (Network Performance): ويشمل مقاييس مثل معدل الخطأ في البت (BER)، وزمن التأخير، وعدم استقرار الإشارة، وغيرها من العوامل التقنية التي تحدد كفاءة البنية التحتية.

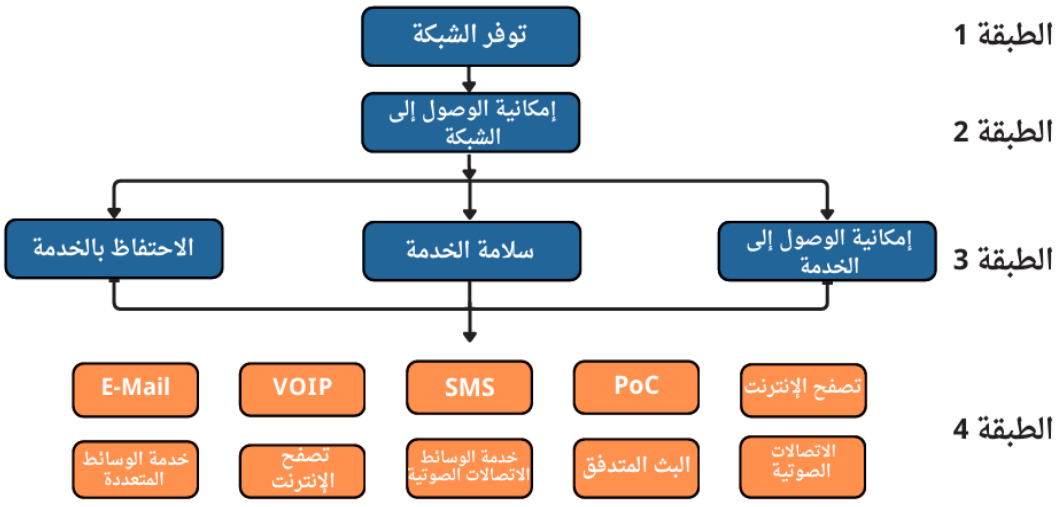
- الأداء غير المرتبط بالشبكة (Non-Network Performance): ويشمل مؤشرات مثل زمن توفير الخدمة، وزمن الإصلاح، ونطاق التعرفة، وزمن معالجة الشكاوى.

وتختلف معايير جودة الخدمة الخاصة بكل نوع من الخدمات باختلاف طبيعة الخدمة المقدّمة، كما يمكن أن تتباين أهميتها بين شرائح المستخدمين المختلفة وفق احتياجاتهم وأولوياتهم.

2.3.2 مؤشرات الأداء الرئيسية (Key Performance Indicators – KPIs)

تُعرف مؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs) في شبكات الاتصالات بأنها مقاييس كمية معيارية تستخدم لتقييم أداء الشبكة اللاسلكية (E-UTRAN) عبر مجموعة من المجالات التشغيلية الرئيسية، وتمكّن هذه المؤشرات من تقييم جودة الخدمة (QoS) المقدَّمة للمستخدمين من خلال قياس مدى تحقيق الشبكة لأهدافها الفنية عبر خصائص جودة الخدمة الرئيسية التي تشمل: إمكانية الوصول (Accessibility)، والاستمرارية (Retainability)، والتوافر (Availability)، وسلامة الخدمة (Integrity)، والتنقّل (Mobility)، وتُشتق مؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs) من عدادات أداء الشبكة (Network Counters)، والتي تُعدّ أداة أساسية في تحليل الأداء التشغيلي لشبكات الاتصالات، إذ تتيح تقييم الكفاءة والموثوقية والفاعلية التشغيلية لعناصر النظام، إلى جانب مقارنة مستويات الأداء عبر الفترات الزمنية والمواقع المختلفة ضمن منظومة LTE.

يعرض الشكل (2–2) نموذج ITU لجودة الخدمة لشبكات الاتصالات، حيث قُسّمت مؤشرات الأداء إلى أربع طبقات مترابطة، بدءً من توفر الشبكة كطبقة للبنية التحتية، مرورا بـ إمكانية الوصول إلى الشبكة كمتطلب تشغيلي، وصولا إلى طبقة خصائص الخدمة (الوصول، السلامة، والاستمرارية)، وانتهاءً بطبقة منظور المستخدم النهائي للخدمات الإلكترونية [10].



الشكل (2–2): نموذج ITU لجودة الخدمة لشبكات الاتصالات

إن الخصائص الأكثر ارتباطا باستقرار الشبكة هي: التوفر (Availability)، وإمكانية الوصول (Accessibility)، والاستمرارية (Retainability)، وتكتسب هذه الخصائص أهمية خاصة لكونها تعكس بشكل مباشر جاهزية الشبكة واستمرارية أدائها، وتشكل الأساس الذي تعتمد عليه جميع الخدمات اللاحقة، كما أن المؤشرات المرتبطة بها مثل SDR وCSSR تُعد الأكثر تمثيلا لتجربة المستخدم النهائية، وتوفر قياسا عمليا ودقيقا لجودة الخدمة الأساسية.

1. خاصية التوفر (Availability Characteristic)

يُعرف التوفر بأنه مقياس يعبر عن نسبة الزمن التي تكون خلالها الشبكة قادرة على تقديم الخدمة في أي لحظة، ويُعد هذا المقياس أحد أهم خصائص جودة الخدمة (QoS)، إذ يعكس مستوى جاهزية عناصر الشبكة وقدرتها على العمل المستمر دون انقطاع، ويقاس هذا الجانب بالاعتماد على مجموعة من مؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs)، ومن أبرزها مؤشر توفر الخلية (Cell Availability).

مؤشر توفر الخلية هو مؤشر أداء رئيسي KPI يوضّح النسبة الزمنية التي تكون فيها الخلية في حالة "متاحة " خلال فترة القياس المحددة، ويقاس هذا التوافر بناء على قدرة محطة القاعدة (eNodeB) على تقديم خدمة E-RAB داخل الخلية، إذ تُعد الخلية متاحة فقط عندما تكون قادرة فعليا على تخصيص موارد الاتصال لخدمة المستخدمين [11].
ويعبر عنه بالعلاقة الرياضية العامة التالية:

$$\text{التوفر} = \frac{\text{الوقت الذي تكون فيه الخلية متاحة}}{\text{زمن القياس}} \times 100\% \quad (2-1)$$

2. خاصية إمكانية الوصول (Accessibility Characteristic)

تُعرَّف إمكانية الوصول بأنها خاصية تُمكّن مزود الخدمة من تقييم مدى قدرة المشترك على النفاذ إلى خدمات الشبكة المتنقلة بنجاح، وتُعد هذه الخاصية من أهم مكونات جودة الخدمة (Qos)، إذ تقيس سهولة بدء الاتصال أو إنشاء الجلسات داخل بيئة الشبكة.

معدل نجاح إعداد المكالمة (Call Setup Success Rate − CSSR)، ويشار إليه أيضا بمعدل نجاح تهيئة الجلسة (Session Setup Success Rate − SSSR) أحد أبرز مؤشرات إمكانية الوصول، نظرا لدوره المباشر في قياس قدرة النظام على تمكين المستخدم من بدء الاتصال بنجاح، ويُعرَّف CSSR بأنه النسبة بين عدد محاولات إعداد المكالمة (أو الجلسة) التي اكتملت بنجاح، وبين إجمالي محاولات الإعداد خلال فترة القياس المحددة، مما

يجعله من أهم المقاييس التي تعكس تجربة المستخدم الفعلية في مرحلة النفاذ إلى الخدمة لأنه يعبر بصورة دقيقة عن مدى قدرة الشبكة على اجتياز مراحل الإعداد المختلفة دون فشل. ويُعبَّر عنه رياضيا بالعلاقة العامة التالية:

$$\text{معدل نجاح إعداد الجلسات(CSSR)} = \frac{\text{عدد إعدادات الجلسات الناجحة}}{\text{عدد إعداد محاولات الجلسات}} \times 100\% \quad (2-2)$$

3. خاصية الاستمرارية (Retainability Characteristic)

تعرف الاستمرارية بأنها مقياس يعكس قدرة الشبكة على الحفاظ على استمرارية الخدمة أثناء الاستخدام دون انقطاع أو سقوط للجلسات، ويُعدّ معدل انقطاع الخدمة (Service Drop Rate – SDR) من أبرز المؤشرات التشغيلية المرتبطة بهذه الخاصية، إذ يعبر عن النسبة المئوية للجلسات أو المكالمات التي انتهت بشكل غير طبيعي مقارنة بإجمالي الجلسات التي تم إعدادها بنجاح خلال فترة القياس المحددة، وتنبع أهمية SDR من كونه يقيس قدرة الشبكة على الإبقاء على قناة النفاذ الراديوية مستقرة طوال فترة الجلسة النشطة، مما يوفر تقييما مباشرا لموثوقية الشبكة واستقرارها في الحفاظ على الاتصال دون انقطاع. وفي سياق الخدمات الصوتية، يُستخدم معدل سقوط المكالمات – Call Drop Rate) (CDR باعتباره مؤشرا فرعيا ضمن إطار SDR لقياس حالات الانقطاع الخاصة بالمكالمات الصوتية.

ويُعبَّر عن معدل SDR رياضيا بالعلاقة العامة التالية:

$$\text{معدل سقوط الجلسات (SDR)} = \frac{\text{عدد حالات إنهاء الجلسات غير الطبيعية}}{\text{إجمالي حالات إنهاء eRAB}} \times 100\% \quad (3-2)$$

4.2 التصنيف المعياري للتنبيهات والأعطال الفنية

وفقا للمواصفة 3GPP TS 32.111-2، يتم تعريف أنواع التنبيهات ضمن خمس فئات قياسية تستند في تعريفها الأصلي إلى التوصية الدولية ITU-TX.733، وهي: تنبيهات الاتصالات (Communications)، وتنبيهات المعدات (Equipment)، والتنبيهات البيئية (Environmental)، وتنبيهات أخطاء المعالجة (Processing Error)، وتنبيهات جودة الخدمة(QoS). وتُستخدم هذه الفئات كأساس معياري لتصنيف الأعطال الفنية في أنظمة إدارة الشبكات (OSS). وفيما يلي الفئات الخمس مع تعريفاتها والأمثلة عليها كما وردت في ملحق المرجع [12]:

1. تنبيهات الاتصالات: تشير إلى حدوث خلل في العمليات أو الإجراءات المسؤولة عن نقل المعلومات بين نقطتين ضمن المنظومة. ومن أمثلتها: فقدان الإشارة، وخطأ في بروتوكول الاتصالات.

2. تنبيهات جودة الخدمة: تُعبّر عن تدهور ملحوظ في مستوى جودة الخدمة المقدمة للمستخدم نتيجة عوامل مثل زيادة الحمل أو انخفاض الموارد. ومن أمثلتها: انخفاض عرض النطاق، وحدوث اختناق في الشبكة.
3. تنبيهات أخطاء المعالجة: تشير إلى حدوث خلل في البرمجيات أو في عمليات المعالجة داخل النظام، بما في ذلك الأخطاء التنفيذية ومشكلات الذاكرة والبيانات. ومن أمثلتها مشكلة في سعة التخزين، وخطأ في البرنامج.
4. تنبيهات المعدات: ترتبط بوجود عطل أو فشل في أحد مكونات العتاد المادي داخل النظام. ومن أمثلتها مشكلة في الطاقة، وفشل المستقبل.
5. التنبيهات البيئية: ناتجة عن ظروف بيئية أو فيزيائية غير طبيعية داخل الحاوية (Enclosure) التي توجد فيها المعدات، وقد تؤثر مباشرة في سلامة التشغيل. ومن أمثلتها :درجة حرارة غير مقبولة، واكتشاف حريق.

وبعد تحديد وتصنيف أنواع الأعطال المحتملة معياريا، تأتي الحاجة إلى أدوات تقنية قادرة على رصد هذه التنبيهات لحظيا وإدارتها، هنا يبرز دور أنظمة مراقبة الأعطال كعصب حيوي داخل مراكز تشغيل الشبكة.

5.2 نظام مراقبة الأعطال داخل شركات الاتصالات

تعد مراقبة الأعطال إحدى الركائز الأساسية في إدارة وتشغيل شبكات الاتصالات الحديثة، إذ تمثل الإطار التشغيلي الذي يضمن استمرارية الخدمات وجودتها ضمن بيئة تقنية معقدة وسريعة التغير، ومع توسع شبكات الجيلين الرابع والخامس وتعدد مكوناتها من وحدات نقل وطاقة ومعالجة وبنية تحتية متداخلة، أصبحت مراقبة الأعطال ضرورة تشغيلية لضمان استقرار الشبكة وموثوقية الخدمة.

تعتمد شركات الاتصالات على منظومات مراقبة متكاملة تتابع حالة كل عنصر في الشبكة على مدار الساعة باستخدام بروتوكولات قياسية، وتهدف هذه الأنظمة إلى الكشف المبكر عن الأعطال وتوليد التنبيهات فور حدوث أي خلل أو تدهور في الأداء، لتشكل بذلك جزء محوري من عمليات التشغيل والصيانة داخل مراكز مراقبة الشبكات (NOC) التي تعمل ضمن منظومات دعم العمليات (Operations Support Systems – OSS).

1.5.2 المكونات التقنية لأنظمة مراقبة الأعطال

تتكون أنظمة المراقبة الحديثة من مجموعة عناصر مترابطة تعمل بتكامل لضمان الكشف السريع والدقيق للأعطال، وتشمل ما يلي [13][14]:

1. أجهزة الاستشعار: وحدات مخصصة لجمع البيانات المتعلقة بمؤشرات الأداء مثل معدل استخدام المعالج (CPU Load)، الذاكرة، النطاق الترددي أو زمن الاستجابة، وتعتمد في الغالب على بروتوكولات معيارية تتيح التواصل بين أنظمة المراقبة والأجهزة المختلفة بغض النظر عن الشركة المصنعة.
2. الوحدات الموزعة: تُستخدم لمراقبة المواقع الجغرافية المتعددة ضمن الشبكات الواسعة (WAN) حيث تجمع البيانات محليا ثم ترسلها إلى الخادم المركزي، مما يقلل من الحمل على الشبكة الأساسية ويرفع موثوقية البيانات.
3. آليات التنبيه الذكية: تتيح تفعيل التنبيهات استنادا إلى عتبات محددة مسبقا، مثل انخفاض أداء جهاز أو انقطاع الاتصال لفترة زمنية معينة، وتدعم هذه الآليات الإشعارات عبر البريد الإلكتروني أو الرسائل الفورية أو الواجهات البرمجية.
4. لوحات التحكم التحليلية: توفر رؤية شاملة في الزمن الحقيقي لأداء الشبكة من خلال خرائط تفاعلية تمثل الحالة التشغيلية للأجهزة بالألوان (أخضر للحالة الطبيعية، أحمر للعطل، أصفر للتحذير)، مما يسهل على مهندسي الشبكة تحديد موقع المشكلة بسرعة.

2.5.2 الأهمية الاستراتيجية لمراقبة الأعطال

تنبع الأهمية الاستراتيجية لأنظمة مراقبة الأعطال في شركات الاتصالات من كونها أداة أساسية لتحقيق استمرارية الخدمة وتحسين كفاءة التشغيل. ويمكن تلخيص هذه الأهمية في ثلاثة محاور رئيسية [15]:

1. الاستمرارية التشغيلية: عبر الكشف المبكر عن الأعطال في المكونات الحساسة مثل أجهزة التوجيه والمحولات ومحطات القاعدة، ما يضمن استمرار الخدمات دون انقطاع.
2. الكشف عن التهديدات التقنية والأمنية: تساعد أنظمة المراقبة على تحديد الحالات غير الطبيعية مثل الارتفاع المفاجئ في حركة المرور أو استهلاك غير مبرر للنطاق الترددي، مما يسهم في منع الهجمات أو الأعطال الأمنية المحتملة.
3. تحسين كفاءة الموارد البشرية والتقنية: بفضل الأتمتة الذكية والتنبيهات الفورية، يتم توجيه فرق الدعم الفني مباشرة إلى مصدر الخلل، مما يقلل من الجهد والوقت اللازمين للإصلاح ويرفع الكفاءة.

3.5.2 مراحل إدارة الأعطال في شبكات الاتصالات

تعتمد شركات الاتصالات منهجية متكاملة في إدارة الأعطال تتكوّن عادة من أربع مراحل مترابطة [15]:

1. الكشف: تحديد الخلل فور حدوثه من خلال المستشعرات أو أدوات المراقبة.
2. التشخيص: تحليل البيانات لتحديد موقع الخلل وسببه (عطل مادي أو خطأ في الإعدادات).
3. الاستجابة: اتخاذ الإجراء المناسب سواء بإصلاح تلقائي أو تدخل فريق الدعم الفني.
4. التوثيق والتحليل: إعداد تقرير تفصيلي يتضمن سبب العطل والإجراءات المتخذة ومدة الانقطاع لضمان التحسين المستمر.

تُستخدم هذه المراحل عادة في مراكز عمليات الشبكات (NOC) ضمن منظومات OSS لضمان التشغيل الآمن والمستقر.

4.5.2 دراسة حالة: تطبيق نظام PRTG Network Monitor

يعد نظام (Paessler Router Traffic Grapher – PRTG) من أبرز الأدوات المستخدمة عالميًا لمراقبة شبكات الاتصالات وتحليل أدائها بشكل فوري واستباقي، تشير دراسة [14] إلى أن تطبيق نظام PRTG Network Monitor في بيئة تشغيل حقيقية داخل شركة ViTrox ساهم في تحسين مؤشرات الأداء وتقليل زمن الإصلاح (Mean Time To Recovery – MTTR) بشكل ملحوظ.

أبرز نتائج الدراسة تمثلت في [14]:

1. مراقبة لحظية للأداء: من خلال مستشعرات SNMP التي تجمع بيانات المرور وسرعة الاستجابة في الزمن الحقيقي.
2. تنبيهات ديناميكية: تعتمد على الحالة التشغيلية (State Triggers) وتُرسل إشعارات فورية عند تجاوز الحدود الحرجة أو توقف الأجهزة عن العمل.
3. خرائط تفاعلية ولوحات تحليلية: تتيح تتبع الأعطال بدقة مكانية وزمنية عالية مما يسهل اتخاذ القرار السريع.

وأظهرت نتائج التطبيق انخفاض زمن اكتشاف الأعطال بنسبة تتجاوز 70%، وارتفاع معدل التوافر الشبكي من 98.7% إلى 99.93%، كما واجه الفريق تحديات في دمج أجهزة من موردين مختلفين مثل (Cisco وHuawei)، إلا أن استخدام بروتوكولات SNMPv3 ساعد في توحيد الاتصال وتأمينه.

تؤكد هذه النتائج أن أنظمة المراقبة المتكاملة، عند إعدادها وضبطها بشكل صحيح، تمثل أداة استراتيجية فعالة في تحسين موثوقية الخدمة ورفع جودة التجربة للمستخدم النهائي.

5.5.2 التحديات التشغيلية

على الرغم من الفوائد الكبيرة التي تقدمها أنظمة مراقبة الأعطال، إلا أن تنفيذها الفعلي يواجه عددا من التحديات التقنية والإدارية، أبرزها: التكامل مع بيئات متعددة الموردين بسبب اختلاف واجهات التشغيل وبروتوكولات الاتصال بين الشركات مثل (Cisco وHuawei وEricsson).

- التكاليف الأولية المرتفعة خاصة في الأنظمة التجارية التي تعتمد على ترخيص بعدد المستشعرات مثل PRTG.
- إدارة البيانات الضخمة، فإن البيانات الناتجة عن آلاف الأجهزة تتطلب أنظمة تخزين وتحليل قوية، خصوصًا عند ربطها بمنصات SIEM لتحليل أمني متقدّم.
- متطلبات الأمان: إذ يجب تأمين قنوات الاتصال بين أنظمة المراقبة والأجهزة الحساسة لحماية الشبكة من الاختراق أو التلاعب بالبيانات.

6.2 الآفاق المستقبلية والتكامل مع أنظمة الذكاء الاصطناعي

تشهد مراقبة الأعطال في قطاع الاتصالات تحولا تدريجيا من الأساليب التقليدية القائمة على المراقبة والاستجابة إلى أنظمة ذكية تعتمد على التحليل التنبؤي والذكاء التشغيلي، ويُسهم دمج تقنيات التعلّم الآلي (Machine Learning) وتحليل البيانات الضخمة في تعزيز القدرة على التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها من خلال دراسة الأنماط التاريخية لحركة الشبكة ومؤشرات الأداء.

وفي هذا السياق، تتجه أنظمة المراقبة الحديثة نحو التكامل مع نماذج الذكاء الاصطناعي التوليدية (Generative AI) كنماذج اللغة الضخمة (LLMs)، لتفسير البيانات النصية والتنبيهات الفنية بصورة آلية، وتقديم توصيات تصحيحية مبنية على المعرفة السابقة، كما تستخدم تقنيات الاسترجاع المعزّز بالتوليد (RAG) لربط نماذج الذكاء بالمصادر الداخلية للمؤسسة، مما يسمح بتوليد تحليلات دقيقة تعتمد على بيانات تشغيلية حقيقية.

ويمثل هذا التوجه الأساس الذي يقوم عليه المشروع، الذي يسعى إلى بناء نظام تحليل ذكي قادر على تفسير أعطال شبكات LTE آليا عبر وكلاء ذكاء اصطناعي (AI Agents) تتعاون فيما بينها لتقديم توصيات تصحيحية فورية.

وبذلك، لا تقتصر الآفاق المستقبلية لمراقبة الأعطال على تحسين كفاءة المراقبة فحسب، بل تمتد نحو بناء أنظمة معرفية ذاتية التعلم، قادرة على تحليل الأعطال، تفسيرها، والتوصية بمعالجتها بشكل شبه ذاتي، وهو ما يمهّد للانتقال إلى الجيل القادم من أنظمة إدارة الشبكات الذكية.

الفصـل الثالث

تقنيات الذكاء الاصطناعي

1.3 المقدمة

أدّت الزيادة المتسارعة في تعقيد شبكات الاتصالات الحديثة إلى الحاجة لأساليب تحليل وتشخيص تتجاوز قدرات الأدوات التقليدية، إذ أصبح التعامل مع الإنذارات وفهم تأثيرها على جودة الخدمة (QoS) مهمة تتطلب مستوى أعلى من الاستدلال والتعامل الذكي مع البيانات التشغيلية، وفي هذا الإطار برز الذكاء الاصطناعي التوليدي ولا سيما نماذج اللغة الكبيرة بوصفه نهجا داعما لعمليات التشغيل، من خلال تقنيات قادرة على تحليل النصوص الفنية واستخلاص العلاقة بين الأعطال ومسبباتها.

وقد أسهم التطور في النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs) وإمكانية تشغيلها محليا على الأجهزة الطرفية في جعل هذه التقنيات أكثر ملاءمة لبيئات الاتصالات التي تتطلب خصوصية وسرعة استجابة؛ كما أتاحت منهجيات الذكاء الاصطناعي الوكيلي (Agentic AI) توسيع دور هذه النماذج إلى مسارات أكثر استقلالية وتنظيما للمهام، بما يعزز كفاءتها في التعامل مع بيئات التشغيل المعقدة [16][17].

وبناء على ذلك، يستعرض هذا الفصل الأسس النظرية لمجموعة من تقنيات الذكاء الاصطناعي المرتبطة بالمعالجة اللغوية والاستدلال، ويقدّم خلفية علمية حول المبادئ التي تقوم عليها الأنظمة الخبيرة والنماذج اللغوية الكبيرة وتقنيات الاسترجاع المعزز بالمعرفة ومنهجية الوكلاء، ويهدف هذا الفصل إلى توفير الإطار المفاهيمي الذي يعتمد عليه المشروع في المراحل اللاحقة عند توظيف هذه التقنيات في تحليل البيانات التشغيلية وتشخيص أعطال شبكات LTE.

2.3 الأنظمة الخبيرة (Expert Systems)

تعد الأنظمة الخبيرة أقدم فروع الذكاء الاصطناعي، وقد تم تطويرها بهدف محاكاة طريقة تفكير الخبراء البشريين في مجالات محددة، من خلال تمثيل معرفتهم واستعمال آليات استدلال قادرة على تحليل المشكلات واقتراح الحلول، ويُعرَّف النظام الخبير بأنه نظام برمجي يمكنه تقديم نصائح ذكية أو حل مشكلات متخصصة اعتمادا على قاعدة معرفة متراكمة وتقنيات استدلال تماثل عمليات التفكير المنهجي لدى الخبير البشري؛ وتتميز هذه النظم بقدرتها على فهم المشكلة، وصياغتها، ومعالجتها، والتفاعل مع المستخدم لاقتراح الحلول المناسبة [18].

1.2.3 خصائص النظم الخبيرة

تستند الأنظمة الخبيرة إلى مجموعة خصائص رئيسية تجعلها قادرة على حل المشكلات ومن أبرزها [18]:

- الاعتماد على المعرفة المتخصصة: تُبنى النظم الخبيرة على معارف مستخلصة من خبراء بشريين، يتم تنظيمها في هيئة قواعد وحقائق قابلة للاستخدام أثناء عملية الحل.
- القدرة على الاستدلال: يستخدم النظام آليات منطقية لاستنتاج معلومات جديدة من المعارف المتوفرة ومن مدخلات المستخدم.
- التفاعل مع المستخدم: يقدم النظام الخبير تفسيرات لخطواته ويتيح للمستخدم طرح الأسئلة أو تقديم بيانات إضافية لتوجيه عملية الحل.
- العمل في مجالات ذات مشاكل متكررة: مثل التشخيص، التصنيف، التنبؤ، والتخطيط، ما يجعله مناسبا للقطاعات التي تعتمد على قرارات متسلسلة وواضحة.

2.2.3 مكونات النظام الخبير

يتكون النظام الخبير من ثلاثة عناصر أساسية تعمل بتكامل لضمان جودة الحلول [18]:

1. قاعدة المعرفة: وتشمل الحقائق والقواعد والمفاهيم الخاصة بالمجال الذي يعمل فيه النظام، تضم هذه القاعدة معارف نظرية وعملية، إضافة إلى قواعد تحدد كيفية استخدام هذه المعرفة في معالجة المشكلات.
2. محرك الاستدلال: وهو المكوّن المسؤول عن استنتاج الحلول من قاعدة المعرفة؛ يقوم بتحليل مدخلات المستخدم، ومطابقة القواعد المناسبة، واستنتاج نتائج جديدة، كما يمكنه تحديث قاعدة المعرفة وإضافة معلومات أو تعديلها بما يتوافق مع الخبرة المكتسبة.
3. واجهة المستخدم: وهي قناة التفاعل التي تسمح للمستخدم بصياغة الأسئلة، وإدخال البيانات، واستلام الإجابات والتوصيات، وتضمن هذه الواجهة سهولة الاستخدام وجعل النظام قابلا للتوظيف من قِبل فنيين أو مهندسين دون الحاجة إلى معرفة برمجية.

3.2.3 تطبيقات النظم الخبيرة في قطاع الاتصالات

للنظم الخبيرة دور مهم في دعم عمليات شبكات الاتصالات بسبب الحجم الهائل للبيانات والتعقيد التشغيلي المتزايد، وقد استخدمت بشكل واسع ضمن ثلاث مجالات رئيسية [19]:

- الصيانة: تشمل مراقبة الشبكة، معالجة تقارير الأعطال، التشخيص، وتتبع مصادر الخلل، وقد طُوّرت أنظمة خبيرة قادرة على تحليل الرسائل التشخيصية التي تُولّدها معدات الشبكة تلقائيا، واقتراح الإجراءات التصحيحية؛ كما تسهم في دعم عمليات استكشاف الأعطال وإصلاحها عبر جمع البيانات اللازمة وتوجيه الفنيين نحو المسار التشخيصي الأكثر كفاءة.

- إدارة الشبكة: ويشمل وظائف مثل إدارة حركة المرور، تخصيص الموارد، وجدولة السعات؛ وتستخدم بعض الأنظمة الخبيرة نماذج أداء ومحاكاة لاتخاذ قرارات سريعة حول كيفية إعادة توجيه الحركة عند ازدحام الشبكة أو حدوث خلل.

- التخطيط والتوسعة: وهو المجال الأكثر تعقيدا ويتعلق بالتنبؤ بالطلب على خدمات الشبكة، وتخطيط التوسعات، وتحديد الحاجة إلى تركيب معدات جديدة أو إعادة هندسة المسارات.

تعد النظم الخبيرة أولى التقنيات التي أدخلت الذكاء الاصطناعي إلى شبكات الاتصالات، حيث مثلت الأساس المنهجي لفكرة تحويل خبرة المهندس إلى قواعد قابلة للتنفيذ، ويمكن استخدام مبادئها عبر أنظمة تعتمد على تحليل البيانات وتقنيات الذكاء الاصطناعي الحديثة لتصنيف مشكلات الشبكة وتوليد التوصيات بالاعتماد على نماذج لغوية الكبيرة وطرق تعلم حديثة قادرة على التعامل مع بيانات ضخمة ومعقدة تتجاوز قدرة القواعد التقليدية.

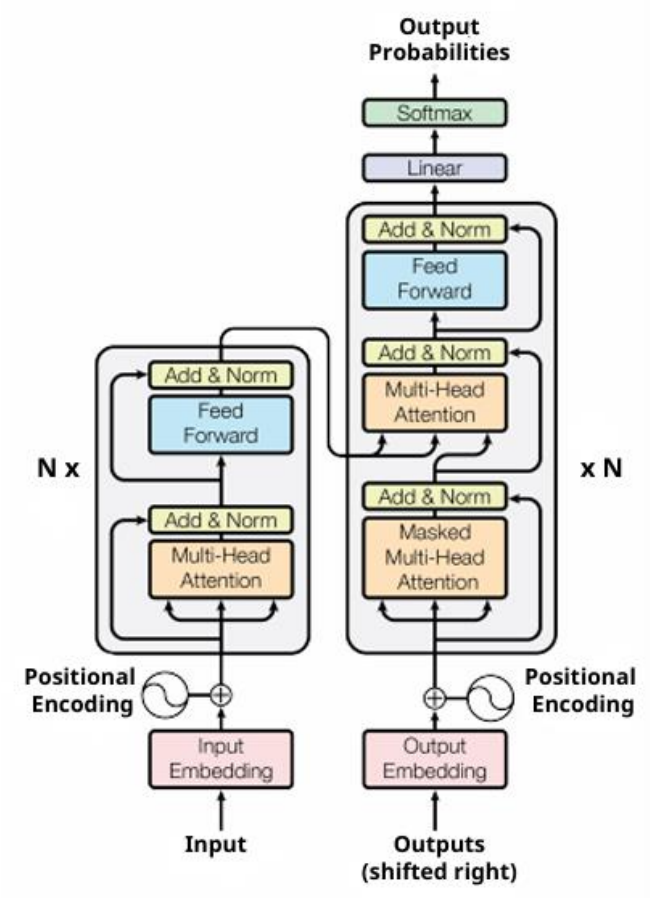
3.3 نماذج اللغة الكبيرة (Large Language Models - LLMs)

تعد نماذج اللغة الكبيرة (LLMs) من أبرز التطورات الحديثة في مجال الذكاء الاصطناعي، إذ أثبتت كفاءة عالية في فهم اللغة الطبيعية ومعالجتها وتوليدها بصورة تحاكي قدرات الإنسان اللغوية؛ وتعتمد هذه النماذج على بنية المحول (Transformer Architecture) التي قدمت لأول مرة في الورقة البحثية الشهيرة "Attention Is All You Need" [20]، والتي مثلت نقطة تحول جوهرية في معالجة السلاسل النصية فقد ألغت هذه البنية الحاجة إلى الشبكات العصبية المتكررة (RNNs) و الالتفافية (CNNs)، واستبدلتها بآلية الانتباه الذاتي (Self-Attention Mechanism)، التي تمكن النموذج من تمثيل العلاقات السياقية بين عناصر النص بكفاءة عالية؛ وقد أسهم هذا النهج في تحقيق تحسينات جوهرية في أداء مهام معالجة اللغة الطبيعية (NLP)، مثل الترجمة الآلية وتحليل النصوص، كما أتاح إمكانية تدريب نماذج ضخمة على نطاق واسع وبتكلفة زمنية وحسابية أقل بفضل قابلية التنفيذ المتوازي [20]. ويمثل هذا التطور الأساس الذي بُنيت عليه النماذج الحديثة مثل BERT وGPT التي شكلت اللبنة الرئيسة لظهور الجيل الحالي من نماذج اللغة الكبيرة.

1.3.3 البنية المعمارية لنموذج المحوّل Transformer

تعتمد بنية المحوّل في أصلها على نموذج مكوّن من مُشفّر ومولّد (Encoder–Decoder Architecture)، حيث يتولى المُشفّر تحويل تسلسل المدخلات النصية إلى تمثيل سياقي غني بالمعلومات، بينما يستخدم المولّد هذا التمثيل لإنتاج المخرجات بطريقة توليدية ذاتية تعتمد على الرموز التي تم توليدها سابقا [20].

وقد شكّل هذا النموذج نقلة نوعية في مجال معالجة اللغة الطبيعية، نتيجة اعتماده على آليات الانتباه الذاتي متعدد الرؤوس (Multi-Head Self-Attention) إلى جانب شبكات التغذية الأمامية الموضعية، مما أتاح تنفيذ العمليات الحسابية بشكل متواز ورفع كفاءة التدريب مقارنة بالنماذج التسلسلية السابقة. ويوضح الشكل (3–1) البنية المعمارية العامة لنموذج المحوّل.



الشكل (3–1): البنية المعمارية لنموذج المحول

آلية الانتباه (Attention Mechanism)

تعتمد آلية الانتباه على تحديد درجة ارتباط كل عنصر لغوي بالعناصر الأخرى داخل السياق نفسه، بما يسمح للنموذج ببناء تمثيل دلالي قادر على التقاط العلاقات الداخلية بين الكلمات أو الرموز، ويتم ذلك من خلال حساب أوزان تعبّر عن مدى أهمية كل جزء من المدخلات عند توليد المخرجات، مما يجعل آلية الانتباه حجر الأساس في فهم السياق اللغوي [20].

آلية الانتباه حاصل الضرب النقطي المقاس (Scaled Dot-Product Attention)

تُنفَّذ آلية الانتباه عمليا اعتمادا على ثلاثة مكونات رئيسية مشتقة من تمثيلات اللغة، هي:

- الاستعلامات (Queries – Q): تمثل العنصر الذي يحاول النموذج تفسيره ضمن السياق.
- المفاتيح (Keys – K): تُستخدم لقياس مدى ترابط بقية العناصر مع الاستعلام.
- القيم (Values – V): تمثل المعلومات التي يتم استخلاصها بناء على قوة هذا الارتباط.

يُحسب الانتباه عبر إجراء الضرب النقطي بين متجهات الاستعلام ومتجهات المفاتيح لقياس درجة التشابه، ثم تُقسَّم النتائج على الجذر التربيعي لبُعد المفاتيح d_k بهدف الحد من تضخم القيم ومنع عدم الاستقرار العددي عند التعامل مع تمثيلات عالية الأبعاد؛ بعد ذلك تُطبق دالة Softmax لتحويل القيم إلى أوزان احتمالية تحدد مقدار المعلومات المستخلصة من كل قيمة مرتبطة. ويُعبّر عن هذه العملية بالصيغة التالية [20]:

$$Attention(Q,K,V) = softmax\left(\frac{Q^T K}{\sqrt{d_k}}\right) \quad (3-1)$$

الانتباه متعدد الرؤوس (Multi-Head Attention)

امتدادا لآلية الانتباه الأساسية، يتيح الانتباه متعدد الرؤوس للنموذج معالجة النص من زوايا متعددة في الوقت نفسه، فبدلا من الاعتماد على تمثيل سياقي واحد، يقوم النموذج بتوليد عدة تمثيلات فرعية يركّز كل منها على نمط أو علاقة دلالية مختلفة داخل النص، وتُدمج هذه التمثيلات لاحقا مما يعزز قدرة النموذج على فهم العلاقات المعقّدة وإنتاج مخرجات أكثر دقة وتماسكا [20].

وبعد استعراض المبادئ النظرية لآليات الانتباه ودورها في نمذجة العلاقات داخل المحول ينتقل هذا القسم إلى توضيح كيفية دمج تلك الآليات ضمن البنية الداخلية للمحول، بدءا من تمثيل المدخلات والترميز الموضعي ثم بوصف بنية المشفر والمولد.

تحويلات المدخلات والترميز الموضعي (Input Embeddings and Positional Encoding)

تعد مرحلة تحويل المدخلات من الخطوات الأساسية في بنية المحول، يُحوَّل النص قبل دخوله إلى طبقات النموذج إلى متجهات عددية (Embeddings) تعبّر عن المعاني الدلالية للرموز، ويُضاف إلى هذه المتجهات ترميز موضعي (Positional Encoding) لتمكين النموذج من تمييز مواقع الرموز داخل التسلسل، نظرا لغياب البنية التسلسلية الصريحة في آلية الانتباه ويشكّل هذا الدمج أساسا لفهم العلاقات المعتمدة على الترتيب خاصة في النصوص الطويلة [20].

بنية المُشفّر والمولّد (The Encoder and Decoder Structure)

يتكوّن كل من المشفّر والمولّد من طبقات متكررة تشمل آليات الانتباه الذاتي وشبكات التغذية الأمامية، مدعومة بوصلات متبقية (Residual Connections) وطبقات تطبيع (Layer Normalization) لضمان استقرار عملية التدريب، يتولى المشفّر استخراج تمثيل سياقي شامل للمدخلات، بينما يستخدم المولّد هذا التمثيل لإنتاج المخرجات تدريجيا، خطوة بخطوة. ويُعد هذا التكامل بين المكوّنين الأساس الذي يمكّن نموذج المحوّل من أداء مهمتي الفهم والتوليد بكفاءة عالية [20].

إن توظيف النماذج اللغوية في الأنظمة الهندسية، كشبكات الاتصالات، يتطلب مستوى مرتفعا من الموثوقية والدقة وإمكانية تتبع مصادر المعرفة الداعمة لعملية اتخاذ القرار، وبذلك لا يكون الاعتماد على المعرفة الضمنية للنموذج وحدها كافيا، لا سيما عند معالجة أعطال تشغيلية تستلزم الرجوع إلى وثائق فنية محددة وبيانات تشغيل واقعية، ومن هنا تبرز أهمية الأطر التي تجمع بين القدرات التوليدية للنماذج اللغوية وآليات الاسترجاع المنهجي للمعرفة الموثوقة، كما هو الحال في إطار التوليد المعزّز بالاسترجاع (RAG).

4.3 التوليد المعزز بالاسترجاع (Retrieval-Augmented Generation — RAG)

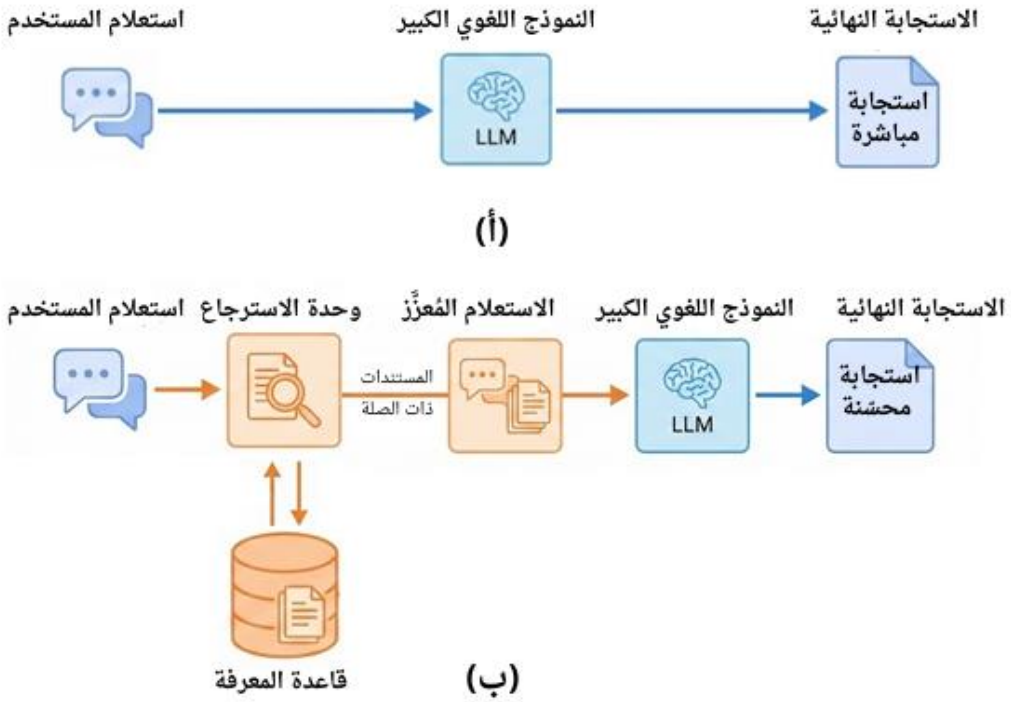
شهدت نماذج اللغة الكبيرة تطورا ملحوظا في قدراتها على معالجة اللغة الطبيعية وإنتاج نصوص عالية الجودة، وعلى الرغم من هذا التقدم لا تزال هذه النماذج تواجه قيودا عند التعامل مع المهام المعرفية المعقدة، وتتمثل أبرز هذه القيود في ثلاثة محاور رئيسية:

1. الهلوسة: ميل النموذج إلى توليد معلومات غير دقيقة أو غير مدعومة بمصادر موثوقة.
2. انحصار المعرفة: اقتصار استجابات النموذج على نطاق بيانات التدريب، مما يحد من قدرته على مواكبة المعارف والمستجدات الحديثة.
3. ضعف الشفافية: صعوبة تتبع مصادر الاستدلال أو تبرير المخرجات التي ينتجها النموذج.

برزت تقنية التوليد المعزز بالاسترجاع (RAG) كإطار عملي لمعالجة هذه القيود من خلال الدمج بين نوعين من الذاكرة:

- الذاكرة المعلمية: تتمثل في المعرفة المدمجة داخل معلمات النموذج أثناء مرحلة التدريب.
- الذاكرة غير المعلمية: تتمثل في المعرفة الخارجية القابلة للتحديث يتم استرجاعها من قواعد بيانات أو مستودعات نصية.

يسهم هذا التكامل في تحقيق مجموعة من الفوائد، من أبرزها: تحسين دقة ومصداقية المخرجات، تقليل احتمالية الهلوسة، تمكين تحديث المعرفة بشكل مستمر، إضافة إلى دمج المعلومات المتخصصة دون الحاجة إلى إعادة تدريب النموذج بالكامل [21]. ولتوضيح الفرق بين آلية عمل نموذج اللغة الكبير في وضعه التقليدي وإطار التوليد المعزّز بالاسترجاع (RAG)، يبيّن الشكل (3–2) مقارنة بينهما.



الشكل (3–2): (أ) مقارنة بين آلية عمل نموذج اللغة الكبير (LLM) في وضعه التقليدي

(ب) إطار التوليد المعزّز بالاسترجاع(RAG) .

1.4.3 المكونات الأساسية لإطار عمل RAG

يقوم إطار عمل RAG على مكونان أساسيان مترابطان يحددان كفاءته وجودة مخرجاته، ويمكن تلخيصها في المحاور الآتية:

أولا: الاسترجاع (Retrieval)

يشكل الاسترجاع المرحلة الأولى والأكثر تأثيرا في جودة التوليد، ويشمل الأساليب التقليدية، والاسترجاع الدلالي القائم على النماذج الاستدلالية، إلى جانب النماذج الهجينة التي تجمع بينهما [17].

1- الاسترجاع التقليدي:

وتستند نماذج هذا الاتجاه إلى تقنيات تعتمد على التكرار الإحصائي للمصطلحات وفي مقدمتها نموذج TF–IDF الذي يُعدّ الأساس في تمثيل النصوص داخل نموذج الفضاء المتجهي، ويهدف هذا النموذج إلى تقدير أهمية كل كلمة داخل المستند مقارنة ببقية المستندات، بما يسمح بتقديم تمثيل عددي يعكس القيمة التمييزية للمصطلحات عند إجراء عملية الاسترجاع، ويعتمد هذا النموذج رياضيا على وزن TF–IDF حيث يتكون من شقين رئيسيين [22]:

أ- تكرار المصطلح (Term Frequency – TF):

يمثّل عدد مرات ظهور الكلمة i داخل المستند j؛ وتعتمد الفرضية هنا على أن الكلمات التي تتكرر بكثرة في مستند معيّن تحمل أهمية أكبر في وصف محتواه. ويعبر عنه بالصيغة:

$$TF_{i,j} = count(i,j) \quad (3-2)$$

ب- التردد العكسي للمستند (Inverse Document Frequency – IDF):

يعالج مشكلة الكلمات الشائعة التي تظهر في معظم المستندات ولا تحمل قيمة تمييزية، ويحسب بتقليل وزن المصطلحات الشائعة وزيادة وزن الكلمات النادرة التي تظهر في عدد قليل من المستندات:

$$IDF_i = log\left(\frac{N}{df_i}\right) \quad (3-3)$$

حيث N العدد الكلي للمستندات في القاعدة و df_i عدد المستندات التي تحتوي على المصطلح i.

يُحسب الوزن النهائي بضرب القيمتين TF وIDF، مما يمنح قيمة مرتفعة للكلمات التي تتكرر داخل المستند لكنها نادرة نسبيا في بقية مجموعات النصوص:

$$W_{i,j} = TF_{i,j} \times IDF_i \quad (3-4)$$

2- الاسترجاع الدلالي:

يبنى الاسترجاع الدلالي على معمارية المحول (Transformer)، فهو يمثل التطبيق العملي لقدرات النماذج اللغوية الحديثة في فهم السياق، فيتم توظيف المحول كمشفر دلالي لتحويل النصوص إلى متجهات [20].

أ. التضمين وآلية الانتباه (Attention Mechanism & Embedding)

تعتمد عملية توليد المتجهات على آلية الانتباه حاصل الضرب النقطي التي تم ذكرها في القسم (1.3.3)، فيتم حساب وزن كل كلمة في النص بناء على علاقتها بباقي الكلمات لإنتاج تمثيل سياقي غني؛ ومخرجات المعادلة هي ما يشكل في النهاية متجه التضمين (Embedding Vector) الذي يختزل المعنى الدلالي للنص كاملا.

ب. الفضاء المتجهي والمطابقة (Matching & Vector Space)

بعد أن ينتج النموذج متجهات التضمين، يتم تجميع النصوص المتقاربة دلاليا في مناطق متجاورة داخل الفضاء المتجهي؛ ولتحديد المستند الأكثر صلة بسؤال المستخدم، يتم حساب تشابه جيب التمام (Cosine Similarity) بين متجه الاستعلام V_q ومتجه المستند V_q:

$$score(q,d) = cos(x) = \frac{V_q \cdot V_d}{||V_q||\,||V_d||} \quad (5-3)$$

3-الاسترجاع الهجين:

يمثل الاسترجاع الهجين نموذجا يجمع بين الأساليب التقليدية مثل TF-IDF وقدرات الأساليب الدلالية المبنية على التمثيلات العميقة (Embeddings) المستخلصة من نماذج حديثة مثل BERT وGPT. يسمح هذا الدمج بمعالجة القيود التي يعاني منها كل نوع منفردا، حيث توفر الطرق التقليدية سرعة وكفاءة عالية بينما تقدم الأساليب الدلالية فهما أفضل للسياق والمعنى [17]. ويعمل الاسترجاع الهجين عبر مرحلتين:

1. مرحلة الترشيح الأولي باستخدام الطرق التقليدية لاختيار مجموعة مرشحة صغيرة من الوثائق.
2. مرحلة إعادة الترتيب الدلالي حيث يتم استخدام الـ Embeddings لتحسين جودة النتائج.

هذا الأسلوب يقدم توازنا بين الكفاءة الحسابية والدقة الدلالية، مما يجعله مناسبا لتطبيقات مثل مراقبة الشبكات واكتشاف الشذوذ، حيث تكون السرعة مهمة دون التضحية بقدرة النموذج على فهم السياق.

ثانيا: تقنيات التوليد (Generation Techniques)

تركّز مرحلة التوليد في أنظمة RAG على الاستفادة المثلى من السياق المسترجع، بما يضمن دقة المخرجات ويحدّ من ظاهرة الهلوسة، ويتحقق تحسين جودة التوليد من خلال محورين رئيسيين هما تنظيم السياق، وتحسين نموذج اللغة [21].

1- تنظيم واختيار السياق

يتم تنظيم المحتوى عبر مجموعة من التقنيات التي تهدف إلى إبراز المقاطع الأكثر صلة بالسؤال المطروح وتشمل هذه التقنيات إعادة ترتيب المقاطع المسترجعة وفق درجة الصلة باستخدام مقاييس الترابط والتنوّع أو نماذج متخصصة لإعادة الترتيب، بما يضمن إعطاء أولوية للمعلومات الأكثر أهمية.

كما يُستخدم ضغط السياق لاختزال المحتوى وحذف العناصر غير الجوهرية، مع الحفاظ على المعنى العام، وذلك عبر نماذج خفيفة مخصّصة لهذا الغرض، وإلى جانب ذلك، يعتمد اختيار السياق على استخراج المقاطع الأساسية فقط بالاستفادة من تقنيات انتقائية أو آليات التقييم الذاتي للنموذج بهدف تصفية المعلومات غير ذات الصلة قبل عملية التوليد.

2- تحسين نموذج اللغة (LLM Fine-tuning)

يمثّل تحسين نموذج اللغة خطوة مكمّلة لتنظيم السياق، حيث يركّز على رفع كفاءة النموذج التوليدي نفسه في التعامل مع السياق المُنقّى، وإنتاج مخرجات دقيقة ومتّسقة، لا سيما في المجالات المتخصصة، ويتحقق ذلك من خلال الضبط الدقيق الموجّه (Fine-tuning)، الذي يعكس خصائص البيانات الفنية والسياق التطبيقي للنظام.

5.3 قاعدة المعرفة لتحليل الأعطال

في الجزء السابق تم استعراض الأسس النظرية للنماذج اللغوية الضخمة (LLMs) وآليات الاسترجاع المعزّز بالمعرفة (RAG)، يتناول هذا القسم البنية المعرفية التي تستند إليها هذه التقنيات في عملية الفهم والتحليل، وتمثل قاعدة المعرفة

الذاكرة المؤسسية للنظام، حيث تربط بين البيانات التشغيلية وسيناريوهات التشخيص والإجراءات التصحيحية، مما يجعلها المكون الأساسي الذي تعتمد عليه وحدات التحليل الذكي في تفسير الأعطال وتحديد مسبباتها ضمن النظام المقترح.

1.5.3 أهمية قاعدة المعرفة في التطبيقات المعتمدة على النماذج اللغوية

يمثل توفر قاعدة معرفة متخصصة ودقيقة عنصرا أساسيا في تطوير الأنظمة الذكية في مجال الاتصالات، خصوصا في التطبيقات التي تعتمد على النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs)، إذ تحتوي وثائق الاتصالات مثل مواصفات 3GPP وتقارير الأعطال، والكتيبات الفنية على كم هائل من المعرفة المتخصصة التي يصعب استرجاعها وتحليلها يدويا خلال العمليات التشغيلية؛ وهنا يبرز دور قاعدة المعرفة المهيكلة، التي تُمكّن من دمج هذه البيانات الفنية مع قدرات النماذج اللغوية، مما يعزز فهم العلاقات التقنية والمصطلحات المعقدة، وقد أكدت دراسة [5] أن تكييف النماذج اللغوية باستخدام بيانات الاتصالات يرفع دقتها في الإجابة على الأسئلة المتخصصة، ويدعم الفنيين ميدانيا، ويحسن أداء أنظمة التوصية في تحليل الأعطال.

2.5.3 أساليب بناء قواعد المعرفة في شبكات الاتصالات

تتنوع الهيكليات المستخدمة لبناء قواعد المعرفة في مجال الاتصالات بناء على طبيعة البيانات والغرض من التطبيق. وتُصنّف هذه الأساليب إلى خمس فئات رئيسية وفقا لما ورد في الدراسة المرجعية [5]:

1. قواعد المعرفة المنطقية

تستخدم لتمثيل الحقائق التقنية والعلاقات الرسمية المستخلصة من المواصفات القياسية مثل 3GPP، وقواعد التشغيل؛ وتمتاز بقدرتها على دعم الاستدلال الاستنتاجي الصارم، بما يجعلها مناسبة للسيناريوهات التي تتطلب وضوحا في الشروط والقواعد.

2. قواعد المعرفة القائمة على القواعد

تعتمد على صياغة الخبرة في شكل قواعد شرطية (If–Then)، وتعد أساسية في نظم التشخيص، إذ تتيح تمثيل آليات اتخاذ القرار لدى وكلاء الذكاء الاصطناعي عند تقييم أسباب الأعطال أو تحديد الإجراءات التصحيحية.

3. قواعد المعرفة الرسومية

مثل الرسوم البيانية المعرفية، وتكتسب أهمية خاصة في التطبيقات الحديثة، نظرا لقدرتها على تمثيل العلاقات المتشابكة بين عناصر الشبكة بطريقة غنية ودلالية.

4. قواعد المعرفة القائمة على الحالات

تعتمد على تخزين سيناريوهات الأعطال التي يمكن استرجاعها عند مواجهة حالات مشابهة، ويعد هذا النهج مناسبا للتطبيقات التشغيلية في الشبكات مثل eNodeB أو E-UTRAN.

5. قواعد المعرفة التوليدية

تستفيد من قدرات النماذج اللغوية التوليدية في تمثيل المعرفة اللغوية والسياقية، وتعد هذه الفئة ركيزة أساسية في الأنظمة المعتمدة علىRAG، لأنها تمكّن النموذج من دمج المعرفة الرسمية مع القدرة التفسيرية اللغوية، وتوليد استجابات دقيقة تستند إلى البيانات الهندسية الموثوقة.

6.3 الوكلاء في الأنظمة الذكية

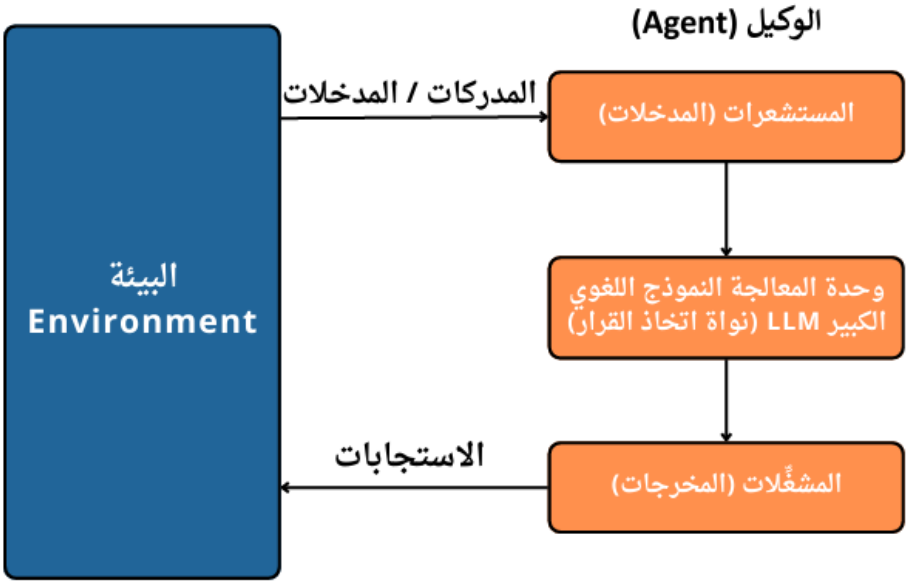
يشكل الجمع بين النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs)، وتقنيات الاسترجاع المعزَّز بالمعرفة (RAG)، وقواعد المعرفة المهيكلة أساسا مهما للأنظمة الذكية التي تعتمد على معالجة الاستعلامات وتقديم استجابات فورية، ورغم فعالية هذه المكونات في توليد مخرجات دقيقة نسبيا، إلا أن دورها يظل محصورا ضمن إطار تفاعلي يستجيب للمدخلات لحظة ورودها، دون امتلاك قدرة حقيقية على التخطيط أو المبادرة أو تنظيم المهام بشكل مستقل، هذا القيد دفع إلى تبني توجه أكثر تطورا يعرف بالذكاء الاصطناعي الوكيلي (Agentic AI)، وهو نهج يستفيد من قدرات النماذج اللغوية بوصفها محركا إدراكيا يمكن الوكيل من فهم السياق، والتحليل، والتخطيط، وتنفيذ الإجراءات على نحو متسلسل وذاتي، وتبرز أهمية هذا التوجه على نحو خاص في الأنظمة متعددة الوكلاء (Multi-Agent Systems – MAS) التي تعتمد على تنسيق جهود عدة وكلاء يعملون بصورة متوازية لمعالجة المهام المعقدة في بيئات الاتصالات، حيث يتطلب التشغيل مستوى أعلى من الاستدلال والمرونة والاستجابة الذاتية.

1.6.3 مفهوم الوكيل (Agent)

استخدم مصطلح الوكيل في الأنظمة الموزعة وإدارة الشبكات كوحدة برمجية تنفذ مهام محددة داخل بيئة والتي كانت تعتمد أساسا على جمع المعلومات وتنفيذ الأوامر دون امتلاك قدرات استنتاج مستقلة.

مع تطوّر تقنيات الذكاء الاصطناعي، تطوّر مفهوم الوكيل ليأخذ شكله الحديث المعروف بالوكيل الذكي (Intelligent Agent)، والذي أصبح أساسا للعديد من تطبيقات الحوسبة والشبكات، ويعرف الوكلاء الأذكياء بأنهم أنظمة قادرة على استشعار البيئة، وتحليل حالاتها، واتخاذ الأفعال المناسبة لتحقيق الأهداف المحددة مسبقا، مع امتلاك قدرات الاستدلال،

والتكيف، والتعلم التدريجي من خلال تراكم الخبرة، مما يجعلهم أشبه بكيانات برمجية تعمل نيابة عن المستخدم في البيئات المعقدة، وتتميّز الوكلاء بخصائص أساسية تشمل الاستقلالية، التفاعلية، التواصل، التنقل، والتكيّف، كما تُصنَّف وفق ثلاثة معايير معرفية هي الإدراك، والاستدلال، والذاكرة [23]. والشكل (3-3) يوضح مخطط عمل الوكيل الذكي وتدفق المدخلات والمخرجات.



الشكل(3-3): مخطط عمل الوكيل الذكي وتدفق المدخلات والمخرجات

2.6.3 الأنظمة متعددة الوكلاء (Multi-Agent Systems – MAS)

تُعد الأنظمة متعددة الوكلاء امتدادا لمفهوم الوكيل المنفرد، إذ تمثل بيئة حوسبية تتفاعل فيها مجموعة من الوكلاء الأذكياء بصورة منسقة لمعالجة مهام معقدة تتجاوز قدرة أي كيان مركزي واحد[23] . وقد اكتسبت الأنظمة المتعددة أهمية في بيئات الاتصالات الحديثة التي تتسم بالتوزيع والتنوع وتعدد مصادر البيانات، وهي خصائص تجعل من الإدارة المركزية التقليدية خيارا محدود الكفاءة بسبب ظهور احتمالات الفشل الأحادي، ولتجاوز هذه القيود تم توزيع قدرات التحليل واتخاذ القرار على وكلاء مستقلين يعملون بالقرب من مصادر البيانات، مما أتاح تنفيذ مهام أساسية مثل التوجيه، وتحليل مؤشرات الأداء، وإدارة الموارد بصورة أكثر كفاءة ومرونة واعتمادية. وتبرز قوة هذا النهج من خلال خصائص جوهرية تشمل: المتانة التي تمكّن النظام من الاستمرار حتى عند تعطل بعض الوكلاء، والقابلية للتوسع عند إضافة عقد جديدة، إضافة إلى الكفاءة الناتجة عن تقليل الحاجة لنقل البيانات إلى مركز واحد للمعالجة [24].

ومع ظهور الذكاء الاصطناعي الوكيلي، اكتسبت هذه الأنظمة بعدا إدراكيا جديدا يعزز قدرتها على التنسيق واتخاذ القرارات المعقدة باستقلالية، وهو ما سيتم تفصيله في القسم التالي.

3.6.3 الذكاء الاصطناعي الوكيلي (Agentic Ai)

يمثل الذكاء الاصطناعي الوكيلي الامتداد الطبيعي والتطور التطبيقي للوكلاء القائمين على الاستدلال والتنبؤ، حيث يتم توظيف النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs) لتشكل العقل للوكيل وتمنحه قدرة عالية على التخطيط والتحليل وتنفيذ المهام المركّبة بصورة متسلسلة، ويختلف هذا النهج عن أنظمة الاسترجاع التقليدي (RAG) فهو لا يقتصر على البحث عن المعلومة، بل يعتمد إطارا ديناميكيا متعدد المراحل يهدف إلى فهم السياق، تنظيم المعرفة، والوصول إلى قرار موثوق. ويتكون هذا الإطار من أربع مراحل مترابطة على النحو الآتي [17]:

1. فهم الاستعلام وإعادة صياغته:

تبدأ العملية بتلقي الوكيل لطلب المستخدم، ليقوم بتحليل نية المستخدم بدلا من الاكتفاء بالنص الحرفي للاستعلام، ويعاد صياغة الطلب بما يتوافق مع السياق الفني للمشكلة ومتطلبات مجال التطبيق، وهو ما يساهم في إزالة الغموض اللغوي وضمان توجيه عملية البحث نحو المعنى المقصود بدقة.

2. استرجاع المعرفة متعدد المصادر:

ينتقل الوكيل بعد ذلك إلى مرحلة جمع المعلومات عبر مسح متنوع للمصادر، يشمل الوثائق القياسية، سجلات الشبكة، قواعد المعرفة، والمستودعات الخارجية، ويُستخدم في ذلك البحث الدلالي وتقنيات التضمين (Embeddings) لاستخراج البيانات الأكثر صلة بالسياق، بما يتجاوز المطابقة النصية التقليدية ويضمن شمولية وعمق أكبر في المعلومات المسترجعة.

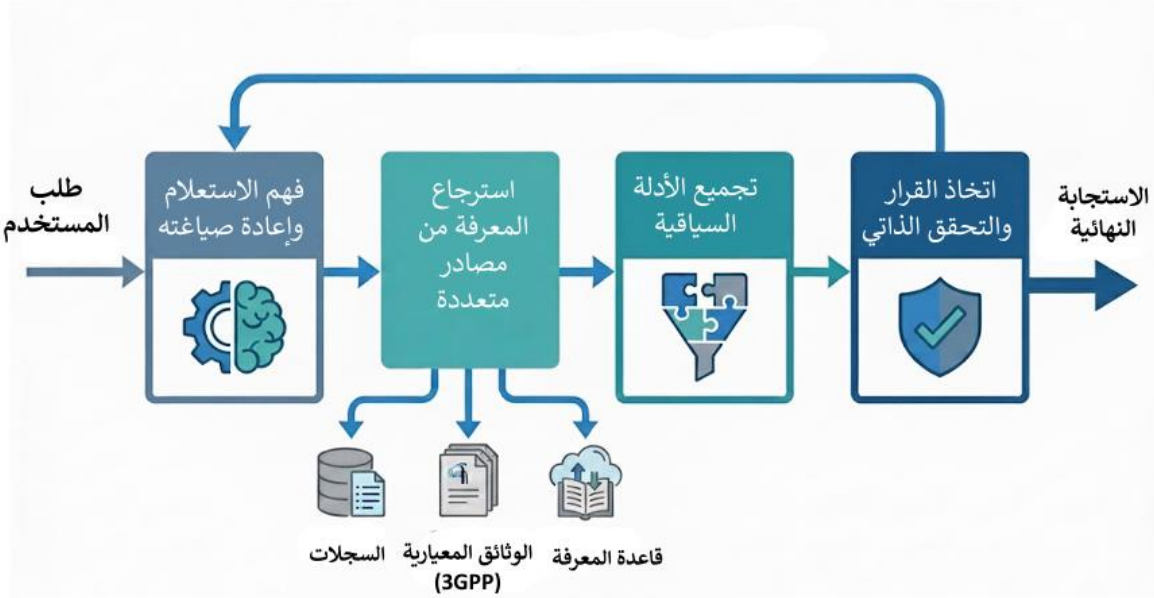
3. تجميع الأدلة والاستنتاج السياقي:

يتولى فرز المعلومات المسترجعة وتنقيتها من التكرار أو العناصر غير المفيدة، ثم يقوم بتجميع الأدلة وربطها ببعضها لبناء سياق معرفي متكامل، وتستخدم في هذه المرحلة قدرات الاستدلال المنطقي لتحويل البيانات الخام إلى فهم منظم للمشكلة، مما يمهد لإنتاج توصيات دقيقة وقابلة للتفسير.

4. اتخاذ القرار والتحقيق الذاتي

يولد الوكيل التوصية أو الإجراء المناسب مستندا إلى سلسلة منطقية داخلية (سلسلة من الأفكار) توضّح كيفية الوصول إلى الاستنتاج، وبعد ذلك، تقوم آليات التحقق الذاتي بمراجعة المخرجات للتحقق من اتساقها وخلوها من الأخطاء أو

الهلوسة، وفي حال وجود أي تناقض، يعاد ضبط الاستعلام ويكرر المسار الكامل لضمان أفضل نتيجة ممكنة. ويوضح الشكل (3–4) مخطط سير عمل Agentic Ai:



الشكل (3–4): مخطط سير عمل Agentic Ai

7.3 بنية التشغيل: النماذج المحلية (Operational Environment: On-Device Models)

تعرف النماذج المحلية بأنها نماذج لغوية كبيرة تشغل مباشرة على الأجهزة الطرفية مثل الحواسيب المحمولة والهواتف الذكية، دون الحاجة إلى إرسال البيانات إلى خوادم سحابية لمعالجتها، وقد جاء الاهتمام بهذا النوع من النماذج نتيجة التطور الواضح في هندسة النماذج الحديثة، وظهور إصدارات صغيرة وفعالة يمكن تشغيلها ضمن مواصفات أجهزة المستخدم.

تعتمد النماذج السحابية التقليدية على مراكز بيانات ضخمة، مما يجعل استخدامها مرتبطا باتصال دائم وقوي بالإنترنت، ويضيف زمنا إضافيا للاستجابة نتيجة نقل البيانات بين المستخدم والخادم، أما تشغيل النموذج محليا فيُحقق عدة مزايا مهمة، من أبرزها: سرعة الاستجابة، وتقليل استهلاك البيانات، وتعزيز الخصوصية عبر إبقاء المعالجة داخل الجهاز نفسه، إلى جانب القدرة على تخصيص النموذج لاحتياجات المستخدم أو بيئة العمل [16].

وتتميز النماذج المحلية بعدة خصائص أساسية تشمل استخدام معماريات محسّنة وفعّالة مثل التصميمات المعيارية ودمج تقنيات مشاركة المعاملات، تستفيد النماذج المحلية من تقنيات هندسية وطرق ضغط متقدمة وتكتسب هذه النماذج أهمية خاصة في التطبيقات الحساسة مثل أنظمة الاتصالات، حيث تتطلب معالجة البيانات درجة عالية من الاعتمادية

والسرعة والاستقرار، خصوصا في البيئات التي قد تكون فيها القدرة على الاتصال السحابي محدودة أو غير موثوقة، ولهذه الأسباب تُعد النماذج المحلية خيارا عمليا وملائما لتطبيقات التحليل.

الفصـل الرابع

التصميم العملي للنظام وتنفيذه

1.4 المقدمـة

يتناول هذا الفصل الجانب العملي للمشروع، حيث يركز على عرض وتنفيذ النظام المقترح لتشخيص إنذارات شبكات LTE بصورة منهجية تعكس متطلبات بيئات التشغيل الفعلية في مراكز مراقبة الشبكات. ويهدف الفصل إلى توضيح كيفية ترجمة المفاهيم النظرية والمعمارية التي تم تناولها في الفصول السابقة إلى نظام برمجي متكامل قادر على معالجة بيانات الإنذارات، وتحليلها، وإنتاج مخرجات تشخيصية قابلة للاستخدام في دعم القرار الفني.

يشمل هذا الفصل شرح التصميم المعماري للنظام وتنظيمه ضمن طبقات وظيفية مستقلة، بدءا من طبقة إدخال ومعالجة البيانات، مرورا ببناء قاعدة المعرفة وهيكلها الداخلي، وصولًا إلى طبقة التشخيص التي تعتمد على الاسترجاع الدلالي ومنطق اتخاذ القرار المشروط، كما يوضّح الفصل دور الوكيل التشخيصي المركزي في تنسيق مسار التحليل، والتعامل مع حالات عدم اليقين أو التكرار، والاستعانة بالنموذج اللغوي المحلي عند الحاجة، ضمن إطار تحكّم موجّه بالقرار.

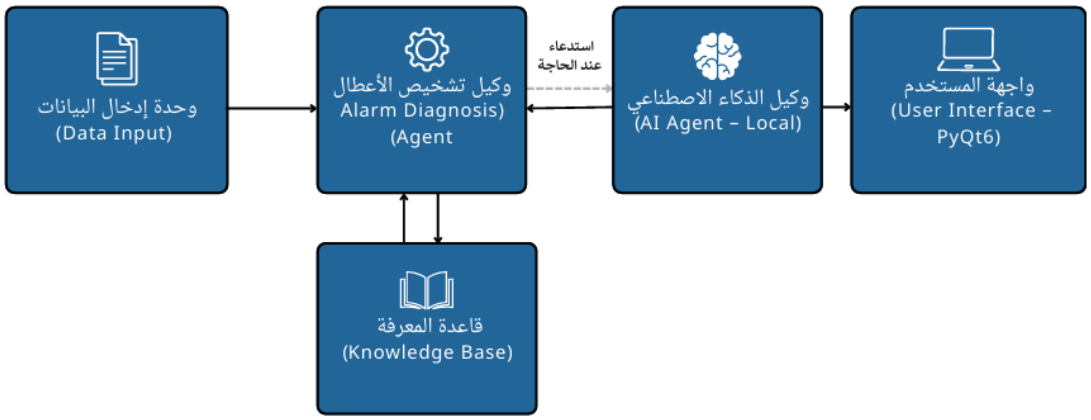
ويتناول الفصل كذلك بيئة العمل والأدوات البرمجية المستخدمة في تنفيذ النظام، مع بيان أسباب اختيارها ودورها في تحقيق الاستقرار، الكفاءة، وقابلية التوسع. كما يتم استعراض تصميم واجهات النظام الرسومية التي تمثّل الامتداد التنفيذي لطبقة العرض، وتُجسّد نتائج التحليل والاستدلال بصورة تدريجية ومنظمة، بما يتيح للمهندس التفاعل مع النظام، مراجعة المخرجات، وتقديم التغذية الراجعة.

ويختتم الفصل بشرح آلية دمج التفاعل البشري ضمن دورة تشغيل النظام من خلال حلقة التعلم المستمر، حيث تُستخدم القرارات المعتمدة لتحديث قاعدة المعرفة وتحسين أداء التشخيص بمرور الوقت. وبذلك يقدّم هذا الفصل عرضا عمليا متكاملا يبرهن على إمكانية توظيف تقنيات التحليل الذكي وقواعد المعرفة في دعم عمليات تشغيل وصيانة الشبكات الخلوية بطريقة منظمة وقابلة للتطبيق.

2.4 النظرة التنفيذية العامة للنظام

يوضّح الشكل (4−1) المخطط التنفيذي العام لتدفق البيانات داخل النظام المقترح، حيث تبدأ عملية التشخيص بتحميل ملفات الإنذارات الخام بصيغة Excel أوCSV ، ثم تمر البيانات عبر طبقة إدخال ومعالجة البيانات لتوحيد الصيغ وتجهيزها للتحليل. بعد ذلك، يتم الرجوع إلى قاعدة المعرفة وربط الإنذارات بالمفاهيم والفئات المناسبة من خلال الوكيل التشخيصي المركزي.

وفي حال توفر تشخيص واثق قائم على المعرفة، يتم اعتماد النتيجة مباشرة، بينما تُحال الحالات التي تتسم بعدم اليقين أو التكرار إلى النموذج اللغوي المحلي لدعم التحليل الاستنتاجي. تُعرض النتائج النهائية عبر واجهة المستخدم مع إتاحة اعتمادها أو تعديلها، بما يفعّل حلقة التعلم المستمر وتحديث قاعدة المعرفة مع مرور الوقت.



الشكل (4–1) المخطط التنفيذي العام لتدفق البيانات داخل النظام

3.4 بيئة العمل والأدوات المستخدمة

لم تُختَر بيئة العمل والأدوات المستخدمة في هذا النظام بشكل عشوائي، بل جاءت استجابة مباشرة لطبيعة المشكلة المدروسة ومتطلبات التشغيل الفعلي لأنظمة تشخيص أعطال الشبكات الخلوية، إذ يتعامل النظام مع بيانات تشغيلية حساسة، ومعالجة نصوص تقنية، ومنطق تشخيصي قائم على القرار، ما استلزم توفير بيئة تنفيذ تضمن الاستقرار، وانخفاض زمن الاستجابة، وقابلية التوسع، وسهولة التكامل بين المكوّنات.

تم تنفيذ النظام واختباره ضمن بيئة تشغيل محلية (Local Development & Execution Environment)، بما ينسجم مع متطلبات الخصوصية في شبكات الاتصالات دون الاعتماد على خدمات سحابية خارجية.

1.3.4 بيئة التشغيل المادية (Hardware Specifications)

لضمان الكفاءة التشغيلية للنظام واستقراره عند معالجة البيانات النصية وتشغيل النموذج اللغوي المحلي، تم تنفيذ واختبار النظام على حاسوب شخصي بالمواصفات التالية:

- وحدة المعالجة المركزية (CPU): معالج Intel Core i7.

- الذاكرة العشوائية (RAM): سعة 16GB.
- وحدة المعالجة الرسومية (GPU): NVIDIA RTX 3060.

تُظهر هذه المواصفات أن النظام لا يعتمد على عتاد خاص أو بنى تحتية مكلفة، مما يعزز قابليته للنشر في البيئات التشغيلية الواقعية.

2.3.4 البيئة البرمجية والمكتبات المستخدمة

اعتمد النظام على لغة البرمجة Python باعتبارها بيئة مناسبة لبناء أنظمة هجينة تجمع بين معالجة البيانات، التحليل الدلالي، والتفاعل الرسومي، إضافة إلى دعمها الواسع لمفاهيم البرمجة الموجهة بالوكلاء والتكامل مع نماذج الذكاء الاصطناعي. وقد تم تنظيم المكتبات البرمجية المستخدمة بما يتماشى مع المعمارية الطبقية للنظام، على النحو التالي:

أولا: أدوات واجهة المستخدم والتفاعل

- PyQt6: الإطار الأساسي لبناء واجهة المستخدم، مع الاعتماد على آلية تعدد الخيوط (QThread) لفصل المعالجة الخلفية عن الواجهة، بما يضمن سلاسة التفاعل وعدم تجمّد النظام أثناء التحليل.
- Matplotlib: لعرض المؤشرات التحليلية والأنماط الزمنية للأعطال داخل الواجهة، دعما لعملية اتخاذ القرار الفني.

ثانيا: محرك التحليل والاسترجاع الدلالي

- scikit-learn: لبناء محرك الاسترجاع الدلالي القائم على TF-IDF وحساب تشابه جيب التمام (Cosine Similarity)، وهو ما يشكّل الأساس المعرفي لمنطق التشخيص القائم على الثقة.
- NumPy: لتوفير الأساس الرياضي لمعالجة المصفوفات والمتجهات بكفاءة عالية، مما يسهم في تسريع العمليات الحسابية والاستجابة للنظام.

ثالثا: إدارة البيانات التشغيلية

- Pandas: لمعالجة ملفات الإنذارات، توحيد الصيغ، حساب التكرارات، واستخلاص المؤشرات الزمنية المستخدمة في تقييم سلوك الأعطال.

- OpenPyXL: للتعامل مع ملفات Excel المستخدمة في بيئات OSS وPRTG، مع الحفاظ على مرونة التحويل إلى CSV عند الحاجة.

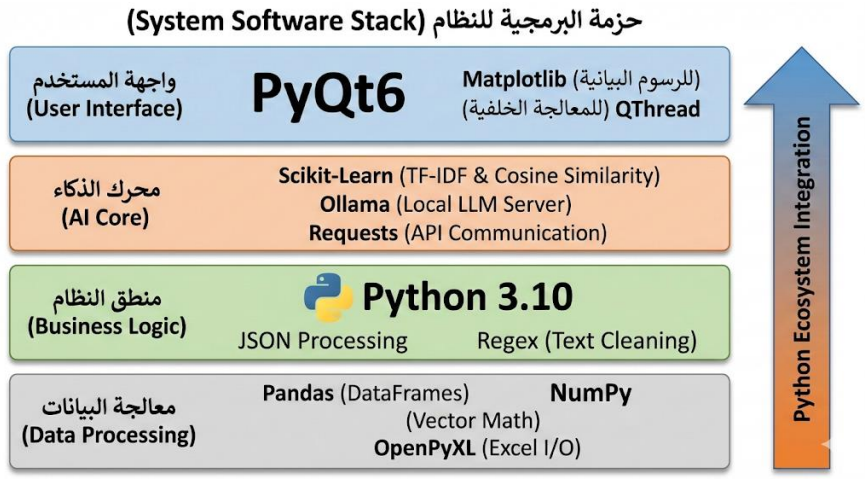
رابعا: التكامل اللغوي ودعم اللغة العربية

- Requests وJSON : لإدارة الاتصال مع النموذج اللغوي المحلي عبر واجهة Ollama API، ومعالجة الردود المهيكلة الصادرة عنه.
- Arabic-reshaper وpython-bidi: لمعالجة تحديات عرض النصوص العربية داخل الرسوم البيانية والتقارير، وضمان وضوح المخرجات للمستخدم النهائي.

3.3.4 تكامل الأدوات ضمن الإطار المعماري

لضمان كفاءة الأداء وتحقيق أعلى درجات التكامل، تم تنظيم المكتبات البرمجية للنظام ضمن معمارية طبقية كما يوضح الشكل (4-2). حيث تتدفق البيانات من طبقة المعالجة الأولية في الأسفل، مرورا بمحرك الذكاء والتحليل، وصولا إلى واجهة المستخدم في القمة، مما يعكس التكامل السلس بين جميع مكونات النظام داخل بيئة بايثون. ويسهم هذا التنظيم المعماري في:

- تعزيز قابلية الصيانة والتوسعة والتطوير المستقبلي للنظام.
- دعم السلوك القائم على الوكلاء والموجَّه باتخاذ القرار.
- تسهيل استبدال أو تحديث أي مكوّن، مثل محرك الاسترجاع أو النموذج اللغوي، دون التأثير على بقية مكوّنات النظام.



شكل (4-2): المعمارية الطبقية للحزمة البرمجية وتكامل أدوات النظام.

4.4 بناء قاعدة المعرفة

تم بناء قاعدة المعرفة اعتمادا على مزيج من البيانات التشغيلية الفعلية والمعايير القياسية، والوثائق الفنية الصادرة عن مصنّعي معدات الاتصالات. وقد تم تجميع سجلات إنذارات محطات eNodeB من بيئات متعددة، شملت شركات مثلHuawei وEricsson وSamsung، وذلك بهدف تمثيل التنوع الكبير في صياغة الإنذارات وأساليب ترميزها وطريقة توصيفها. ويساعد هذا التنوع على بناء قاعدة معرفة شمولية، ذات قدرة عالية على مواكبة الاختلافات الهيكلية بين أنظمة LTE التجارية.

ركزت الدراسة على الإنذارات الأكثر شيوعا في التشغيل الميداني، مثل أعطال الطاقة، ومسار التراسل (Transmission)، والمشاكل المرتبطة بالواجهة الراديوية (RF)، وارتفاع VSWR، والخلل في الوحدات الإلكترونية، والمشكلات الناتجة عن التكوينات البرمجية الخاطئة. وتم تحليل هذه الإنذارات استنادا إلى الوصف الرسمي الوارد في أدلة الإنذارات الفنية للموردين (Vendor Alarm Catalogs) بهدف تحديد خصائص كل إنذار، والسياق الذي يظهر فيه، والأثر التشغيلي المتوقع عند حدوثه.

تم تحديد نطاق قاعدة المعرفة ليقتصر بشكل مباشر على الإنذارات التي تؤثر مباشرة على توفر الخدمة، مثل انقطاعات الطاقة، وفشل مسار النقل، وسقوط الخلايا، وأعطال الوحدات الراديوية. ويرجع هذا التحديد الدقيق إلى كون هذه الفئة من الأعطال ترتبط بالأسباب الجذرية الحرجة التي تهدد استمرارية تقديم الخدمة للمستخدمين، مما يجعلها الأساس الأمثل لنظام التشخيص الذكي.

وبالإضافة إلى سجلات الإنذارات، تتضمن قاعدة المعرفة المفاهيم التشخيصية (Concepts) والتصنيفات (Categories) التي ترتبط بكل إنذار. وقد تم بناء هذين البعدين استنادا إلى:

- المعايير الفنية 3GPP المتعلقة بوظائف الشبكة وأنواع الأعطال.
- أدلة الإنذارات الفنية للموردين.

وبهذا المزج بين البيانات التشغيلية والمعايير القياسية والخبرة الفنية، أصبحت قاعدة المعرفة نموذجا هجينا يدعم قدرة الوكيل الذكي على تفسير الإنذارات وتحليلها بطريقة تعكس المنطق الفني الذي يتبعه مهندس الاتصالات أثناء التشخيص اليومي للأعطال.

1.4.4 هيكل قاعدة المعرفة (Knowledge Base Structure)

تم تصميم قاعدة المعرفة لتعمل كبنية مركزية متكاملة لتمثيل أعطال شبكات الاتصالات وربطها بشكل منهجي بأسبابها الجذرية والإجراءات التصحيحية المقترحة لمعالجتها. ويعتمد هذا التصميم على مجموعة من الملفات المترابطة، بحيث يؤدي كل ملف دورا وظيفيا محددا ضمن منظومة التشخيص الآلي، بما يضمن اتساق البيانات، ويعزز قابليتها للربط، ويُسهّل عمليات الاسترجاع والتحليل التشغيلي.

1- ملف الإنذارات

يمثّل ملف الإنذارات القاموس الفني الرئيسي للنظام، إذ يضم التعريفات القياسية للإنذارات كما وردت في وثائق المورّدين. ونظرا لاختلاف تسمية وترقيم الإنذارات بين الشركات المصنّعة، فقد صُمّم هذا الملف ليعمل كطبقة توحيد تُمكّن النظام من تفسير الإنذارات الواردة من مصادر مختلفة ضمن صيغة موحّدة.

ويركّز هذا الملف على توصيف الهوية التقنية للإنذار من خلال ربطه بالمورّد، ومعرّفه الرقمي الفريد، واسمه الرسمي، ووصفه الفني الدقيق، إضافة إلى تحديد المكوّن الشبكي المتأثر. كما يتضمّن مؤشرات تعبّر عن درجة الخطورة، وطبيعة تأثير العطل على الخدمة، ومستوى فقد التوفر على مؤشرات الأداء، بما يسمح باستخدام هذه البيانات لاحقا كأساس لربط الإنذار بالمفاهيم والتصنيفات المناسبة داخل قاعدة المعرفة.

2- ملف المفاهيم

تختلف صياغة الإنذارات بين الشركات وتتعدّد، إلا أنها كثيرا ما تشير إلى مفهوم تشخيصي واحد، وهنا يأتي دور ملف المفاهيم، الذي يشكّل الأساس في توحيد تفسير هذه الإنذارات وتحويلها من رسائل تشغيلية خام إلى معنى تشخيصي موحّد. يمثّل المفهوم لعطل فني قد يظهر عبر إنذارات مختلفة صادرة عن مورّدين متعددين، فعلى سبيل المثال، قد تشير إنذارات مثل BBU Link Failure أو Transport Failure إلى المشكلة التشخيصية ذاتها والمتمثّلة في خلل بمسار النقل.

ويحتوي هذا الملف على معرّفات موحّدة للمفاهيم تُستخدم داخل النظام بغض النظر عن اختلاف مصطلحات المورّدين، إلى جانب الأنماط اللغوية والكلمات المفتاحية اللازمة لاكتشاف هذه المفاهيم داخل نصوص الإنذارات. كما يضم توصيف الأسباب الجذرية والإجراءات التصحيحية المقترحة باللغتين العربية والإنجليزية، مع تحديد الفريق الفني المختص بمعالجة هذا النوع من الأعطال.

3- ملف الفئات الفنية

يمثّل ملف التصنيفات الطبقة التنظيمية العليا في قاعدة المعرفة، حيث تُنظَّم الأعطال ضمن مجموعات تقنية رئيسية مثل النقل، الترددات الراديوية، البيئة، وجاهزية الخدمة. وقد جرى بناء هذا التصنيف كما ذُكر مسبقا استنادًا إلى توصيات معيار 3GPP المتعلقة بإدارة الأعطال، إضافة إلى التصنيفات التشغيلية المعتمدة في وثائق المورّدين، والتي تعكس الأسلوب العملي المتّبع في أنظمة المراقبة.

ويسهم هذا الملف في تحديد المجال الفني العام الذي ينتمي إليه الإنذار، مما يسهل حصر مجموعة المفاهيم المحتملة المرتبطة به ويتيح قراءة موحدة لحالة الموقع عند تزامن عدة إنذارات. كما يتضمّن بيانات داعمة لتحديد الطبقة الشبكية المتأثرة، والفريق المسؤول عن المعالجة، وأولوية الاستجابة وفق مستوى الخدمة.

4- ملف التعلم

يمثّل ملف التعلّم العنصر التراكمي داخل قاعدة المعرفة، حيث يدمج الخبرة البشرية مباشرة في النظام من خلال تسجيل التصحيحات والاعتمادات التي يجريها المهندسون أثناء مراجعة نتائج الوكيل. ويعمل هذا الملف كطبقة تعلّم مستمر تسمح للنظام بتحسين دقته مع مرور الوقت، لا سيما عند التعامل مع إنذارات لا تتطابق بشكل مباشر مع القواعد المعرفية المسبقة أو تتطلب فهما أعمق للسياق التشغيلي.

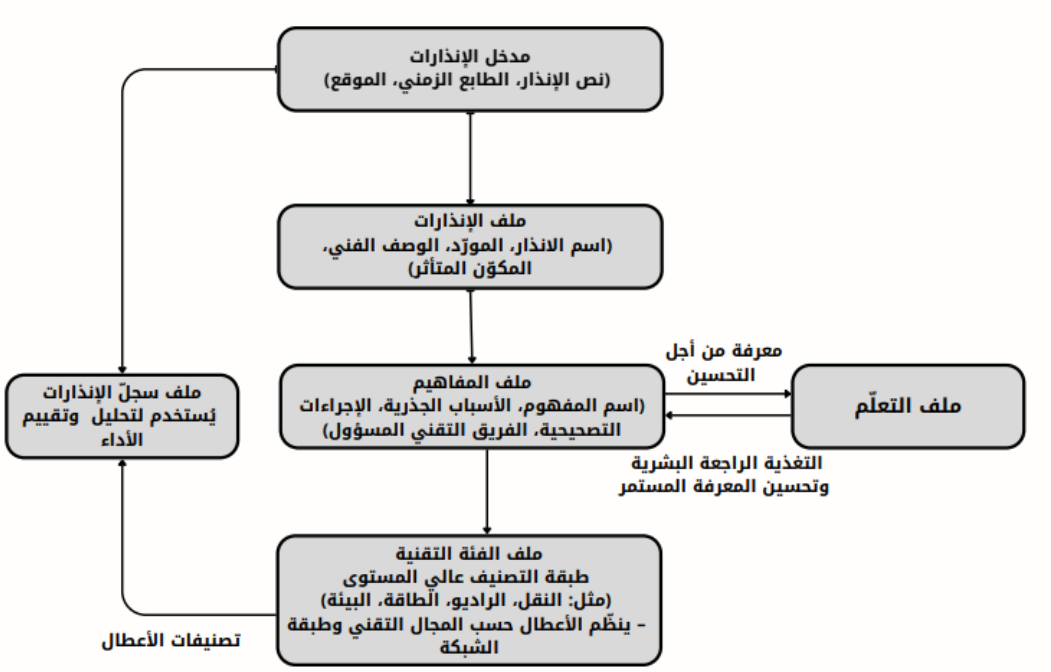
ويحتوي الملف على سجلات توثّق نصوص الإنذارات الأصلية، ودرجة خطورتها، والمفهوم النهائي الذي اعتمده المهندس بعد المراجعة، إلى جانب الأسباب الجذرية والإجراءات التصحيحية التي أثبتت فعاليتها ميدانيا. كما يتضمّن مؤشرات تقييم مثل درجة المطابقة النصية ونمط عمل الوكيل، إضافة إلى البيانات الزمنية الخاصة بظهور الإنذار وتسجيل عملية التعلّم، بما يتيح تحديث القواعد وتحسين حساسية النظام بشكل مستمر.

5- ملف سجل الأعطال

يمثّل ملف سجل الأعطال الذاكرة التشغيلية للنظام، حيث تُسجَّل فيه جميع الأحداث التاريخية للأعطال كما ظهرت فعليا في المحطات. ويهدف هذا الملف إلى توفير سجل رقمي يمكن الاعتماد عليه لتحليل سلوك الأعطال، وقياس معدلات تكرارها، وتقييم أداء نموذج التصنيف والتشخيص عبر الزمن.

ويحفظ هذا الملف العلاقة بين نص الإنذار الأصلي والتصنيف النهائي الذي توصّل إليه النظام بعد دمج القواعد المعرفية مع تقنيات تحليل النصوص، إضافة إلى بيانات الموقع، ومستوى الخطورة، والطوابع الزمنية لظهور العطل

واستمراره، وعدد مرات تكراره. وتمثّل هذه البيانات أساسا مهما لدعم التحليل الإحصائي، واكتشاف الأعطال المزمنة، وتعزيز اتخاذ القرار التشغيلي. الشكل (4–3) المخطط المعماري لقاعدة المعرفة التشخيصية المعتمدة على الإنذارات.



الشكل (4–3): المخطط المعماري لقاعدة المعرفة التشخيصية المعتمدة على الإنذارات

وتوضح تفاصيل ومحتوى كل ملف بشكل كامل في الملحق المرفق للمشروع، حيث تم عرض كل ملف على حدة مع سرد الأعمدة الخاصة به وتعريف وظيفة كل عمود، بما يوضّح أسلوب تنظيم البيانات والعلاقات البنيوية فيما بينها داخل قاعدة المعرفة.

2.4.4 مبررات اختيار التصميم الخاص بقاعدة المعرفة

يوفر التصميم طريقة عملية ومرنة لتنظيم معلومات الأعطال، مما يُسهّل استخدامها سواء داخل النظام الذكي أو ضمن بيئة عمل مهندسي الاتصالات. ويعتمد هذا الاختيار على مجموعة من الأسباب الجوهرية:

1. سهولة التحديث والصيانة: تم تقسيم القاعدة إلى ملفات مستقلة، بحيث يمكن إضافة إنذار جديد أو فئة أو مفهوم دون الحاجة لتغيير البنية الكاملة للنظام أو إعادة برمجته.
2. جاهزية الاستخدام في أنظمة RAG والوكلاء الذكيين: لأن البيانات منظمة ومقسّمة بشكل واضح، فهي مناسبة للاستخدام في أنظمة توليد الإجابة المعزز بالاسترجاع (RAG) أو داخل وكلاء الذكاء الاصطناعي.

3. قابلية التطور: يعتبر كل ملف مستقل مما يجعل تحويلها إلى قاعدة بيانات مثل SQLite عملية مباشرة وسهلة دون الحاجة لأي تعديل في المحتوى.
4. المرونة والقدرة على التوسع: تتيح الهيكلية إضافة مورّدين جدد أو تقنيات حديثة مثل 5G، Microwave، IP/MPLS بسلاسة، حيث يتم ربطها بالمفاهيم الموجودة مسبقا دون تعديل جذري في أساس القاعدة.

5.4 التصميم المعماري للنظام

يعتمد النظام في تصميمه على هيكلية معيارية متعددة الطبقات تهدف إلى فصل الوظائف الأساسية للنظام، مثل إدخال البيانات، التشخيص القائم على المعرفة، والاستعانة بالذكاء الاصطناعي، ضمن مكوّنات مستقلة ومتعاونة في الوقت نفسه، يساهم هذا الأسلوب المعماري في تحسين قابلية الصيانة، وتسهيل التوسع المستقبلي، وتمكين استبدال أو تطوير أي طبقة دون التأثير المباشر على بقية النظام.

وبناء على ذلك يتكون النظام من خمس طبقات رئيسية تتكامل فيما بينها لتحويل بيانات الإنذارات الخام الواردة من أنظمة مراقبة الشبكات الخلوية إلى مخرجات تشخيصية منظمة.

1.5.4 طبقة إدخال ومعالجة البيانات

تمثل هذه الطبقة نقطة الدخول الأولى للنظام، ويتم تنفيذها فعليًا بواسطة الفئة البرمجية FileLoaderWorker داخل واجهة PyQt6. تتولى هذه الطبقة المهام التالية:

- قراءة ملفات الإنذارات بصيغ CSV أوExcel .
- التحقق من سلامة الأعمدة الأساسية المطلوبة للتحليل (مثل اسم الموقع، عنوان الإنذار، درجة الخطورة، وقت الحدوث، ووقت الإزالة).
- توحيد أسماء الأعمدة باستخدام دوال المعالجة مثل ()normalize_columns لضمان توافق البيانات مع البنية الداخلية للنظام.
- معالجة القيم الزمنية من خلال تحويل الطوابع الزمنية إلى صيغة datetime موحدة، مما يسمح بحساب مدة الأعطال بدقة.

ناتج هذه الطبقة هو dataFrame موحد ومنظّف يمرر مباشرة إلى طبقة التشخيص دون أي منطق استدلالي، التزاما بمبدأ فصل المسؤوليات.

2.5.4 طبقة قاعدة المعرفة

تمثل هذه الطبقة الذاكرة الدلالية للنظام، وقد بُنيت اعتمادًا على ملفات مهيكلة كما هو موضح في القسم (1.4.4)، بما يسهّل إدارتها وتحديثها من قِبل مهندسي الشبكة، ويتم تحميل هذه الملفات مباشرة عبر الوحدة البرمجية kb_loader.py لتكون جاهزة للاستعلام.

3.5.4 طبقة التشخيص والاسترجاع

تعد طبقة التشخيص والاسترجاع القلب التحليلي والمحرك التشغيلي الأساسي للنظام، ويتم ضمنها تحويل الإنذارات الخام إلى تشخيصات منظمة قائمة على المعرفة، حيث يُنفّذ منطق هذه الطبقة فعليا عبر الدالة الأساسية ()run_alarm_diagnosis، والتي تمثل نقطة التجميع بين الاسترجاع المعرفي، التحليل الإحصائي، واتخاذ القرار التشخيصي، و تعتمد هذه الطبقة على منهجية هجينة تجمع بين الاسترجاع الدلالي القائم على النصوص ومنطق القرار الشرطي، بما يتماشى مع مفهوم الاسترجاع المعزز بالمعرفة.

- **نمذجة البيانات والاستخراج الدلالي**

تهدف هذه المرحلة إلى تمكين النظام من تفسير نصوص الإنذارات تفسيرا دلاليا، بما يسمح بربطها بالمفاهيم التشخيصية المناسبة داخل قاعدة المعرفة، وذلك في إطار التنفيذ العملي للنظام.

في المرحلة الأولى، يتم تحويل نصوص الإنذارات ونصوص المفاهيم التشخيصية إلى تمثيل متجهي موحد باستخدام خوارزمية TF-IDF، والتي تنفذ ضمن الفئة البرمجية TfidfKBIndex.

يمثل ربط الإنذار بالمفهوم الفني والفئة التشخيصية المقابلة الخطوة الأساسية في تحويل بيانات الأعطال الخام إلى معرفة تشغيلية قابلة للاستخدام داخل النظام الذكي، وقد تم تنفيذ هذه الخطوة بالاعتماد على دمج المعرفة الهندسية المستخلصة من معايير الاتصالات مع تقنيات تحليل النصوص، وتعتمد منهجية الربط على المحاور التالية:

أولا: قواعد الربط الأولية

تم اشتقاق قواعد الربط من خلال تحليل عيّنة ممثلة من الإنذارات الصادرة عن مورّدين مختلفين، ومقارنتها بالوصف الفني الوارد في وثائق 3GPP، إضافة إلى التصنيفات التشغيلية الخاصة بكل مورّد، واعتمدت هذه القواعد على ثلاثة عناصر رئيسية:

• المصطلحات الفنية المرتبطة بطبيعة العطل (مثل loss، fiber cut، power failure).
• المكوّن الشبكي المتأثر (مثل وحدات الواجهة اللاسلكية، وحدات التغذية، أو عناصر النقل).
• الأسباب الجذرية الشائعة ضمن كل فئة من الأعطال.

ثانيا: الاسترجاع الموحد المعزز بالسياق والتحقق السلوكي

يعتمد النظام في تنفيذه على دمج المؤشرات الدلالية في نموذج متجهي واحد لضمان دقة النتائج، مدعومًا بتحليل سلوكي للإنذار. وتتم هذه الآلية عبر الخطوات التالية:

أ. التشابه الإحصائي باستخدام خوارزمية TF-IDF

تُستخدم متجهات TF-IDF لتمثيل كل من نص الإنذار ونصوص المفاهيم المخزنة داخل قاعدة المعرفة ضمن فضاء متجهي واحد، وتتم هذه العملية باستخدام المعادلات الموضحة في القسم (1.4.3) ويتيح هذا الأسلوب إبراز الكلمات ذات الدلالة الفنية العالية وتقليل تأثير الكلمات العامة وغير التشخيصية، وبذلك تسهم الخوارزمية في إعطاء وزن إحصائي أعلى للمصطلحات الفنية المتخصصة التي تظهر بشكل متكرر داخل فئة.

ب. التعزيز النصي بالكلمات المفتاحية.

تُستخدم قائمة كلمات مفتاحية مخزنة مسبقا لكل مفهوم تشخيصي كآلية تعزيز ضمنية، حيث يقوم النظام بدمج هذه الكلمات مع الوصف الفني للإنذار قبل المعالجة، مما يجعل خوارزميةTF-IDF تمنحها تلقائيا وزنا إحصائيا مضاعفا، يوجه هذا الدمج القرار نحو الفئة الصحيحة عند توفر دلالات فنية واضحة مثل وجود كلمة Voltage يرفع احتمالية التطابق مع فئة Power.

ج. التحليل الزمني والسلوكي للإنذارات

إلى جانب الاسترجاع النصي، تقوم هذه الطبقة بحساب مجموعة من المؤشرات التحليلية الداعمة، من بينها:

- عدد تكرارات الإنذار لنفس الموقع.
- مدة العطل الزمنية بناءً على وقت الظهور والإزالة.
- نمط التذبذب من خلال تحليل الفواصل الزمنية بين التكرارات.

تستخدم هذه المؤشرات كعوامل مساعدة في تعزيز دقة القرار التشخيصي، كما تلعب دورا حاسما في تحديد ما إذا كان من المناسب استدعاء النموذج الذكي أو الاكتفاء بحل قاعدة المعرفة.

- **آلية الاسترجاع الذكي وتقييم التشابه**

بعد تمثيل نص الإنذار ونصوص المفاهيم التشخيصية باستخدام متجهات TF-IDF، يقوم النظام بحساب تشابه جيب التمام (Cosine Similarity) بين متجه الإنذار ومتجهات المفاهيم المخزنة في قاعدة المعرفة، كما هو موضح في المعادلة (3–5). وتمثل هذه الخطوة آلية القياس المستخدمة لتقييم درجة التقارب النصي بين الإنذار والمفاهيم المحتملة.

وبناء على قيم تشابه جيب التمام الناتجة، يتم ترتيب المفاهيم وفق درجة الارتباط، واسترجاع أكثر السيناريوهات ارتباطا بالإنذار باستخدام آلية Top-K Retrieval، مما يزود النظام بسياق تشخيصي دقيق ومتوافق مع الحالة التشغيلية الفعلية.

- **منطق اتخاذ القرار التشخيصي**

يعتمد وكيل التشخيص على منطق قرار مشروط قائم على درجة الثقة الناتجة عن عملية المطابقة، حيث:

- في حال تجاوزت درجة التشابه عتبة الثقة المحددة، يتم اعتماد التشخيص مباشرة من قاعدة المعرفة، ويُصنَّف القرار ضمن نمط (KB-only)، وذلك لضمان سرعة الاستجابة والاعتماد على المعرفة المؤكدة.
- في حال كانت درجة الثقة منخفضة، أو كانت المعلومات المسترجعة غير مكتملة أو متعارضة، يتم اعتبار الحالة غير مؤكدة، وتُحوَّل إلى طبقة الذكاء الاصطناعي التوليدي لمزيد من التحليل.

وبذلك تمثل هذه الطبقة نقطة الالتقاء بين التحليل الدلالي، المعرفة الهندسية، والتحليل الزمني، مما يجعلها العنصر الأكثر تأثيرًا في جودة ودقة التشخيص النهائي للنظام.

4.5.4 طبقة الذكاء الاصطناعي التوليدي

تعمل هذه الطبقة كـ "مستشار ذكي" يتم استدعاؤه شرطيا في الحالات المعقدة، وتعتمد على تكامل مع نماذج لغوية محلية عبر Ollama لضمان خصوصية البيانات، يتم تفعيل هذه الطبقة في الحالات التالية:

- حالات عدم اليقين :عندما تكون درجة ثقة المطابقة مع قاعدة المعرفة منخفضة.
- الإنذارات المتكررة: عند اكتشاف تكرار غير طبيعي للإنذار، يتم إرسال إحصائيات التكرار للنموذج لطلب تحليل أعمق للسبب الجذري بدلا من الحل التقليدي.

يتم توجيه النموذج باستخدام هندسة الأوامر (Prompt Engineering) لإنتاج مخرجات بصيغة JSON مهيكلة تحتوي على السبب الجذري والإجراءات المقترحة، ولا يتم اعتماد مخرجات النموذج تلقائيا، بل تدمج مع نتائج قاعدة المعرفة ضمن إطار قرار واحد.

5.5.4 طبقة العرض والتفاعل

تم تطوير الواجهة باستخدام إطار عمل PyQt6 لتوفير تجربة مستخدم تفاعلية وسريعة الاستجابة، وتضم:

- لوحة النتائج: جدول تفاعلي يعرض التشخيصات مع ترميز لوني لدرجة الخطورة (Severity) .
- أدوات التحليل البصري: رسوم بيانية تفاعلية تعرض توزيع الأعطال حسب الفئة، الموقع، والزمن.
- إدارة التغذية الراجعة: نوافذ حوار تسمح للمهندس بتعديل التشخيص وحفظه في قاعدة المعرفة، مما يُفعل خاصية التعلم المستمر للنظام.
- المعالجة غير المتزامنة: استخدام QThread لفصل عمليات التحليل الثقيلة عن واجهة المستخدم لضمان عدم تجمد النظام أثناء المعالجة.

بعد عرض التصميم المعماري للنظام وتقسيمه إلى طبقات وظيفية مستقلة، يصبح من الضروري الانتقال إلى شرح المنطق الذي ينسّق عمل هذه الطبقات أثناء التشغيل الفعلي، لذلك يركز القسم التالي على تصميم الوكلاء البرمجية التي تتولى إدارة مسار التشخيص، وتحديد آلية اتخاذ القرار داخل النظام.

6.4 تصميم السلوك القائم على الوكيل التشخيصي المركزي

يعتمد النظام على وكيل تشخيص مركزي واحد مسؤول عن إدارة عملية تشخيص الأعطال كاملة، بدءا من استقبال الإنذار وحتى إنتاج القرار النهائي، لا يعمل هذا الوكيل وفق مسار ثابت، بل يتّسم بسلوك Agentic يسمح له بتقييم جودة الأدلة المتاحة، وتحديد مسار المعالجة المناسب، والاستعانة بمكونات تحليلية أو استنتاجية عند الحاجة، ضمن إطار تحكم مركزي موجّه بالقرار.

1.6.4 الدور القائم على الوكيل في التشخيص المعتمد على المعرفة

يُنفَّذ هذا الدور داخل الوكيل المركزي عبر الفئة البرمجية AlarmDiagnosisAgent، ويشكّل نقطة البداية لمعالجة كل إنذار وارد، تتمثل مهمته الأساسية في تحويل الإنذار الخام إلى تشخيص منظم بالاعتماد على قاعدة المعرفة وآليات الاسترجاع الدلالي.

يستقبل الوكيل صف إنذار واحدا في كل مرة، ويقوم ببناء تمثيل نصي موحد للاسترجاع اعتمادا على عناصر تشغيلية مثل عنوان الإنذار، نوع المورد، وكائن العطل، وذلك عبر الدالة build_alarm_text(). يهدف هذا التمثيل إلى ضمان اتساق عملية الاسترجاع مع البنية الدلالية لقاعدة المعرفة.

بعد ذلك، ينفّذ الوكيل مرحلتين متتاليتين:

1. محاولة المطابقة المباشرة مع الإنذارات القياسية المخزنة في ملف alarms.
2. اختيار أفضل سيناريو من ملف concepts اعتمادا على درجة التشابه الدلالي.

ينتج عن هذه العملية تشخيص أولي يتضمن الفئة، السيناريو، السبب الجذري، والإجراءات التصحيحية، إضافة إلى درجة ثقة رقمية تعبّر عن جودة المطابقة، وتُعد هذه الدرجة عنصرا محوريا في سلوك الوكيل التشخيصي، إذ لا يُنظر إلى التشخيص كناتج نهائي تلقائي، بل كقرار أولي قابل للتقييم أو التصعيد.

2.6.4 منطق التنسيق واتخاذ قرار استدعاء النموذج المحلي

يمتلك الوكيل المركزي منطقا صريحا لتنسيق خطوات التشخيص واتخاذ قرار استدعاء النموذج المحلي، ويتم تنفيذ هذا المنطق داخل الدالة المركزية run_alarm_diagnosis()، والتي تمثل العقل التحكمي للنظام.

في هذه المرحلة، لا يتم اعتماد التشخيص القائم على المعرفة تلقائيا، بل يخضع لتقييم مشروط يعتمد على مجموعة من المعايير التشغيلية، من أبرزها:

- انخفاض درجة الثقة عن العتبات المعرفة في ملف الإعدادات
- غياب سيناريو أو إنذار قياسي مطابق.
- اكتشاف نمط تكرار غير طبيعي للإنذار.

في حال تحقق أي من هذه الشروط، يتخذ الوكيل المركزي قرارا برمجيا بتصعيد الحالة إلى استدعاء النموذج المحلي، ويعكس هذا السلوك جوهر التصميم Agentic، حيث يتم اتخاذ القرار بناءً على تقييم جودة المخرجات وليس مجرد تنفيذ تسلسلي للأوامر.

3.6.4 دور الوكيل في الاستنتاج اللغوي

يؤدي هذا الدور وظيفة مساندة داخل الوكيل المركزي، ويُستدعى بشكل شرطي عبر الدالة ask_local_llm_for_alarm() عند مواجهة حالات لا تكفي فيها نتائج قاعدة المعرفة للوصول إلى تشخيص واثق.

لا يُستخدم النموذج اللغوي كمصدر مستقل للحقيقة أو القرار، بل كأداة استنتاجية داعمة تهدف إلى تحسين جودة التشخيص وتوضيح أسبابه، ويتم تزويد النموذج بسياق مضبوط يشمل:

- بيانات الإنذار الأساسية.
- نتائج الاسترجاع المعرفي إن وُجدت.
- مؤشرات التكرار والسلوك الزمني للإنذار.

يُعاد ناتج هذا الدور بصيغة مهيكلة (JSON) تحتوي على سبب جذري مقترح وإجراءات تصحيحية، ليتم دمجه لاحقا مع التشخيص القائم على المعرفة ضمن قرار موحّد يصدر عن الوكيل المركزي، دون أن يُعتمد هذا الناتج بشكل منفصل أو تلقائي.

4.6.4 هندسة الأوامر كآلية ضبط سلوكي

لضمان انسجام الدور الاستنتاجي اللغوي (LLM Reasoning) مع منطق الوكيل المركزي، تم تصميم مُوجِّه النظام (System Prompt) ليعمل كآلية ضبط سلوكي تتحكم في كيفية استخدام النموذج اللغوي، فبدل أن يُترك النموذج ليستنتج بحرية، يتم تقييده بسلوك مهني واضح يتمثل في أداء دور مهندس شبكات يعمل داخل بيئة تشغيل، مما يحدّد نطاق التفكير والمصطلحات المستخدمة.

يفرض هذا التوجيه مجموعة من القيود الصريحة التي تمنع النموذج من اختراع مكونات شبكية أو تفاصيل تقنية غير موجودة في بيانات الإدخال، كما يلزمه بالحفاظ على مجال العطل المحدد وعدم تغييره، إضافة إلى ذلك، يلزم النموذج بإدارة عدم اليقين بشكل صريح، حيث يجب التصريح بعدم إمكانية تحديد السبب الجذري عند نقص المعطيات بدلا من تقديم افتراضات غير مدعومة.

كما تم فرض صيغة إخراج مهيكلة تمنع المخرجات الحرة، وتضمن أن تكون نتائج الاستنتاج قابلة للدمج المباشر داخل مسار اتخاذ القرار، وبهذا التكامل، تتحول هندسة الأوامر من مجرد توجيه لغوي إلى عنصر بنيوي يضبط السلوك الاستنتاجي داخل الوكيل المركزي.

5.6.4 أنماط تشغيل الوكيل التشخيصي

لدعم الشفافية وقابلية التقييم، يقوم الوكيل المركزي بتوسيم كل تشخيص بنمط تشغيل يوضح مصدر القرار، مثل:

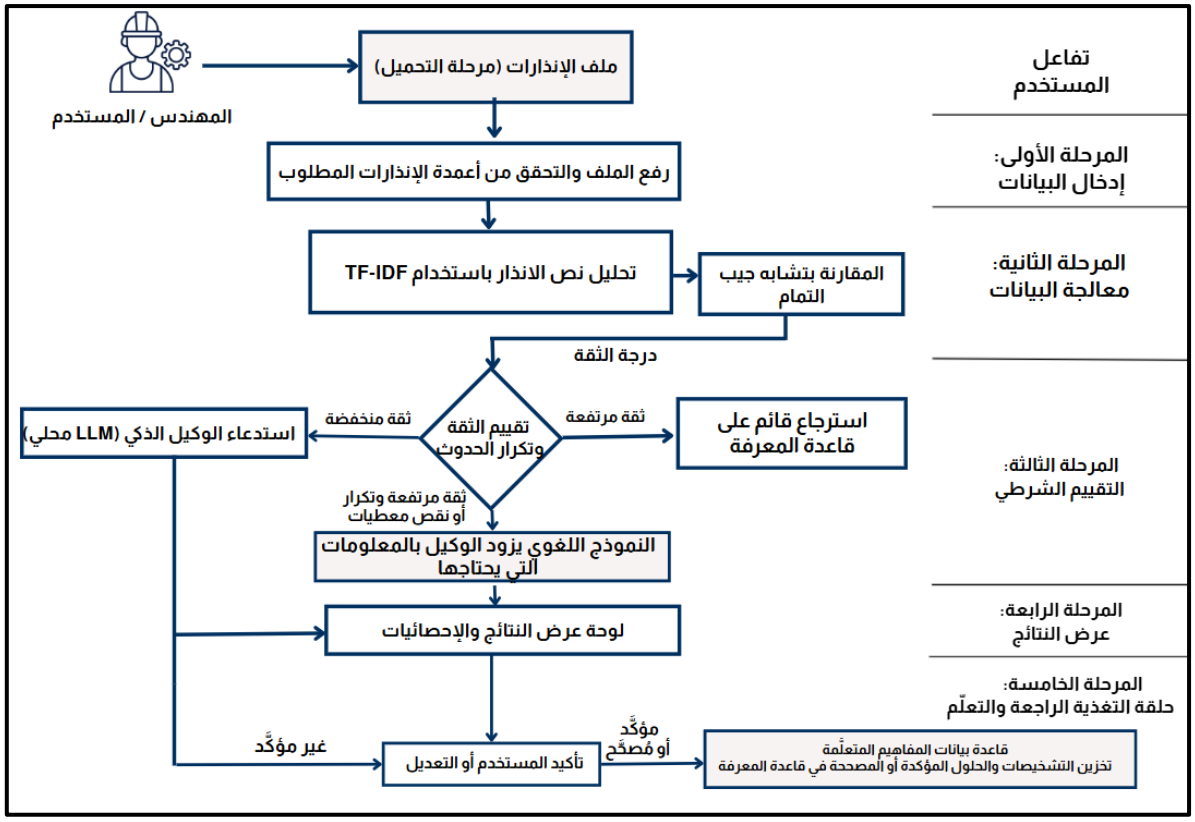
- KB-only: عند الاعتماد الكامل على قاعدة المعرفة.
- LLM-only: في الحالات الاختبارية أو غياب المعرفة.
- KB+LLM: عند دمج الاسترجاع مع الاستنتاج بسبب نمط تكرار غير طبيعي.

يتم تسجيل نمط التشغيل ضمن ناتج التشخيص، كما يُحفظ في سجل التاريخ، مما يسمح بتحليل أداء الوكيل لاحقا وفهم سلوك اتخاذ القرار.

6.6.4 حلقة التعلم المدفوعة بالتغذية الراجعة (Feedback-Driven Agentic Learning)

عند اعتماد المهندس لتشخيص معين عبر الواجهة، يتم حفظ هذا القرار في ملف learned_concepts باستخدام الدالة append_learned_concept() وفي التشغيلات اللاحقة، يقوم الوكيل المركزي بفحص هذا السجل قبل اعتماد أي تشخيص جديد. تمنح هذه الآلية النظام ذاكرة تشغيلية تتطور تدريجيا اعتمادا على الخبرة البشرية، دون الحاجة إلى إعادة تدريب النماذج، مما يعزز دقة التشخيص ويقلل من حالات عدم اليقين مستقبلا.

يوضح الشكل (4-4) المخطط الانسيابي التفصيلي (Flowchart) لعمل النظام، موضحا تسلسل العمليات بدءً من تحميل البيانات وصولا إلى إصدار التشخيص النهائي.



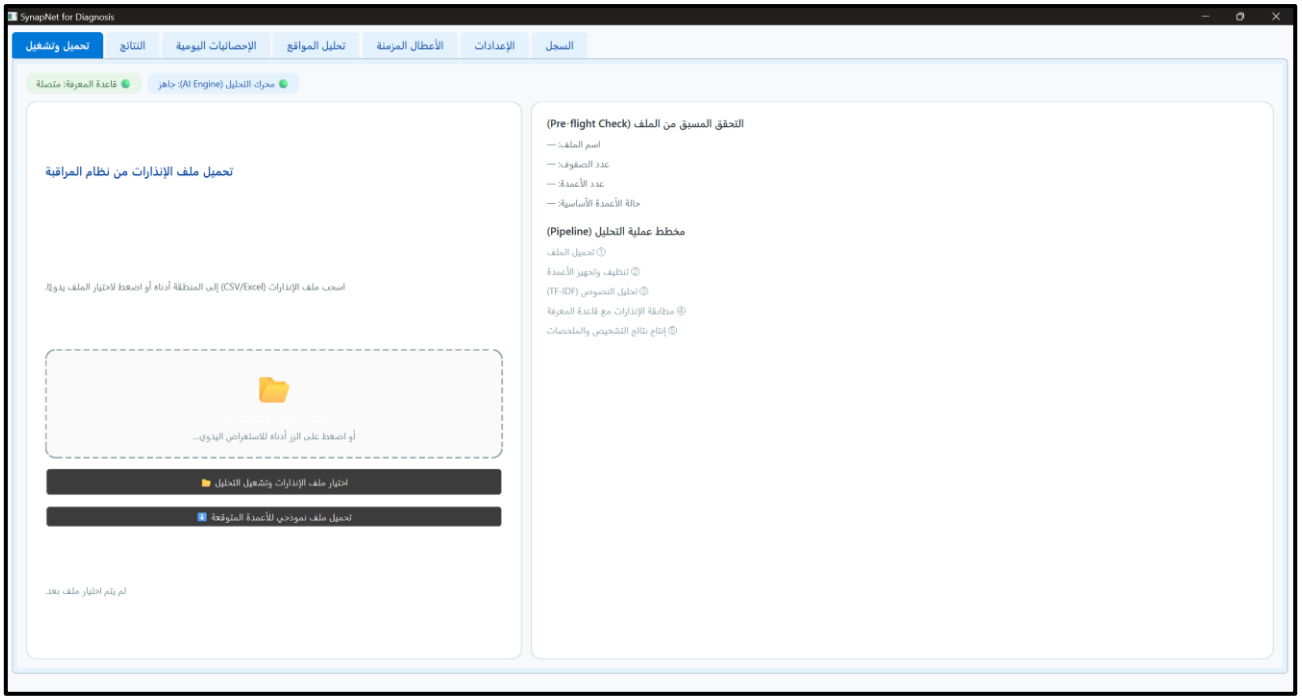
الشكل (4–4): مخطط عمل النظام

7.4 واجهات النظام الرسومية

يعتمد النظام على مجموعة من الواجهات الرسومية المتكاملة التي صممت لتجسيد منطق التحليل الذكي وتمثل هذه الواجهات الامتداد التنفيذي لطبقة العرض وطبقة تنسيق الوكلاء، حيث تعكس حالة النظام، وتدفق البيانات، ونتائج الاستدلال الذكي بصورة تدريجية ومنهجية، بما يحقق تكاملا واضحا بين التصميم المعماري النظري والتطبيق العملي.

1.7.4 واجهة تحميل البيانات وتهيئة التحليل

تمثل هذه الواجهة نقطة التفاعل الأولى بين مهندس الشبكة والنظام، كما يوضح الشكل (4–5)، وتجسّد عمليا طبقة إدخال البيانات والتحقق منها الموصوفة في القسم (1.5.4)، صممت الواجهة لضمان سلامة البيانات وتوافقها البنيوي والزمني مع متطلبات محرك التشخيص قبل بدء التحليل.



شكل (4–5): واجهة تحميل البيانات وتهيئة النظام.

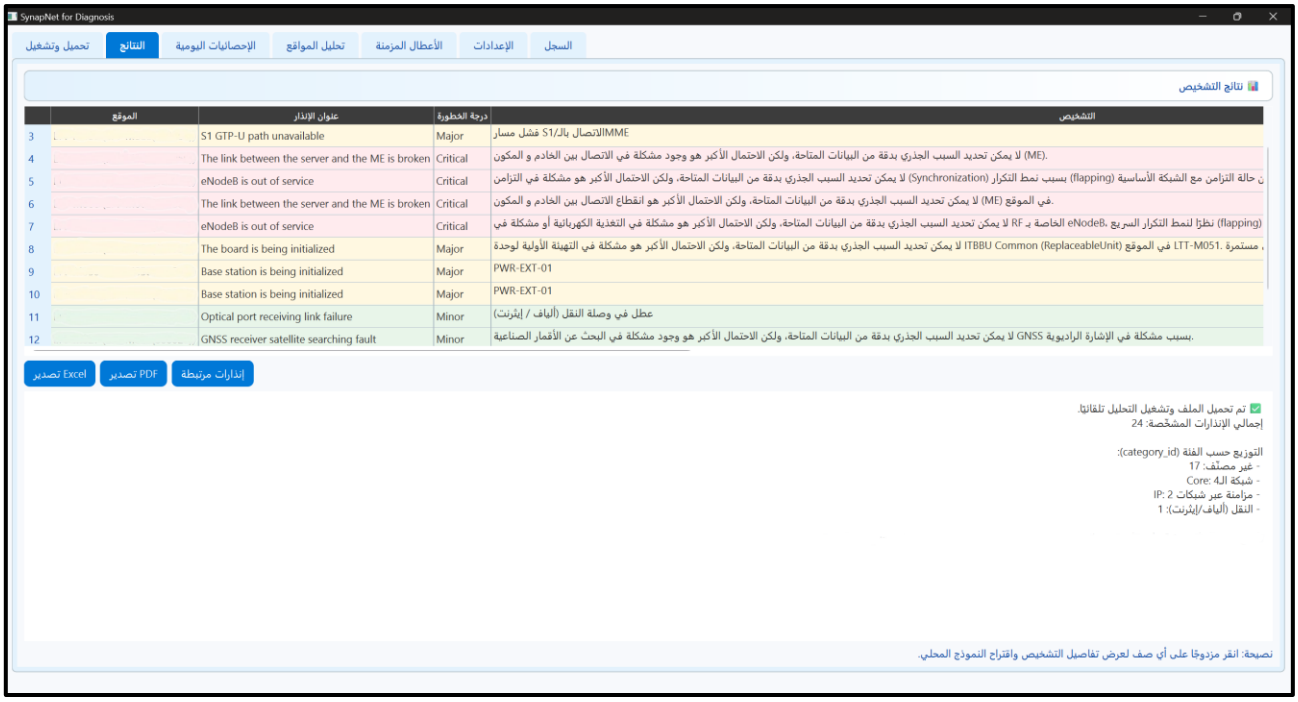
تُدار الشاشة ضمن الفئة البرمجية الرئيسية NetworkDiagnosisUI، التي تتولى تهيئة بيئة العمل واستدعاء المكونات الخلفية الأساسية مثل وكيل التشخيص الذكي وقاعدة المعرفة، وتعرض الحالة التشغيلية لبيان جاهزية البنية المعمارية للنظام .

عند تحميل ملف الإنذارات عبر الدالة load_file()، يتم تنفيذ مرحلة تحقق مسبق تلقائية لفحص سلامة السجلات وصيغ الطوابع الزمنية، مما يمنع تمرير بيانات غير صالحة إلى مسار التحليل.

تتضمن الواجهة تمثيلا بصريا ديناميكيا لمسار سير العمليات، حيث تتولى الدالة start_analysis_async() مهمة بدء المعالجة الخلفية عبر الفئة البرمجية AnalysisWorker، لتنفيذ منطق تنسيق الوكلاء المفصل في القسم (2.6.4). يضمن هذا الفصل البرمجي بين الواجهة ومنطق المعالجة للحفاظ على استجابة النظام، موفرا بيئة تشغيل مستقرة تتوافق مع متطلبات البيئات التشغيلية الفعلية.

2.7.4 واجهة عرض نتائج التشخيص

تمثل هذه الواجهة الطبقة التشغيلية التي تترجم مخرجات الوكيل الذكي إلى معلومات لدعم القرار، لتعكس نتائج منطق الاسترجاع والاستدلال المفصل في القسم (2.4.4) و(5.4)، وتظهر مكوناتها الرئيسية في الشكل (4–6).



شكل (4–6): واجهة عرض نتائج التشخيص.

يتم تنفيذ عمليات التحليل في مسار خلفي مستقل، بينما تُستقبل النتائج النهائية وتُعالج عبر الدالة on_analysis_finished() باستخدام آلية الإشارات، لتُعرض تدريجيا دون التأثير على استجابة واجهة المستخدم.

يُعد الجدول التفاعلي العنصر الأساسي في هذا التبويب، حيث يعرض التشخيص المقترح، السبب الجذري، ومستوى الثقة والإجراء الموصي به، مع توضيح مصدر القرار (قاعدة المعرفة أو النموذج اللغوي)؛ ولتعزيز شفافية القرار وإتاحة الاطلاع على مبرراته التفصيلية، تم تزويد الجدول بخاصية التفاعل المباشر، فعند النقر المزدوج على أي صف إنذار، تظهر نافذه خاصة بمواصفات الإنذار، كما هو مبين في الشكل (4–7).

تعرض النافذة نتائج تفاصيل تحليل الإنذار كما تمثل في الوقت نفسه أداة فعّالة لإدارة المعرفة؛ إذ تمكّن المهندس من اضافة مفاهيم جديدة، أو تعديل التشخيص، أو اعتماده وحفظه مباشرة ضمن قاعدة المعرفة، مما يسهم في تعزيز دقة النظام وتطوير أدائه مستقبلا عبر آلية التغذية الراجعة البشرية ولتسهيل عملية اتخاذ القرار داخل بيئة التشغيل، تعتمد الواجهة على ترميز بصري قائم على الألوان لتمثيل درجات الخطورة، بما يتيح إبراز الأعطال الحرجة بصورة واضحة؛ كما تدعم الواجهة تصدير النتائج إلى ملفات Excel وPDF عبر الدالة export_report()، مما يتيح دمج مخرجات النظام في التقارير التشغيلية والأنظمة الداعمة الأخرى.

شكل (4–7): نافذة تفاصيل تحليل الإنذار.

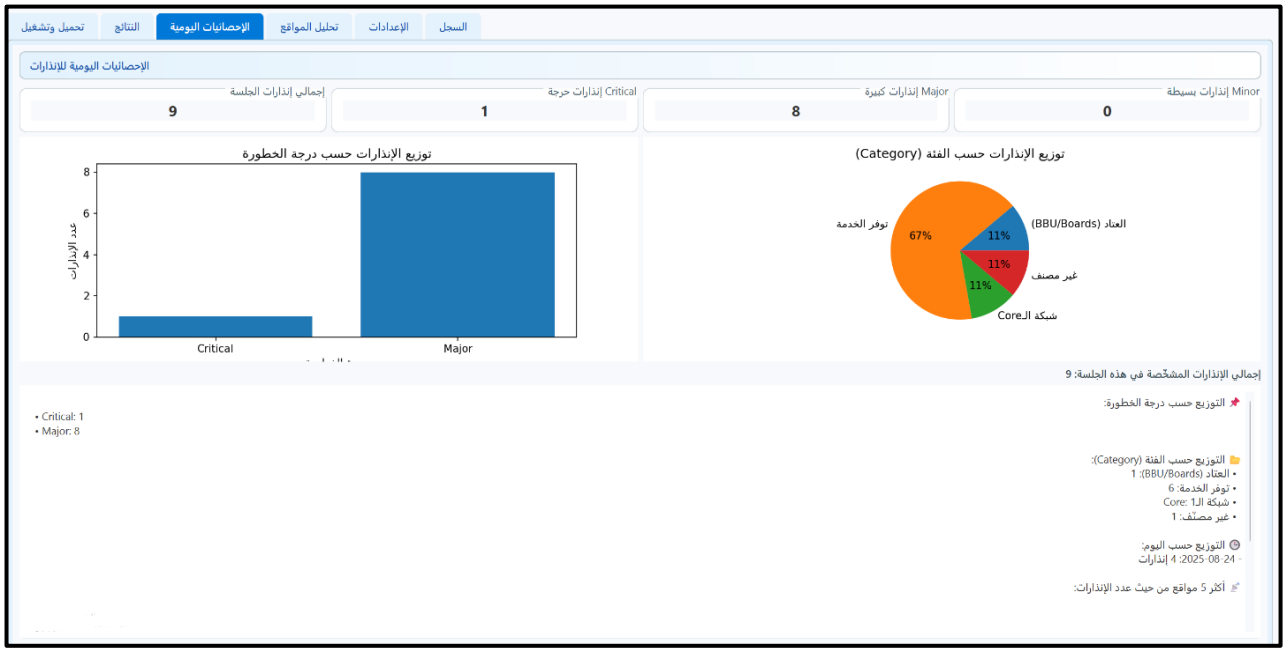
3.7.4 واجهة الإحصائيات اليومية والتحليل التجميعي

تمثّل هذه الواجهة التجسيد التنفيذي لمكون (أدوات التحليل البصري) المصمم ضمن طبقة العرض في القسم (5.5.4)، ويبين الشكل (4–8) تخطيطها العام، حيث تهدف لتحويل نتائج تشخيص الإنذارات إلى رؤية تحليلية شاملة تدعم فهم الحالة التشغيلية للشبكة.

تعرض الواجهة مؤشرات رقمية موجزة تشمل إجمالي عدد الإنذارات المكتشفة، وتوزيعها حسب درجة الخطورة، إلى جانب مخططات رسومية توضّح توزيع الإنذارات وفق مستويات الخطورة والفئات التقنية المختلفة.

وفي حين يتولى الوكيل الذكي تحليل كل إنذار بصورة مستقلة، كما ورد في القسم (6.4)، تقوم هذه الواجهة بتجميع المخرجات التشخيصية الناتجة عن عملية التحليل، وتحديث المؤشرات العددية والرسوم البيانية فور ورود نتائج جديدة.

ويسهم هذا النهج في دعم التحليل التجميعي، واستخلاص الأنماط العامة، وتوفير وعي موقفي واضح لحالة الشبكة خلال فترة التشغيل.



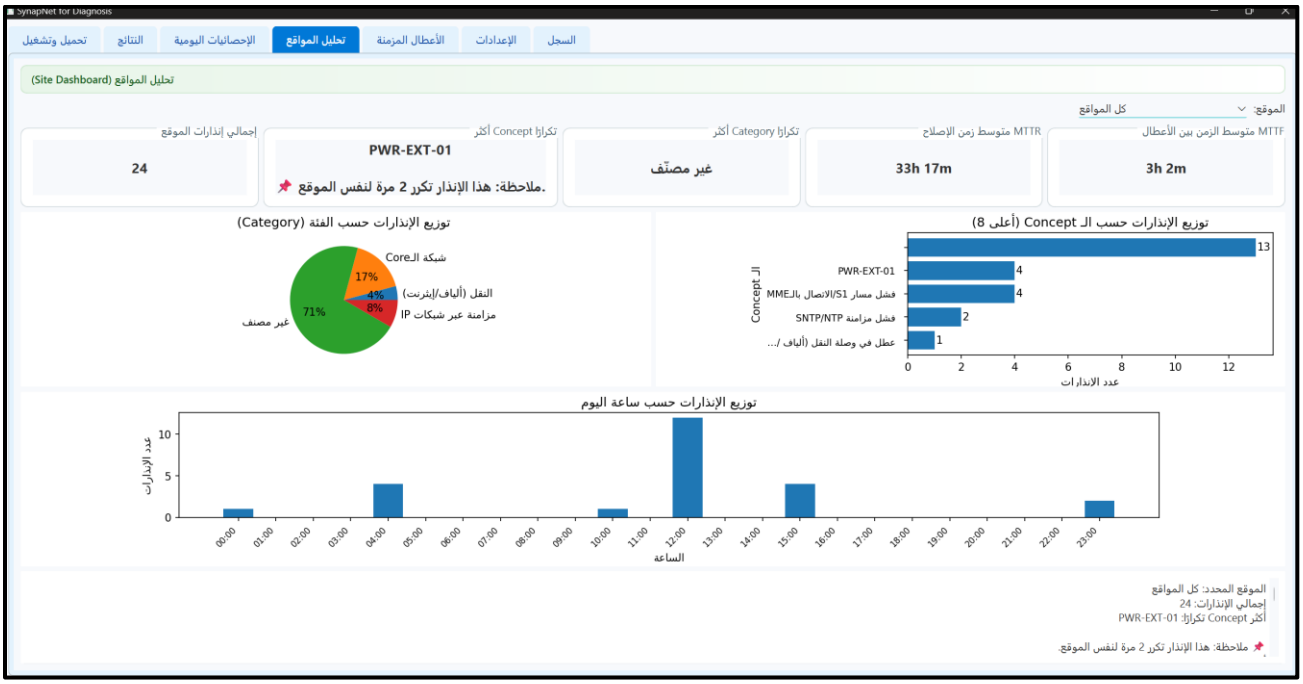
شكل (4–8): واجهة الإحصائيات اليومية.

4.7.4 واجهة تحليل المواقع والمؤشرات الزمنية

تُجسّد هذه الواجهة التطبيق العملي لمفاهيم التحليل المكاني والزمني للأعطال، كما تم توصيفها ضمن الطبقة التحليلية المتقدمة في القسم (5.4)، ويوضح الشكل (4–9) مخرجات هذه الواجهة، وتهدف الواجهة إلى الانتقال من مجرّد مراقبة الإنذارات الفردية إلى فهم سياقها التشغيلي على مستوى الموقع الواحد أو كلها، من خلال تحليل تكرار الأعطال، شدّتها، وأنماطها الزمنية.

توفّر الواجهة لوحة معلومات مركزية (Site Dashboard0) تعرض مؤشرات تشغيلية مجمّعة، تشمل إجمالي عدد الإنذارات، أعلى درجة خطورة مسجّلة، أكثر المفاهيم والتصنيفات تكرارا، إضافة إلى مؤشرات الاعتمادية الأساسية مثل متوسط زمن الإصلاح (MTTR) ومتوسط الزمن بين الأعطال (MTTF)، ويتم احتساب هذه المؤشرات اعتمادا على عمليات التجميع والتحليل الزمني للبيانات باستخدام مكتبة pandas.

كما تعرض الواجهة مجموعة من المخططات البيانية التي توضح توزيع الإنذارات حسب المفاهيم، والفئة التقنية، وساعات اليوم، ويتم رسم هذه المخططات باستخدام الفئة البرمجية MplCanvas. وتسهم هذه العروض البصرية في كشف الأنماط الزمنية وفترات الذروة التشغيلية للأعطال، بما يدعم ربط التحليل التقني بقرارات التخطيط والجدولة الميدانية لمهندسي التشغيل.



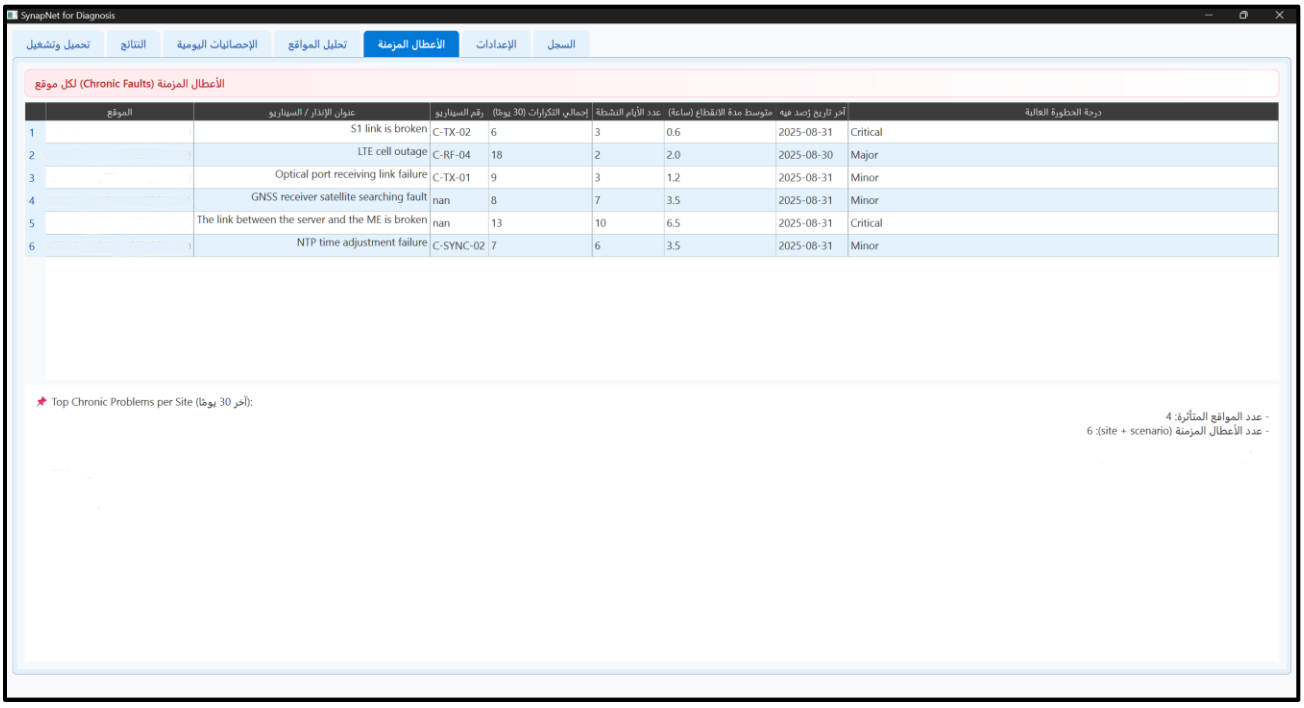
الشكل (4–9): واجهة تحليل المواقع والمؤشرات الزمنية

5.7.4 واجهة تحليل الأعطال المزمنة

تخصص هذه الواجهة لعرض وتحليل الأعطال المزمنة على مستوى المواقع، كما يوضّح الشكل (4–10)، حيث تعرض الإنذارات التي تكرّرت أكثر من خمس مرات خلال شهر واحد، وذلك بالاعتماد على بيانات ملف Alarm History. مما يساعد في التركيز على الحالات التي تشير إلى مشكلة متكررة أو غير مستقرة في الموقع.

تعرض الواجهة جدولا تحليليا يوضح الموقع المتأثر، نوع الإنذار، عدد مرات التكرار، عدد الأيام النشطة، متوسط مدة الانقطاع، وتاريخ آخر رصد، إضافة إلى درجة الخطورة الأعلى المسجّلة، مما يسمح بالكشف عن الإنذارات التي تظهر وتختفي بشكل يومي أو كل بضعة أيام، والتي قد لا تصنف كأعطال حرجة عند حدوثها الفردي.

وتتمثل الفائدة التشغيلية الأساسية لهذه الواجهة في تنبيه مهندس الشبكة إلى الأنماط التكرارية الخفية، حيث يقوم النظام بالإشارة إلى الإنذارات التي تتكرر بشكل مستمر رغم اختفائها المؤقت، مما يدعم الانتقال من المعالجة التفاعلية إلى الصيانة الاستباقية، ويسهم في تقليل احتمالية تحول هذه الأعطال إلى مشاكل مزمنة مؤثرة على استقرار الشبكة.



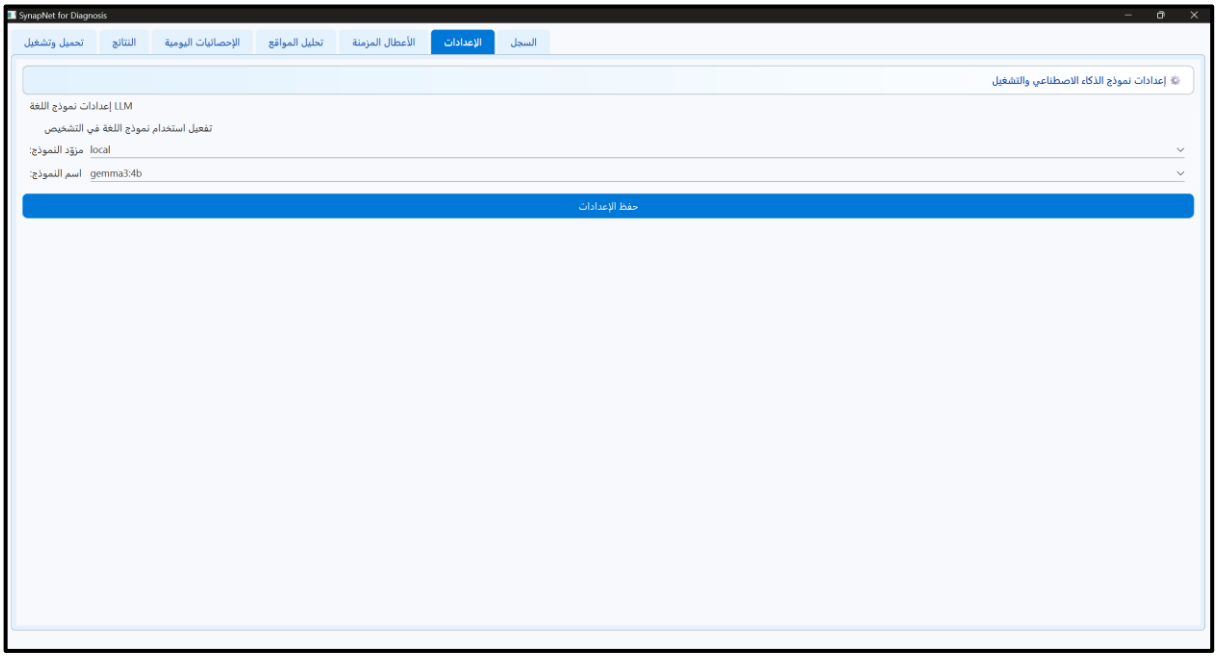
الشكل (4–10): واجهة تحليل الأعطال المزمنة

6.7.4 واجهة الإعدادات والتحكم في محرك الذكاء الاصطناعي

تمثّل هذه الواجهة لوحة التحكم الإداري في خصائص النظام، كما هو موضح في الشكل (4–11). صممت هذه الشاشة لتمنح المهندس مرونة كاملة في توجيه سلوك النظام دون الحاجة لتعديل الكود، وتتكون من ثلاثة عناصر تحكم وظيفية:

1. خيار مزوّد النموذج: يتيح تحديد مصدر نموذج الذكاء الاصطناعي المستخدم في النظام، سواء كان نموذجا محليا (Local) يعمل داخل بيئة التشغيل، أو نموذجا خارجيا متاحا عبر الإنترنت مثل نماذج Gemini، والتي يتم ربطها بالنظام من خلال واجهة برمجية للتطبيقات (API) ويسمح هذا الإعداد بالتحكم في آلية الاستفادة من النماذج اللغوية، بما يتناسب مع متطلبات التشغيل وإمكانات النظام

2. اسم النموذج: يعبّر هذا الخيار عن نوع نموذج الذكاء الاصطناعي المستخدم في عملية التحليل، أي النموذج الفعلي المعتمد في التشخيص، مثل نماذج Gemma أو Qwen أو Gemini ويُستخدم هذا التحديد لاختيار النموذج الأنسب من حيث قدرات التحليل اللغوي ودقة تفسير الإنذارات.
3. حفظ الإعدادات: لتحديث متغيرات التشغيل واعتماد الإعدادات الجديدة لجميع جلسات التحليل اللاحقة دون الحاجة لإعادة تشغيل النظام.

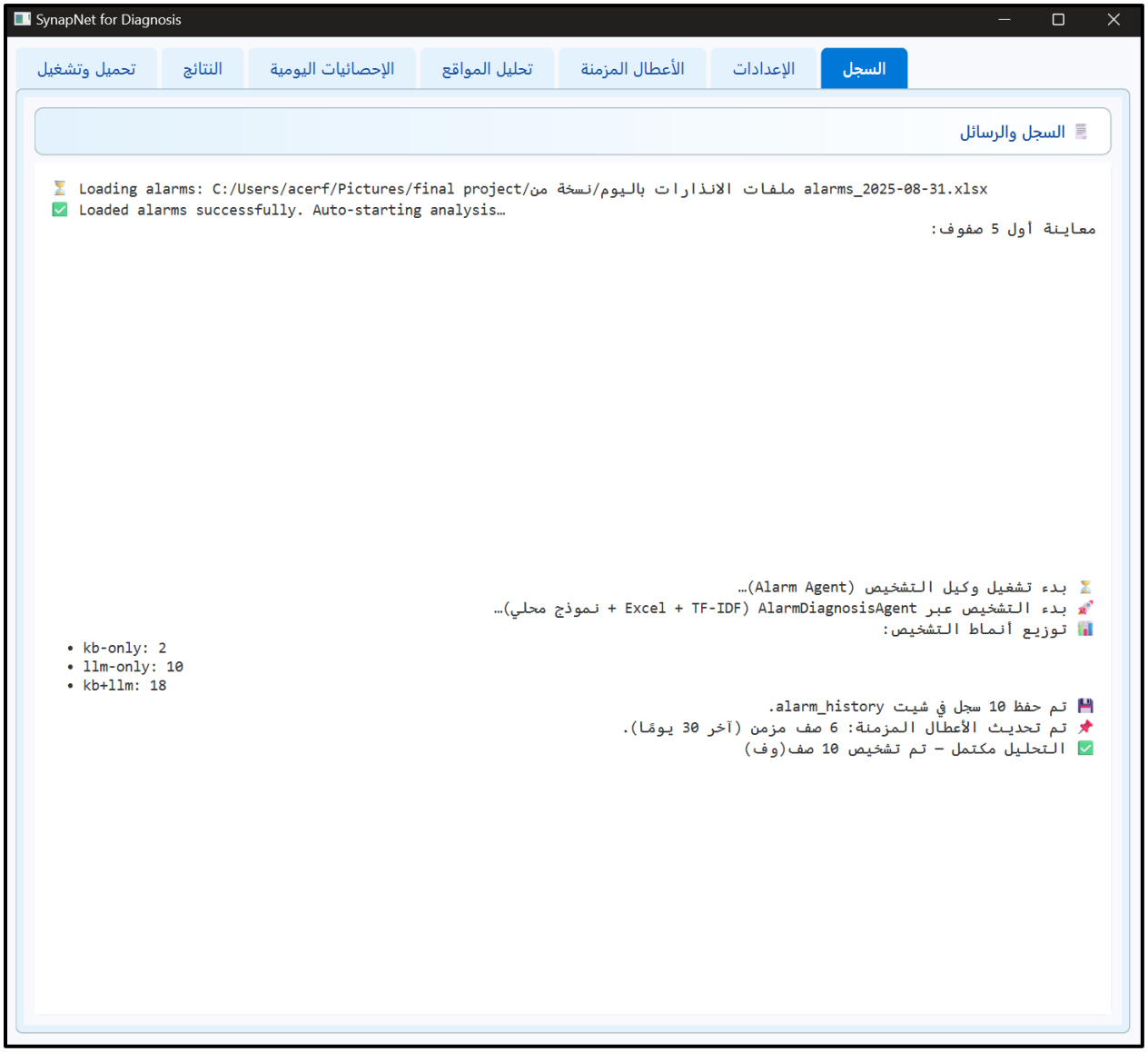


الشكل (4–11): واجهة الإعدادات.

7.7.4 واجهة السجل وتتبع سير التحليل

تُجسّد هذه الواجهة، التي يستعرض الشكل (4–12) نموذجا لمخرجاتها، طبقة التتبع والشفافية التشغيلية في النظام، وتوفر سجلا زمنيا متكاملا لجميع الأحداث والقرارات التي تتم أثناء جلسة التحليل.

تعتمد هذه الواجهة على معمارية المراقب باستخدام آلية الإشارات، حيث تقوم الفئة البرمجية AnalysisWorker ببث أحداث التشغيل لحظيا عبر الإشارات البرمجية. بينما تتولى الدالة append_log() في الواجهة الرئيسية استقبال هذه الإشارات وعرضها بتسلسل زمني، بدءا من تحميل البيانات وتهيئة الوكيل، وانتهاء بحفظ النتائج، يتيح هذا السجل للمستخدم تتبع كيفية وصول النظام إلى نتائجه بدقة، مما يدعم عمليات التدقيق التشغيلي والتحقق اللاحق.



الشكل (4-12): واجهة السجل وتتبع سير التحليل

تضمّن هذا الفصل عرضا للتفاصيل المفاهيمية والمعمارية والتنفيذية الأساسية اللازمة لفهم آلية عمل النظام ومنطق تصميمه، في حين أُدرجت التفاصيل البرمجية الدقيقة والشيفرة البرمجية الكاملة الخاصة بالتنفيذ العملي ضمن الملحق الثاني، بما يتيح الرجوع إليها عند الحاجة دون التأثير على تسلسل العرض العلمي للفصل.

الفصل الخامس

تقييم النظام وتحليل النتائج

1.5 المقدمة

يمثل الانتقال من مرحلة التصميم الهندسي والبناء البرمجي إلى مرحلة التقييم العملي خطوة أساسية للتحقق من مدى كفاءة الحلول المقترحة وقدرتها على التعامل مع التحديات التشغيلية في بيئات العمل الحقيقية، فبعد استعراض الإطار النظري وتفصيل البنية المعمارية للنظام المطوَّر في الفصول السابقة، يركّز هذا الفصل على عرض وتحليل النتائج المتحصّل عليها من إخضاع النظام لاختبارات تطبيقية باستخدام بيانات إنذارات واقعية مستمدة من بيئة تشغيل شبكات خلوية.

2.5 بيانات الاختبار

تم الاعتماد على بيانات تشغيلية حقيقية جُمعت من شركة اتصالات محلية، وتمثل سجلات إنذارات صادرة عن أنظمة مراقبة الشبكة في بيئة تشغيل فعلية، وقد استُخدمت هذه البيانات بصيغة اكسل (Excel)، وهي الصيغة الشائعة في مراكز عمليات الشبكات، بما يعكس واقعية سيناريو الاختبار وعدم الاعتماد على بيانات اصطناعية أو مولّدة.

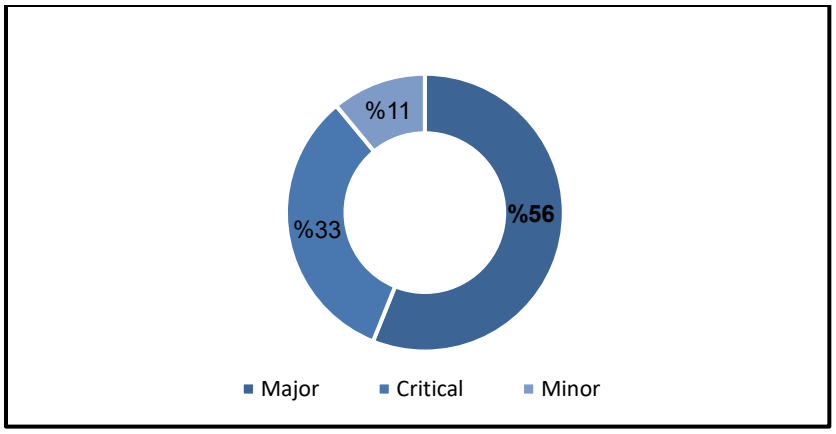
1.2.5 الخصائص العامة للبيانات

تتكوّن مجموعة بيانات الاختبار من 681 إنذارا تشغيليا جمعت على مدى شهر واحد، وتشمل إنذارات صادرة عن 64 موقعا مختلفا ضمن شبكة LTE ويوفر هذا النطاق الزمني والجغرافي تمثيلا مناسبا لاختبار سلوك النظام عند التعامل مع إنذارات متعددة المصدر ومتفاوتة في السياق.

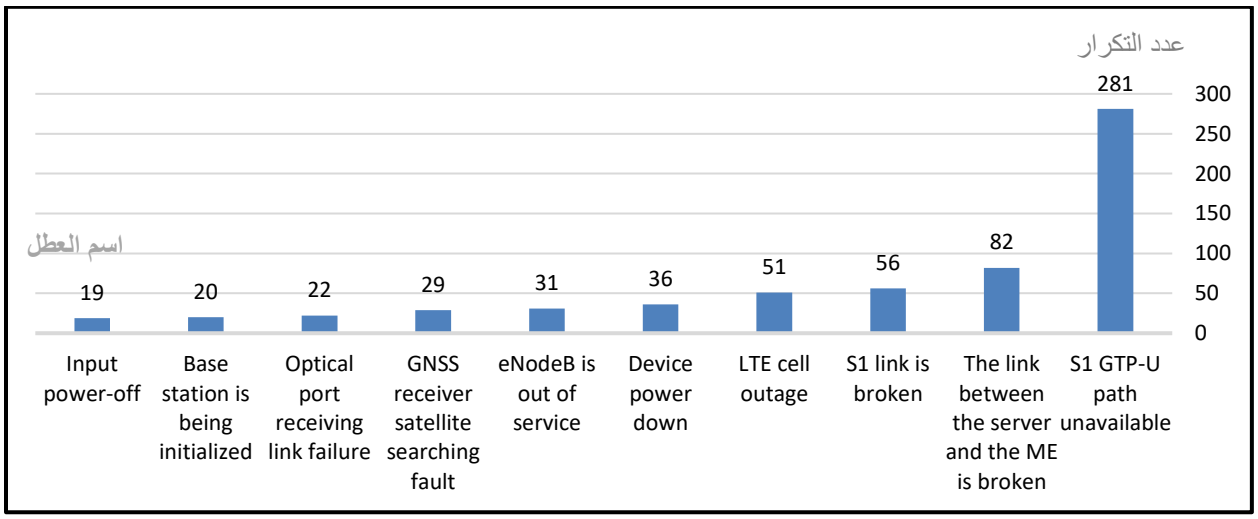
2.2.5 توزيع الإنذارات

تتضمن مجموعة البيانات مستويات خطورة تشغيلية متعددة، إلى جانب فئات تقنية مختلفة مرتبطة بأعطال الطاقة ومسارات النقل والمكوّنات الراديوية، كما تحتوي على عدد من الإنذارات المتكررة في مواقع محددة خلال فترات زمنية متقاربة، ويعكس هذا التنوّع طبيعة الإنذارات التشغيلية الفعلية في شبكات الاتصالات، ويوفّر سياقا مناسبا لتقييم أداء النظام التشخيصي المقترح.

ويبيّن الشكل **(5−1)** التوزيع النسبي لمستويات شدة الإنذارات في مجموعة البيانات المستخدمة، في حين يوضّح الشكل **(5−2)** العشر إنذارات الأكثر تكرارا في مجموعة البيانات المستخدمة.



الشكل (5–1): التوزيع النسبي لمستويات شدة الإنذارات في بيانات الاختبار



الشكل (5–2): أكثر أنواع الإنذارات تكرارًا في مجموعة بيانات الاختبار

3.5 معايير التقييم ومنهجية الحكم التشخيصي

نظرًا لطبيعة إنذارات الشبكات الخلوية، والتي لا تمتلك في الغالب حقيقة تشخيصية مرجعية مطلقة يمكن الاعتماد عليها للحكم القطعي على صحة التشخيص، تم اعتماد منهجية تقييم تستند إلى منطق هندسي تشغيلي يعكس أسلوب التفكير المتّبع لدى مهندسي مراكز تشغيل الشبكات، بدل الاعتماد على مقاييس دقة رقمية تقليدية لا تتلاءم مع هذا النوع من البيانات التشغيلية.

فالإنذار التشغيلي في شبكات الاتصالات غالبًا ما يكون عرضًا لمشكلة أعمق قد ترتبط بعدة أسباب محتملة تختلف باختلاف السياق الزمني، والموقع، وحالة الشبكة، ونوع المورد المتأثر، كما تتسم صياغة كثير من الإنذارات بدرجات

متفاوتة من الغموض أو العمومية، لا سيما تلك الصادرة عن موردين مختلفين أو أنظمة مراقبة غير موحّدة، وبناء عليه، فإن الحكم على صحة التشخيص لا يمكن اختزاله في مطابقة ناتج واحد صحيح أو خاطئ، بل يعتمد على مدى منطقية التفسير المقترح واتساقه مع المعرفة التشغيلية المتعارف عليها.

انطلاقًا من هذا الإطار، تم دعم التقييم بمراجعة خبير ميداني قام بتقييم عدد مختار من مخرجات النظام المرتبطة بإنذارات محددة، وذلك للحكم على مدى قبول التشخيص المقترح وقابليته للتطبيق العملي داخل بيئة تشغيل فعلية، دون افتراض وجود تشخيص وحيد نهائي لكل حالة، حيث كانت مستويات التقييم: ممتاز، جيد، متوسط، ضعيف، ضعيف جدا.

1.3.5 تعريف التشخيص المقبول

يُعد التشخيص مقبولا في هذا السياق إذا استوفى مجموعة من الشروط الهندسية الأساسية، أبرزها:

- وجود علاقة منطقية بين نص الإنذار والطبقة الشبكية المتأثرة.
- توافق السبب الجذري المقترح مع طبيعة العطل والسياق التشغيلي.
- واقعية الإجراء التصحيحي المقترح وقابليته للتنفيذ ميدانيا.
- عدم تعارض التشخيص مع المعرفة التشغيلية المتعارف عليها.

ولا يشترط أن يكون التشخيص وحيدا أو نهائيا، بل يُنظر إليه بوصفه تفسيرًا هندسيًا معقولًا ومفيدًا يهدف إلى توجيه عملية التحليل ودعم اتخاذ القرار.

2.3.5 تعريف حالات الضعف

تُصنّف مخرجات النظام على أنها ضعيفة أو غير مناسبة في الحالات التي يظهر فيها أحد المؤشرات التالية:

- ربط الإنذار بمفهوم تشخيصي غير متسق مع مضمونه الفني.
- تقديم تفسير متناقض أو غير مدعوم بالسياق التشغيلي.
- اقتراح إجراء تصحيحي غير عملي أو غير ذي صلة مباشرة بالعطل.

وتُستخدم هذه الحالات بوصفها مؤشرات على حدود قاعدة المعرفة أو الحاجة إلى تدخل استنتاجي أعمق.

3.3.5 حدود التقييم

يجرى هذا التقييم ضمن إطار يدرك مسبقًا غياب مرجعية تشخيصية مطلقة لإنذارات الشبكات الخلوية، وتأثير اختلاف صياغة الإنذارات بين الموردين على نتائج التحليل، إضافة إلى الارتباط الوثيق بين جودة التشخيص ومحتوى قاعدة المعرفة المتاحة وخبرة التقييم البشري المستخدم كمرجع.

وبناءً على ذلك، لا يُقدَّم هذا التقييم بوصفه حكمًا نهائيًا على صحة التشخيص، بل بوصفه تقديرًا هندسيًا لقيمته العملية، ومدى مساهمته في تقديم تفسير منظم، قابل للتطبيق، ويساعد على تسريع الفهم التشغيلي وتحسين التعامل مع الأعطال داخل بيئات تشغيل شبكات خلوية معقّدة.

4.5 تقييم كفاءة الوكيل في الاسترجاع من قاعدة المعرفة

من خلال الفرز الأولي لسجل الإنذارات المتحصل عليه من الشركة تم حصر الحالات في 20 نوعا فريدا من الإنذارات، هدفت هذه المرحلة إلى قياس مدى قدرة الوكيل على استرجاع هذه الإنذارات وتقديم تشخيص مطابق للمنطق الهندسي دون الحاجة لتدخل استنتاجي خارجي.

1.4.5 الحالات الناجحة للاسترجاع المباشر

أظهرت النتائج قدرة الوكيل على استرجاع تشخيصات دقيقة وكاملة من قاعدة المعرفة لثلاثة أنواع من الإنذارات الفريدة (بنسبة 15%)، وهي:

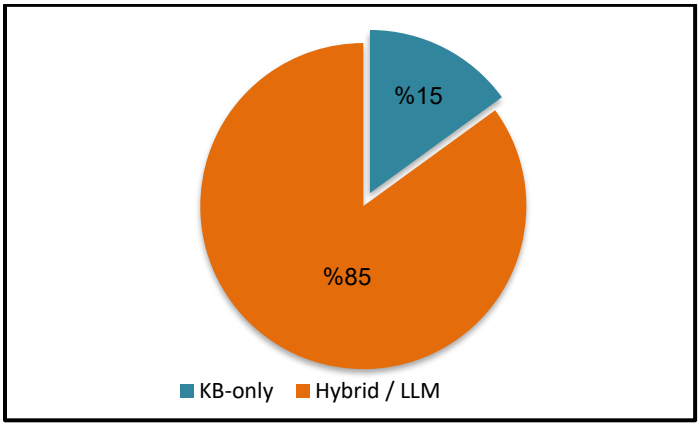
1. S1 link is broken
2. Board not present
3. NTP time adjustment failure

في هذه الحالات، استطاع الوكيل تحديد المطابقة النصية والمفهومية بسرعة عالية، مما أدى إلى توليد تقرير تشخيصي يعتمد كليا على المعرفة الهندسية الموجودة داخل قاعدة المعرفة ويعكس ذلك كفاءة الوكيل في التعامل مع الإنذارات المعيارية.

2.4.5 قيود الاسترجاع ومبرراتها

بالنسبة للإنذارات المتبقية، واجه الوكيل تعذرا في الاسترجاع المباشر من قاعدة المعرفة لم يكن هذا الفشل ناتجا عن خلل في الوكيل نفسه، بل بسبب غياب السجلات في قاعدة المعرفة لهذه الإنذارات المعقدة أو غير واضحة، مما

استوجب انتقال الوكيل إلى استراتيجية بديلة تعتمد على القدرات الاستنتاجية للنموذج اللغوي. ويبين الشكل (5–3) التوزيع النسبي لمسارات التشخيص المعتمدة من قبل الوكيل الذكي.



الشكل (5–3): التوزيع النسبي لمسارات التشخيص المعتمدة من قبل الوكيل الذكي

5.5 تحليل دور الوكيل في دمج الاستنتاج اللغوي

1.5.5 الانتقال من الاسترجاع إلى الاستنتاج

عندما يقرر الوكيل أن عملية الاسترجاع من قاعدة المعرفة لم تحقق درجة الثقة المطلوبة، فإنه ينتقل آليا لتفعيل قدرات النموذج اللغوي (LLM) في 85% من الحالات الفريدة (17 إنذاراً)، عمل الوكيل كمنسق يقوم بتزويد النموذج اللغوي بسياق الإنذار مع ما يتوفر من معلومات في قاعدة المعرفة لإنتاج تشخيص هجين.

2.5.5 أنماط عمل الوكيل المعزز بالذكاء الاصطناعي

تم رصد أداء الوكيل في معالجة الـ 17 إنذارًا وفق نمطين:

- الاسترجاع المعزز: حيث يسترجع الوكيل مفاهيم قريبة من قاعدة المعرفة ويطلب من النموذج اللغوي تعديلها لتناسب تشخيص الإنذار الحالي.
- الاستنتاج المعرفي المستقل: في حالات غياب المعلومة تماما، يعتمد الوكيل على المعرفة الواسعة للنموذج اللغوي لتحليل الإنذار وتقديم توصيات هندسية منطقية ولكن باتباع هندسة الأوامر المبني عليها.

3.5.5 القيمة المضافة لمرونة الوكيل

أثبتت النتائج أن قدرة الوكيل على التحول من الاسترجاع الصلب إلى الاستنتاج المرن قد رفعت نسبة التغطية التشخيصية للنظام لتشمل كافة الإنذارات الواردة في العينة، هذا الدور الذي لعبه الوكيل ضمن استمرارية تدفق المعلومات من البيانات الخام وصولاً إلى التشخيص النهائي، وهو ما يقلل من الفجوة بين أنظمة القواعد التقليدية ومتطلبات تشغيل الشبكات الحديثة.

6.5 التقييم التشغيلي للنظام

في هذا القسم يتم فيه تقييم أداء النظام من منظور تشغيلي تطبيقي أثناء الاستخدام الفعلي في بيئة الاختبار، مع التركيز على سلوك النظام عند معالجة ملفات إنذارات بأحجام مختلفة، واستقرار واجهة المستخدم، ووضوح المخرجات التشخيصية، وذلك دون الاعتماد على مقاييس معيارية دقيقة للأداء الزمني.

1.6.5 زمن التحليل والاستجابة

تم تقييم زمن التحليل بصورة وصفية اعتمادا على الملاحظة التشغيلية أثناء الاستخدام الفعلي للنظام، حيث لوحظ وجود علاقة مباشرة بين حجم ملف الإنذارات المدخل وزمن المعالجة الكلي، إذ يزداد زمن التحليل بزيادة عدد صفوف البيانات، وهو سلوك متوقع في الأنظمة المعتمدة على المعالجة النصية والاسترجاع المعرفي، وقد أظهر النظام قدرته على إتمام عملية التحليل بصورة مستقرة عند اختبار ملفات بأحجام مختلفة، دون انقطاع أو فشل في التنفيذ، مما يعكس ملاءمته للتعامل مع دفعات إنذارات تشغيلية شائعة في بيئات مراكز تشغيل الشبكات.

2.6.5 استقرار الواجهة أثناء التشغيل ومخرجات النظام

أظهر النظام تجربة استخدام مستقرة أثناء عمليات التحليل، مع الحفاظ على استجابة واجهة المستخدم وعرض النتائج دون تأثير ملحوظ على سير الاستخدام، كما عرضت المخرجات التشخيصية بأسلوب منظم يربط بين نص الإنذار، والتفسير المقترح، والإجراء التصحيحي المحتمل، مما سهّل على المستخدم فهم الحالة التشغيلية بسرعة ودون الحاجة إلى تحليل يدوي إضافي، وساهم في تقليل الجهد التحليلي الأولي أثناء التعامل مع الإنذارات في سياق تشغيلي فعلي.

7.5 دراسات حالة مختارة

يستعرض هذا القسم مجموعة من دراسات الحالة التطبيقية المختارة بهدف تحليل سلوك الوكيل التشخيصي في سيناريوهات تشغيلية مختلفة، تشمل إنذارات واضحة الصياغة، وأخرى غامضة، إضافة إلى إنذارات متكررة ذات تأثير تشغيلي مرتفع، وذلك لإبراز آلية اتخاذ القرار المعتمدة وحدود كل نمط تشخيصي.

1.7.5 حالة إنذار واضح ومباشر

يمثل إنذار NTP time adjustment failure مثالا لإنذار معياري واضح الصياغة، يرتبط مباشرة بأعطال مزامنة الوقت عبر شبكاتIP، مما يسهّل ربطه بمفهوم تشخيصي محدد داخل قاعدة المعرفة.

في هذه الحالة، نجح الوكيل التشخيصي في استرجاع التشخيص مباشرة من قاعدة المعرفة دون الحاجة إلى تفعيل الاستنتاج اللغوي، وأرجع النظام السبب الجذري المحتمل للعطل إلى فشل في مزامنة الوقت مع خادم NTP نتيجة إعدادات غير صحيحة أو فقدان مسار الاتصال، مع اقتراح إجراءات تصحيحية شملت التحقق من إعدادات الخادم واختبار الاتصال كما موضح بالشكل (5-4).

الشكل (5-4): الإنذار NTP time adjustment failure

أظهر التشخيص اتساقا واضحا بين نص الإنذار والطبقة الشبكية المتأثرة، وقدّم تفسيرا عمليا قابلا للتنفيذ ميدانيا، وقد قيّم المهندس المختص هذا التشخيص بتقدير (جيد)، وذلك ضمن مستويات التقييم المعتمد المذكور في القسم (3.5) ، مع ملاحظة داعمة أوصى فيها بمراجعة قواعد الجدار الناري (Firewall Rules) لاحتمالية تأثيرها على حركة بروتوكول NTP، وتوضح هذه الحالة قدرة النظام على التعامل بكفاءة مع الإنذارات المعيارية الواضحة بالاعتماد على قاعدة المعرفة فقط، بما يدعم قرار المهندس دون تعقيد إضافي.

2.7.5 حالة إنذار غامض الصياغة

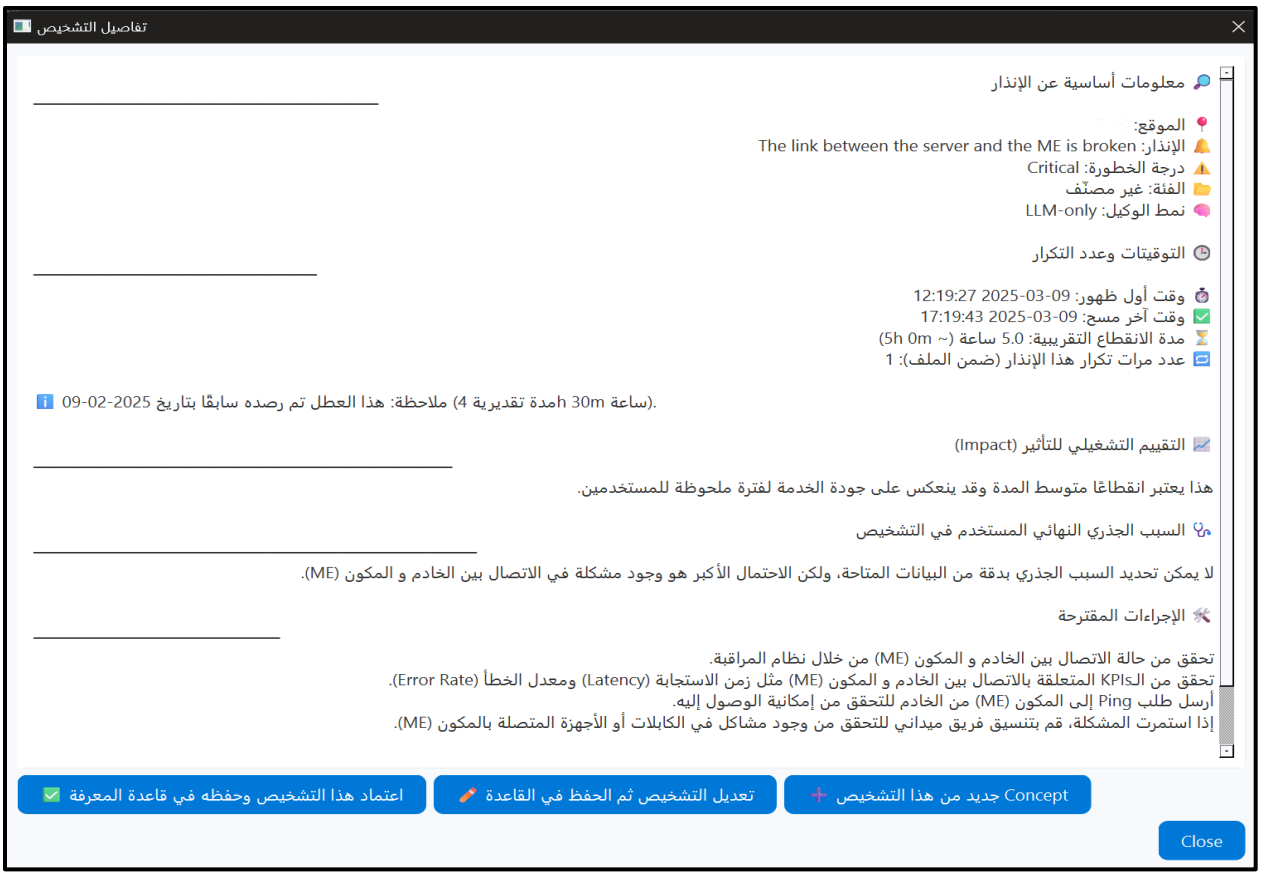
يعكس إنذار The link between the server and the ME is broken حالة إنذار ذي صياغة عامة وغامضة لا تحدد بوضوح نوع الخادم أو الواجهة أو الطبقة الشبكية المتأثرة، وهو ما يجعله من الحالات الصعبة على أنظمة التشخيص المعتمدة على الاسترجاع المباشر.

في هذه الحالة، لم يتمكن الوكيل من استرجاع تشخيص مباشر من قاعدة المعرفة، فانتقل إلى نمط الاستنتاج القائم على النموذج اللغوي، معتمدًا على تحليل السياق العام للإنذار ومؤشرات الخطورة والموقع المتأثر. وقد نتج عن ذلك تشخيص احتمالي يشير إلى وجود مشكلة في الاتصال بين الخادم والمكوّن (ME)، مع الإقرار بعدم كفاية البيانات لتحديد سبب جذري قطعي.

اقترح النظام إجراءات توجيهية شملت التحقق من حالة الاتصال عبر أنظمة المراقبة، وفحص مؤشرات الأداء المرتبطة بالاتصال مثل زمن الاستجابة ومعدل الخطأ، بالإضافة إلى اختبار إمكانية الوصول إلى المكوّن (ME) باستخدام أدوات مثل Ping، والتحقق من سلامة المسار الفيزيائي في حال استمرار المشكلة كما هو موضح بالشكل (5–5). ويعكس هذا الطرح محاولة النظام توجيه عملية التحليل بدل تقديم تشخيص قطعي غير مدعوم.

قيّم المهندس المختص هذا التشخيص بتقدير "جيد"، وذلك ضمن سلم التقييم المعتمد المذكور في القسم (3.5)، مع تعليق إضافي أوصى فيه بالتحقق مما إذا كان المكوّن (ME) في حالة Out of Service أو غير متصل فعليًا في نظام المراقبة، ويؤكد هذا التقييم أن التشخيص المقترح كان منطقيًا ومفيدًا كخطوة أولى، رغم الحاجة إلى استكمال التحليل عبر أنظمة تشغيلية أخرى للتحقق من الحالة الفعلية للمكوّن.

تُبرز هذه الحالة حدود الاعتماد على قاعدة المعرفة وحدها عند التعامل مع إنذارات غامضة، وفي المقابل توضح الدور التكميلي للاستنتاج اللغوي في دعم المهندس بتفسير معقول ومسارات فحص محتملة، دون الادعاء بالوصول إلى تشخيص نهائي في غياب معلومات كافية.



الشكل (5-5): الإنذار The link between the server and the ME is broken

3.7.5 حالة إنذار متكرر وتأثير التكرار على سلوك الوكيل التشخيصي

تمثل هذه الحالة المركّبة سيناريو إنذار متكرر ذي تأثير تشغيلي مرتفع، يهدف إلى إبراز دور البعد الزمني في تغيير مسار التشخيص، وانتقال الوكيل من الاعتماد على المعرفة الثابتة إلى الاستعانة بالاستنتاج المدعوم بالنموذج اللغوي. وقد شملت هذه الحالة إنذارين مرتبطين بالموقع نفسه، هما Device power down و LTE cell outage، واللذان تكرّرا خلال فترة زمنية متقاربة وبعدد ملحوظ من المرات.

في الحالة الأولى، ظهر إنذار Device power down عدة مرات في الموقع نفسه، مع تسجيل انقطاعات طويلة نسبيًا، مما يشير إلى نمط تكرار غير طبيعي، وبسبب غياب سجل تشخيصي مباشر لهذا الإنذار في قاعدة المعرفة،

إلى جانب تكراره وتأثيره التشغيلي الكبير، اعتمد الوكيل على نمط الاستنتاج القائم على النموذج اللغوي لتوليد تشخيص احتمالي. وقد أرجع النظام السبب الجذري الأكثر ترجيحًا إلى انقطاع متكرر في التغذية الكهربائية للجهاز، مع الإشارة إلى أن نمط التكرار يدل على مشكلة غير مستقرة تتطلب تدخّلًا ميدانيًا. كما هو موضح بالشكل (5-6).

الشكل (5-6): الإنذار Device power down

أما في الحالة الثانية، فقد تم رصد إنذار LTE cell outage بعدد أكبر من مرات التكرار في الموقع نفسه. وعلى الرغم من توفر تشخيص لهذا الإنذار داخل قاعدة المعرفة، فإن تكراره المتواصل وتأثيره المباشر على توفر الخدمة دفع الوكيل إلى عدم الاكتفاء بالاسترجاع المباشر، والانتقال إلى نمط تشخيص هجين (KB + LLM)، وقد مكّن هذا النهج الوكيل من دمج المعرفة القاعدية مع تحليل سياقي أوسع، انتهى إلى تشخيص يشير إلى احتمال وجود عطل منطقي أو مادي في الراديو أدى إلى توقف الخلية عن البث بشكل متكرر كما هو موضح بالشكل (5-7).

الشكل (5-7): الإنذار LTE cell outage

يُظهر هذا السيناريو المركّب أن قرار الوكيل التشخيصي لا يعتمد فقط على نوع الإنذار أو توفر سجل معرفي مسبق له، بل يتأثر بشكل مباشر بسلوك الإنذار عبر الزمن، وعدد مرات تكراره، وتأثيره التشغيلي على توفر الخدمة، وفي كلتا الحالتين، لعب التكرار دورا حاسما في تغيير استراتيجية التشخيص، والانتقال من معالجة الحدث الفردي إلى تحليل نمط العطل.

وقد قيّم المهندس المختص مخرجات التشخيص في الحالتين بتقدير "ممتاز"، مما يعكس توافق التشخيص المقترح مع المنطق الهندسي التشغيلي، ودقة توجيه الإجراءات التصحيحية المقترحة، ويؤكد هذا التقييم أن اعتماد الوكيل على الاستنتاج المدعوم بالنموذج اللغوي، سواء في غياب المعرفة القاعدية أو عند وجودها، كان مبررا وذا قيمة عملية عالية في سياق الأعطال المتكررة.

تبيّن هذه الحالة المركّبة قدرة النظام على التكيّف مع السياق التشغيلي المتغيّر، والتعامل مع الإنذارات المتكررة بوصفها مؤشرات على أعطال مزمنة، لا مجرد أحداث منفصلة، وهو ما يعزز من دوره كنظام دعم قرار هندسي فعّال في بيئات تشغيل الشبكات الخلوية.

4.7.5 التحقق من قابلية توسّع قاعدة المعرفة وتغيّر سلوك الوكيل

يتناول هذا الجزء تجربة النظام عند إضافة مفاهيم تشخيصية جديدة إلى قاعدة المعرفة، وتحليل أثر ذلك على سلوك الوكيل التشخيصي وخياراته في الاعتماد على المعرفة المتاحة أو الاستنتاج اللغوي.

في المرحلة الأولى، تم رصد إنذار Input power-off أثناء اختبار النظام باستخدام مجموعة إنذارات تشغيلية، حيث لم يكن لهذا الإنذار مفهوم مناسب داخل قاعدة المعرفة في ذلك الوقت، ونتيجة لذلك، اعتمد الوكيل التشخيصي على الاستنتاج القائم على النموذج اللغوي فقط (LLM-only) لتوليد التشخيص كما هو موضح بالشكل (5–8).

الشكل (5–8): الإنذار input power off قبل التعديل

بعد ذلك، تم تعديل التشخيص الخاص بهذا الإنذار وفق منطق هندسي سليم، بحيث يعبّر عن فقدان التغذية الكهربائية الداخلة للموقع دون افتراض وجود عطل داخلي مؤكد في العتاد، ثم تم اعتماد هذا التشخيص وحفظه كمفهوم جديد ضمن قاعدة المعرفة، ليصبح جزءًا من المعرفة التشغيلية المتاحة للنظام.

في المرحلة اللاحقة، أُعيد اختبار النظام باستخدام ملف إنذارات مختلف يحتوي على الإنذار نفسه، دون إجراء أي تعديل إضافي على منطق الوكيل أو آلية اتخاذ القرار، وأظهرت نتائج هذا الاختبار أن الوكيل التشخيصي استطاع استرجاع التشخيص مباشرة من قاعدة المعرفة، دون الحاجة إلى تفعيل النموذج اللغوي، حيث تغيّر نمط عمل الوكيل من LLM-only إلى KB-only كما هو موضح بالشكل (5-9).

الشكل (5-9): الإنذار input power off بعد التعديل والحفظ

تُبرز هذه النتيجة أن النظام لا يعتمد على النموذج اللغوي كحل ثابت، بل يستخدمه كآلية داعمة مؤقتة عند غياب المعرفة المناسبة، في حين يعود تلقائيًا إلى الاسترجاع القائم على قاعدة المعرفة فور توفر مفهوم موثّق وملائم، كما توضح أن قاعدة المعرفة في النظام قابلة للتوسّع التدريجي، وأن إضافة تشخيص واحد بشكل منهجي يمكن أن تؤثر مباشرة على سلوك الوكيل في الاختبارات اللاحقة.

يعكس هذا السلوك قابلية النظام للتكيّف مع بيئة التشغيل، وتراكم الخبرة التشغيلية بمرور الوقت، مما يعزز من موثوقيته كنظام دعم قرار هندسي، ويؤكد أن دوره لا يقتصر على توليد تشخيصات آنية، بل يمتد إلى بناء معرفة قابلة لإعادة الاستخدام في سيناريوهات مستقبلية.

8.5 مناقشة النتائج والقيود

بعد عرض نتائج التقييم العملي وتحليل سلوك النظام في سيناريوهات تشغيلية مختلفة، تأتي هذه الفقرة لمناقشة ما تعنيه هذه النتائج فعليًا، وما الذي يمكن استخلاصه منها على مستوى القيمة الهندسية للنظام، إضافة إلى توضيح القيود التي ظهرت أثناء التجربة، ووضعها في إطارها العلمي الصحيح.

1.8.5 نقاط القوة

أظهرت النتائج أن النظام المقترح يمتلك مجموعة من نقاط القوة التي تعكس المنهجية المتبعة في تصميمه، ويبرز في مقدمة هذه النقاط التنظيم الهيكلي لقاعدة المعرفة، الذي مكّن من تمثيل المفاهيم التشخيصية بصورة واضحة وقابلة للاسترجاع، وساهم في تحقيق أداء مستقر عند التعامل مع الإنذارات المعيارية والواضحة.

كما اتّسمت مخرجات النظام بدرجة عالية من التوافق المنطقي، سواء في الحالات التي تم فيها الاعتماد على الاسترجاع المباشر من قاعدة المعرفة، أو في الحالات التي استدعت تدخل النموذج اللغوي، ففي جميع السيناريوهات، حافظ النظام على تقديم تشخيصات منطقية ومترابطة، تتوافق مع المعرفة التشغيلية المتعارف عليها، دون اللجوء إلى استنتاجات قطعية غير مدعومة بالمعطيات المتاحة.

إضافة إلى ذلك، برز الدور العملي للنظام في دعم قرار المهندس كأحد أهم الجوانب الإيجابية، حيث ساعد على تقليل الجهد التحليلي الأولي، وتوجيه التفكير الهندسي نحو مسارات فحص معقولة، خاصة عند التعامل مع عدد كبير من الإنذارات المتزامنة أو المتكررة، وبهذا، يتضح أن قيمة النظام لا تكمن في استبدال الخبرة البشرية، بل في تعزيزها وتسهيل عملية اتخاذ القرار.

2.8.5 القيود الحالية للنظام

على الرغم من النتائج الإيجابية، كشفت التجربة التطبيقية عن مجموعة من القيود التي ينبغي أخذها في الاعتبار عند تقييم النظام؛ تتمثل هذه القيود في اعتماد النظام على محتوى قاعدة المعرفة، حيث ترتبط جودة التشخيص المسترجع بشكل مباشر بمدى اكتمال ودقة المفاهيم المخزّنة فيها، وفي الحالات التي لا تتوفر فيها معرفة مناسبة، يضطر النظام إلى الاعتماد على الاستنتاج اللغوي، وهو ما يؤدي بطبيعته إلى تشخيصات احتمالية تحتاج إلى تحقق ميداني إضافي.

كما لوحظ أن أداء النظام يتأثر بدرجة وضوح صياغة الإنذار، إذ إن الإنذارات ذات الصياغة العامة أو الغامضة تقلل من فعالية الاسترجاع المباشر، ويُعد هذا القيد انعكاسًا مباشرًا لطبيعة الإنذارات التشغيلية في شبكات الاتصالات، التي تختلف صياغتها باختلاف الموردين والأنظمة المستخدمة.

3.8.5 تفسير القيود في الإطار العلمي

يمكن تفسير القيود المذكورة أعلاه في طبيعة الأنظمة الذكية الهجينة، التي تجمع بين قواعد المعرفة والاستنتاج المدعوم بالنماذج اللغوية، فغياب مرجعية تشخيصية مطلقة في مجال إنذارات الشبكات الخلوية يجعل من غير الواقعي توقع تشخيص واحد صحيح في جميع الحالات، ويبرر الاعتماد على تفسيرات مرنة تتكيف مع السياق المتاح.

كما أن تأثر النظام بصياغة النص يُعد سمة شائعة في الأنظمة المعتمدة على التحليل اللغوي والاسترجاع الدلالي، خاصة في البيئات التشغيلية غير المعيارية، ولا يُنظر إلى هذا التأثر بوصفه قصورا بقدر ما يعكس تعقيد البيانات التشغيلية وتنوعها.

9.5 ربط النتائج بأهداف المشروع

يهدف هذا القسم إلى ربط النتائج التي تم التوصل إليها في الفصل الحالي بالأهداف التي وُضعت في بداية المشروع، وتقييم مدى تحققها في ضوء الأداء الفعلي للنظام أثناء الاختبارات التطبيقية.

فيما يخص هدف هيكلة المعرفة الهندسية، أظهرت النتائج أن بناء قاعدة معرفة منظمة وربط الإنذارات التشغيلية بمفاهيمها التقنية قد مكّن النظام من التعامل بكفاءة مع الإنذارات المعيارية، حيث تمكن الوكيل في استرجاع التشخيص مباشرة من قاعدة المعرفة في عدد من الحالات دون الحاجة إلى تدخل استنتاجي، مما يعكس سلامة البنية المعرفية المعتمدة وقابليتها للتوسّع.

أما هدف تطوير وكيل استدلالي هجين، فقد تحقق بوضوح من خلال قدرة الوكيل على الانتقال الذكي بين الاسترجاع القائم على خوارزمية (TF-IDF) والاستنتاج المدعوم بالنموذج اللغوي عند التعامل مع الإنذارات الغامضة أو المتكررة، ويؤكد هذا السلوك سلامة التصميم في تحقيق توازن عملي بين دقة الأنظمة الخبيرة ومرونة الذكاء الاصطناعي التوليدي.

وبالنسبة لهدف ضبط السلوك الاستنتاجي وتقديم مخرجات منظمة، أظهرت النتائج أن النظام حافظ على تقديم تشخيصات بصيغة واضحة ومهيكلة، تتضمن توصيف الحالة والسبب الجذري المحتمل والإجراءات المقترحة، مما ساعد في جعل المخرجات قابلة للفهم والاستخدام من قبل المهندس في سياق اتخاذ القرار السريع.

وأخر الأهداف التحقق والتقييم، فتم تحقيقه عبر استبيان موجّه لخبراء مختصين لتقييم مخرجات تشخيص النظام، حيث أظهرت النتائج توافقًا عامًا مع المنطق الهندسي التشغيلي، مع تصنيف معظم التشخيصات ضمن المستويات الجيدة أو الممتازة.

بناءً على ذلك، يمكن القول أن النظام المقترح قد لبّى أهدافه الأساسية بدرجة مرضية، وأتاح قيمة هندسية عملية تدعم دور المهندس وتسهم في تحسين عملية تشخيص إنذارات شبكات LTE.

الفصل السادس

الاستنتاجات والتوصيات

1.6 المقدمة

تناول هذا المشروع تصميم وتنفيذ نظام ذكي لدعم تشخيص إنذارات شبكات LTE، قائم على دمج قاعدة معرفة هندسية مع وكيل تشخيصي قادر على الانتقال المرن بين الاسترجاع المعرفي والاستنتاج المدعوم بالنماذج اللغوية حسب طبيعة الحالة التشغيلية، وقد تم تقييم النظام باستخدام بيانات تشغيلية حقيقية، مما أتاح تحليل سلوكه في سيناريوهات متنوعة شملت إنذارات واضحة، وأخرى غامضة، وحالات متكررة ذات تأثير تشغيلي.

يستعرض هذا الفصل أهم الاستنتاجات المستخلصة من نتائج التقييم العملي، مع تقديم توصيات مستقبلية تهدف إلى تطوير النظام وتعزيز دوره كنظام دعم قرار هندسي في بيئات تشغيل الشبكات الخلوية.

2.6 الاستنتاجات

من خلال تحليل نتائج التقييم العملي للنظام المقترح لتشخيص إنذارات شبكات LTE، تم التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات التي تعكس فعالية التصميم المعتمد ودوره في دعم القرار التشغيلي، ويمكن تلخيصها فيما يلي:

1. بيّنت النتائج أن الاعتماد على قاعدة معرفة هندسية منظمة يمكّن النظام من التعامل بكفاءة مع الإنذارات المعيارية والواضحة، حيث استطاع الوكيل استرجاع تشخيصات دقيقة دون الحاجة إلى تدخل استنتاجي إضافي.
2. أظهر التحليل أن دمج الاسترجاع المعرفي(RAG) مع الاستنتاج اللغوي (LLM Reasoning) يحقق توازنا عمليا بين موثوقية الأنظمة الخبيرة ومرونة الذكاء الاصطناعي التوليدي، دون الادعاء بتقديم تشخيص قطعي في غياب معطيات كافية.
3. أوضحت النتائج أن غياب المعرفة المسبقة لا يؤدي إلى فشل النظام، بل يدفع الوكيل إلى تفعيل نمط استنتاجي مرن قائم على النموذج اللغوي وهندسة الأوامر، ما يسمح بتغطية تشخيصية كاملة للإنذارات التشغيلية ضمن العينة المختبرة.
4. أكدت دراسات الحالة أن سلوك الوكيل التشخيصي لا يعتمد فقط على نص الإنذار، بل يتأثر بالسياق الزمني ونمط التكرار والتأثير التشغيلي، مما يعكس قدرة النظام على الانتقال من معالجة الحدث الفردي إلى تحليل نمط العطل.
5. أثبتت تجربة توسيع قاعدة المعرفة أن النظام قابل للتعلّم المستمر، أدى إدراج مفهوم تشخيصي واحد إلى تغيير مباشر في سلوك الوكيل في الاختبارات اللاحقة، والانتقال من الاستنتاج اللغوي(LLM Reasoning) إلى الاسترجاع المباشر (RAG).

6. من الناحية التشغيلية، أظهر النظام استقرارا في الأداء وسهولة في استخدام الواجهة، مع تقديم مخرجات منظمة تسهم في تقليل الجهد التحليلي الأولي ودعم عملية اتخاذ القرار لدى مهندسي تشغيل الشبكات.
7. تشير النتائج إلى أن القيمة الأساسية للنظام تكمن في كونه نظام دعم قرار هندسي، يعزز خبرة المهندس ولا يستبدلها، من خلال تقديم تفسيرات هندسية منطقية، قابلة للتنفيذ والتحقق الميداني، ومتوافقة مع المعرفة التشغيلية المتعارف عليها.
8. يُثبت المشروع إمكانية توظيف الأنظمة الذكية الهجينة في مجال تشخيص إنذارات شبكات الاتصالات، من خلال الجمع بين قاعدة معرفة هندسية منظمة وآليات تحليل لغوي داعمة، بما يتجاوز حدود الأنظمة التقليدية المعتمدة على القواعد الثابتة فقط.
9. بيّن النظام أن اعتماد نماذج لغوية محلية في عملية التحليل يساهم في تعزيز الخصوصية والأمن، حيث تتم معالجة بيانات الإنذارات داخل بيئة النظام دون الحاجة إلى إرسالها إلى منصات خارجية. ويُعد هذا النهج مناسبًا لبيئات التشغيل التي تتطلب سيطرة كاملة على البيانات وحماية معلومات الشبكة.
10. أظهرت نتائج التقييم أن اعتماد منهجية قائمة على المنطق الهندسي التشغيلي، بدل الاقتصار على المقاييس الرقمية البحتة، كان مناسبًا لطبيعة إنذارات الشبكات الخلوية، وأسهم في تقديم تقييم أكثر واقعية للقيمة العملية للنظام.

3.6 التوصيات والآفاق المستقبلية

وبناءً على نتائج التقييم والاستنتاجات السابقة، تُقترح مجموعة من التوصيات لتطوير النظام وتحسين أدائه مستقبلاً.

1. تطوير آلية الاسترجاع بأسلوب هجين (تقليدي – دلالي)

يوصى بتطوير آلية الاسترجاع المعتمدة في النظام لتعمل بأسلوب هجين يجمع بين الخوارزميات التقليدية القائمة على المطابقة الإحصائية، مثل TF-IDF، وآليات الاسترجاع الدلالي المعتمدة على التضمين (Embeddings)، و يتيح هذا الدمج الاستفادة من كفاءة ودقة الاسترجاع التقليدي في الحالات المباشرة، مع تعزيز قدرة النظام على فهم السياق الدلالي للأوصاف المعقدة أو غير النمطية، خاصة عند توسّع قاعدة المعرفة أو تنوّع صيغ الإنذارات الشبكية.

2. توسيع قاعدة المعرفة التشخيصية ونطاق سيناريوهات الأعطال

يوصى بتوسيع قاعدة المعرفة المعتمدة في النظام تدريجيًا من خلال إدراج عدد أكبر من المفاهيم التشخيصية الموثقة، لا سيما للإنذارات الشائعة والمتكررة في بيئات التشغيل الفعلية، بهدف زيادة نسبة الاعتماد على الاسترجاع المباشر وتقليل الحاجة إلى الاستنتاج اللغوي في المراحل المتقدمة من تشغيل النظام. كما يُوصى بتوسيع نطاق الاختبارات ليشمل سيناريوهات أعطال متنوعة وأجيالًا شبكية أخرى، للتحقق من قابلية تعميم النظام ومرونته عند التعامل مع أنماط أعطال مختلفة، مع التأكيد على أن البنية المعمارية الحالية صُممت بصورة قابلة للتوسّع دون الحاجة إلى تغييرات جوهرية.

3. تحويل قاعدة المعرفة إلى قاعدة بيانات

يُقترح تحويل قاعدة المعرفة المعتمدة في النظام إلى قاعدة بيانات مثل نوع MySQL, SQLite ، لما توفره من تنظيم أفضل للمعرفة التشخيصية، ودعم فعال للتعامل مع تزايد حجم البيانات، ويسهم هذا التحول في تحسين كفاءة عمليات الاسترجاع، وتسهيل تحديث المفاهيم التشخيصية، وتعزيز قابلية توسّع النظام واستقراره عند الاستخدام في بيئات تشغيلية أكبر.

4. توسيع البنية الحالية نحو نظام متعدد الوكلاء

يعتمد النظام الحالي على وكيل ذكي مركزي يدمج بين مهام الاسترجاع والتحليل واتخاذ القرار، ويوصى بتوسيع هذه البنية نحو نظام متعدد الوكلاء (MAS) عند التوسع في حجم البيانات أو نطاق الشبكة، من خلال توزيع المهام بين وكلاء متخصّصين، مما يسهم في تحسين قابلية التوسع، وتقليل العبء الحسابي، وزيادة مرونة النظام واستقلاليته في البيئات التشغيلية واسعة النطاق.

5. دمج مؤشرات الأداء الشبكي (KPIs) مع التحليل النصي للأعطال

يوصى بتعزيز النظام عبر دمج مؤشرات الأداء الشبكي الفعلية، مثل RSRP وSINR وThroughput وMTTR، مع أوصاف الأعطال النصية، بما يسمح للوكلاء الأذكياء بربط الأعراض اللغوية بالقيم العددية الدالة على حالة الشبكة، ويسهم هذا التكامل في الانتقال من التحليل الوصفي للأعطال إلى تحليل سببي أكثر دقة، ويدعم تمكين الوكيل من تقييم شدة العطل وأولويته التشغيلية ضمن إطار قرار وكيلي أكثر نضجًا.

6. توظيف نماذج لغوية أكبر عند توفر موارد حوسبة أعلى

يوصى باستخدام نماذج لغوية أكبر وأكثر تطورا في حال توفر موارد حوسبة أعلى، حيث تم اختيار النموذج المستخدم في هذا المشروع بما يتناسب مع إمكانيات جهاز ذي مواصفات متوسطة، ومن المتوقع أن يسهم ذلك في تحسين عمق التحليل اللغوي، وتعزيز فهم الحالات المعقدة أو غير النمطية.

7. تطوير واجهة التفاعل ودعم التمثيل المكاني للأعطال

يوصى بتطوير واجهة المستخدم مستقبلا لتشمل وسائل عرض بصري متقدمة، مثل الخرائط الحرارية (Heat Maps)، التي تبيّن التوزيع المكاني لمواقع الأعطال أو الخلايا المتأثرة، ويساعد هذا التمثيل البصري مهندسي الشبكات على اكتشاف الأنماط المكانية للأعطال بسرعة، ودعم اتخاذ القرار في عمليات الصيانة والتخطيط الشبكي.

8. استكمال التحول نحو الذكاء الاصطناعي الوكيلي

يُظهر النظام مستوى ناضجًا من السلوك الوكيلي، يتمثل في قدرته على توجيه عملية التشخيص ذاتيًا واختيار المسار التحليلي المناسب لكل إنذار وفق معايير الثقة والغموض، وهو ما يميّزه عن أنظمة التشخيص التقليدية المعتمدة على مسار ثابت.

ومع ذلك، فإن هذا السلوك ما يزال محصورًا ضمن نطاق تشخيصي محدد مسبقًا، مرتبط بطبيعة البيانات المتاحة وحدود التكامل مع عناصر الشبكة التشغيلية.

وعليه، يُقترح في الأعمال المستقبلية تعزيز استقلالية الوكيل تشغيليًا، من خلال توسيع نطاق قراراته لتشمل إدارة السيناريوهات المركّبة، وربط نتائج التشخيص بسياق تشغيلي أوسع، بما يدعم الانتقال التدريجي من وكيل تشخيصي موجه إلى وكيل تشغيلي داعم لاتخاذ القرار، مع الإبقاء على دور المهندس البشري كعنصر إشرافي نهائي.

المراجـــع

المراجع

[1] E. Edozie, A. N. Shuaibu, B. O. Sadiq, and U. K. John, "Artificial intelligence advances in anomaly detection for telecom networks," *Artif. Intell. Rev*., vol. 58, art. no. 100, Jan. 2025, doi: 10.1007/s10462-025-11108-x.

[2] A. Vitui and T.-H. Chen, "Empowering AIOps: Leveraging large language models for IT operations management," in Proc. FSE '25, Trondheim, Norway, June 2025.

[3] L. Zhang et al., "A survey of AIOps in the era of large language models," *J. ACM*, vol. 37, no. 4, art. no. 111, 2025.

[4] L. Cerdà-Alabern, G. Iuhasz, and G. Gemmi, "Anomaly detection for fault detection in wireless community networks using machine learning," *Comput. Commun*., vol. 202, pp. 191–203, 2023.

[5] G. P. Koudouridis, S. Shalmashi, and R. Moosavi, "An evaluation survey of knowledge-based approaches in telecommunication applications," *Telecom*, vol. 5, no. 1, pp. 98–121, 2024, doi: 10.3390/telecom5010006.

[6] L. Huang, M. Zhao, L. Xiao, X. Zhang, and J. Hu, "Chat3GPP: An open-source retrieval-augmented generation framework for 3GPP documents," in Proc. *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC),* Dubai, UAE, Apr. 2024, pp. 1–6.

[7] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Oxford, U.K.: Academic Press, 2011.

[8] M. J. Alam, M. R. Hossain, S. Azad, and R. Chugh, "An overview of LTE/LTE-A heterogeneous networks for 5G and beyond," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol*., vol. 34, no. 7, art. no. e4806, 2023, doi: 10.1002/ett.4806..

[9] ITU-T, "Definitions of terms related to quality of service," Recommendation E.800, Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, Sep. 2008.

[10] Key performance indicators (KPIs) for radio access mobile networks, ITU-T Tech. Rep. ESTR-KPI-RAN, Geneva, Switzerland, June 2022.

[11] Telecommunication management; Fault Management; Part 3: Alarm Integration Reference Point (IRP): Common Object Request Broker Architecture (CORBA) Solution Set (SS), 3GPP TS 32.111-3 V6.3.0, June 2005.

[12] Telecommunication management; Fault Management; Part 2: Alarm Integration Reference Point (IRP): Information Service (IS), 3GPP TS 32.111-2 V14.0.0, Apr. 2017.

[13] M. Nordin, "Implementing a monitoring system using PRTG," Bachelor's thesis, Helsinki Metropolia Univ. Appl. Sci., Helsinki, Finland, Aug. 2021.

[14] A. Y. Daud, J. X. Tan, and W. J. Ooi, "Paessler Router Traffic Grapher (PRTG) network monitoring: An implementation process in Vitrox," J. Digit. Syst. Dev., vol. 2, no. 2, pp. 1–11, Oct. 2024, doi: 10.32890/jdsd2024.2.2.1.

[15] M. Nouioua, P. Fournier-Viger, G. He, F. Nouioua, and M. Zhou, "A survey of machine learning for network fault management," in Machine Learning and Data Mining for Emerging Trend in Cyber Dynamics, H. Wang et al., Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2021, pp. 3–27.

[16] J. Xu et al., "On-device language models: A comprehensive review," arXiv preprint arXiv:2409.00088, Sep. 2024.

[17] R. Zhang et al., "Toward Agentic AI: Generative information retrieval inspired intelligent communications and networking," arXiv preprint arXiv:2405.09756, 2024.

[18] H. Tan, "A brief history and technical review of the expert system research," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 242, p. 012111, Sep. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/242/1/012111.

[19] J. R. Wright and G. T. Vesonder, "Expert systems in telecommunications," Expert Syst. Appl., vol. 1, no. 2, pp. 127–136, 1990.

[20] A. Vaswani et al., "Attention is all you need," in Proc. 31st Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS), Long Beach, CA, USA, Dec. 2017, pp. 5998–6008.

[21] Y. Gao et al., "Retrieval-augmented generation for large language models: A survey," arXiv preprint arXiv:2312.10997, 2023.

[22] W. Yulita et al., "Automatic scoring using Term Frequency Inverse Document Frequency and Cosine Similarity," Sci. J. Informat., vol. 10, no. 2, pp. 93–102, May 2023, doi: 10.15294/sji.v10i2.35694.

[23] G. Dodig-Crnkovic and M. Burgin, "A systematic approach to autonomous agents," Philosophies, vol. 9, no. 2, Art. no. 44, Apr. 2024, doi: 10.3390/philosophies9020044.

[24] C. Tsatsoulis and L.-K. Soh, "Intelligent agents in telecommunication networks," in Computational Intelligence in Telecommunications Networks, W. Pedrycz and A. V. Vasilakos, Eds. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000, pp. 327–364.

الملاحق

الملحق (أ)

بنية ملفات قاعدة المعرفة المستخدمة في النظام

يعرض هذا الملحق البنية التفصيلية لملفات قاعدة المعرفة التي يعتمد عليها النظام المقترح في توحيد الإنذارات، تصنيف الأعطال، ودعم عملية التشخيص الذكي. وقد صُممت هذه الملفات لتغطي الجوانب التشغيلية والمعرفية والتعلمية للنظام، بما يضمن قابلية التوسّع والتفسير وتحسين الأداء مع مرور الوقت.

أ–1 ملف الإنذارات (Alarms Dictionary File)

يمثل ملف الإنذارات القاموس الفني الرئيسي للنظام، حيث يحتوي على التعريفات القياسية للإنذارات كما وردت في وثائق المورّدين. ونظرا لاختلاف أساليب التسمية والترقيم بين الشركات المصنّعة، فقد صُمم هذا الملف ليعمل كطبقة توحيد، مما يسهّل على النظام تفسير الإنذارات وربطها ببقية مكونات قاعدة المعرفة. يوضح الجدول (أ–1) أعمدة ملف الإنذارات.

جدول (أ-1): أعمدة ملف الإنذارات

اسم العمود	الوصف
Vendor	الشركة المصنّعة للمعدات مثل (Huawei أوSamsung)
alarm_id	المعرّف الرقمي الفريد للإنذار، ويُستخدم كمفتاح أساسي لربط الجداول
alarm_name	الاسم الرسمي للإنذار كما يظهر لفرق التشغيل
technical_desc	الوصف الفني لطبيعة العطل وسبب إطلاق الإنذار
affected_element	المكوّن الشبكي المتأثر مثل (BBU أوRRH)
Severity	درجة خطورة الإنذار(Critical / Major / Minor)
service_impact	التأثير العام للعطل على الخدمة (توقف كلي أو جزئي)
availability_loss_level	مستوى تأثير العطل على مؤشرات الأداء(KPIs) مثل انخفاض التوفر أو ارتفاع معدل انقطاع المكالمات.

أ–2 ملف المفاهيم (Concepts File)

تختلف صياغة الإنذارات بين المورّدين، إلا أنها غالبا ما تشير إلى مفهوم تشخيصي واحد. ويهدف ملف المفاهيم إلى توحيد تفسير هذه الإنذارات وتحويلها من رسائل تشغيلية خام إلى معانٍ تشخيصية موحّدة. ويمثل المفهوم تجريدًا لعطل تقني قد يظهر عبر إنذارات متعددة صادرة عن شركات مختلفة. يوضح الجدول (أ–2) أعمدة ملف المفاهيم.

جدول (أ-2): أعمدة ملف المفاهيم

اسم العمود	الوصف
concept_id	معرّف موحد للمفهوم يُستخدم داخل النظام مثلC-PWR-01
keywords / regex_patterns	كلمات مفتاحية وأنماط لغوية للكشف عن المفهوم داخل نص الإنذار حتى عند اختلاف الصياغة أو اللغة.
root_cause_Ar/En	وصف السبب الجذري للمشكلة باللغة العربية\الإنجليزية
recommended_actions_ar/en	الإجراءات العملية المقترحة باللغة العربية/الإنجليزية
team_responsible	الفريق الفني المختص بمعالجة هذا النوع من الأعطال مثل فريق الطاقة والنقل

أ-3 ملف التصنيفات (Categories File)

يمثل ملف التصنيفات طبقة تصنيفية عليا تُنظم الأعطال ضمن مجموعات تقنية رئيسية، مثل: Transmission و RFوHardware وEnvironment وService Availability. وقد تم بناء هذا التصنيف بالاعتماد على توصيات معايير 3GPP، إضافة إلى التصنيفات التشغيلية المعتمدة في وثائق المورّدين. يوضح الجدول (أ–3) أعمدة ملف التصنيفات.

جدول (أ-3): أعمدة ملف التصنيفات

اسم العمود	الوصف
category_name	المجال التقني للعطل مثل power أو RF
category_layer	الطبقة الشبكية التي ينتمي إليها العطل مثل physical service أوtransport
team_responsible	الفريق الفني المسؤول عن المعالجة
typical_root_causes	قائمة بالأسباب الشائعة ضمن هذا التصنيف
sla_priority_guideline	مستوى أولوية المعالجة وفق خطورة العطل
ui_color_hex	كود لوني لدعم العرض المرئي في لوحات التحكم

أ-4 ملف التعلم (Learned Concepts File)

يمثل ملف التعلم العنصر التراكمي داخل قاعدة المعرفة، حيث يدمج الخبرة البشرية مباشرة في النظام من خلال تسجيل التصحيحات والاعتمادات التي يجريها المهندسون أثناء مراجعة نتائج الوكيل. ويعمل هذا الملف كطبقة تعلم مستمر تسهم في تحسين دقة النظام مع مرور الوقت. يوضح الجدول (أ-4) أعمدة ملف التعلم.

جدول (أ-4): أعمدة ملف التعلم

اسم العمود	الوصف
learned_id	معرّف فريد لكل عملية تعلم
Source	مصدر التعلّم (مثل اعتماد المستخدم عبر الواجهة)
Site	الموقع الذي ظهر فيه الإنذار
alarm_title	نص الإنذار الأصلي
Severity	درجة خطورة الإنذار
scenario_id	المفهوم أو السيناريو المعتمد بعد المراجعة
agent_mode	نمط عمل الوكيل أثناء المعالجة
root_cause_ar	السبب الجذري كما حدده المهندس
actions_ar	خطوات المعالجة التي أثبتت فعاليتها
kb_match_score	درجة المطابقة النصية
alarm_time / created_at	زمن حدوث الإنذار وزمن تسجيل التعلم

أ-5 ملف سجلّ الأعطال (Alarm History Sheet)

يمثل ملف سجلّ الأعطال الذاكرة التشغيلية للنظام، حيث تُسجّل فيه جميع الأحداث التاريخية للأعطال كما ظهرت فعليا في المحطات. ويُستخدم هذا الملف لتحليل سلوك الأعطال، وقياس تكرارها، وتقييم أداء النظام عبر الزمن. يوضح الجدول (أ-5) أعمدة ملف سجل الأعطال.

جدول (أ-5): أعمدة ملف سجل الأعطال

اسم العمود	الوصف
history_id	معرّف فريد لكل حدث عطل

Site	اسم موقع الإنذار
alarm_title	النص الأصلي للإنذار
Severity	درجة خطورة الإنذار
category_id	الفئة التشخيصية المعتمدة
scenario_id	المفهوم أو السيناريو المرتبط بالعطل
alarm_date	تاريخ حدوث الإنذار
first_seen / last_seen	أول وآخر ظهور للإنذار لحساب مدة العطل بدقة
duration_hours	مدة العطل بالساعات لتقييم شدة تأثيره على أداء الشبكة.
repeat_count	عدد مرات التكرار
agent_mode	نمط عمل الوكيل
created_at	وقت تسجيل الحدث في النظام