https://jsras.rcc.edu.ly/
Vol.3 No.2 (2026), 134-142
Article history:
Received: 1 Jul.2026
Accepted: 13 Sep.2026
Published: 3 Oct.2026

Journal of Sustainable Research in Applied Sciences

JSRAS

# Towards a Bio-Temporal Dynamic Model for Managing Power Grid Collapse in Libya

[1*]Elfeturi Mohamed Madi

Libyan Authority for Scientific Research
fytwrymady05@gmail.com

***keywords***
Power grid collapse, Load management, Time-geography, Smart grids, Libya, .Blackout (Total shutdown)

***Abstract***

Libya faces a chronic electricity crisis that has transcended a mere technical failure to become a comprehensive state crisis. This is manifested in repeated cascading grid collapses and widespread blackouts, with interconnected repercussions for the water, health, telecommunications, and security sectors. This paper presents an innovative technical load-management model based on integrating three interconnected dimensions: the engineering dimension (grid infrastructure), the temporal dimension (time-geography of consumption), and the biological dimension (climatic and environmental impacts). The model relies on deploying smart grid technologies, smart meters, and deep learning algorithms (CNN-LSTM) for ultra-accurate load forecasting, alongside establishing a supervisory control and data acquisition / energy management system (SCADA/EMS) capable of making proactive decisions to isolate areas and dynamically distribute loads. The study aims to shift from a "reactive" logic toward "proactiveness," transforming the electricity crisis from a vicious cycle of collapses into a resilient and adaptive artificial ecosystem

# نحو نموذج ديناميكي حيوي-زمني لإدارة انهيار الشبكة الكهربائية في ليبيا

الفيتوري محمد ماديئ [1*]
الهيئة العامة للبحث العلمي
fytwrymady05@gmail.com

**الكلمات المفتاحية**
انهيار الشبكة الكهربائية، إدارة الأحمال، الجغرافيا الزمنية، الشبكات الذكية، ليبيا، الإظلام التام

***الملخص***

تواجه ليبيا أزمة كهرباء مزمنة تجاوزت كونها مجرد عطل فني إلى أزمة دولة شاملة، تتجلى في انهيارات متسلسلة متكررة للشبكة وإظلام تام لمناطق واسعة، مع تداعيات متشابكة على قطاعات المياه والصحة والاتصالات والأمن. تقدم هذه الورقة نموذجاً تقنياً مبتكراً لإدارة الأحمال يعتمد على دمج ثلاثة أبعاد مترابطة: البعد الهندسي (البنية التحتية للشبكة)، البعد الزمني (الجغرافيا الزمنية للاستهلاك)، والبعد البيولوجي (التأثيرات المناخية والبيئية). يعتمد النموذج على توظيف تقنيات الشبكات الذكية، العدادات الذكية، وخوارزميات التعلم العميق (CNN-LSTM)للتنبؤ الفائق بالأحمال، إلى جانب إنشاء نظام تحكم إشرافي (SCADA/EMS)قادر على اتخاذ قرارات استباقية لعزل المناطق وتوزيع الأحمال بشكل ديناميكي. تهدف الدراسة إلى تجاوز منطق "رد الفعل" نحو "الاستباقية"، وتحويل أزمة الكهرباء من حلقة مفرغة من الانهيارات إلى نظام بيئي اصطناعي مرن وقابل للتكيف

## 1. المقدمة

لم تعد أزمة الكهرباء في ليبيا مجرد خدمة عامة تتعطل بين حين وآخر، بل تحولت إلى امتحان يومي لجدية الدولة وقدرتها على إدارة أبسط مقومات الحياة. ففي المشهد الليبي الراهن، تكررت حوادث الانهيار الكامل للشبكة، حيث شهدت مناطق غرب ليبيا، بما فيها العاصمة طرابلس، انهياراً تاماً للجناح الغربي للشبكة لأكثر من مرة خلال أقل من 24 ساعة. هذه الانهيارات لم تعد تقتصر على الجانب الفني، بل امتدت لتتحول إلى أزمة سياسية وأمنية وخدمية متكاملة.

تشير الأدلة الحديثة إلى أن هشاشة منظومة الكهرباء الليبية ترتبط بتداخل عوامل فنية ومؤسسية وسياسية وأمنية، تشمل تقادم البنية التحتية، وعدم كفاية أعمال الصيانة والاستثمار، ونقص القدرة التوليدية المتاحة مقارنة بالطلب، فضلًا عن التداعيات الممتدة لعدم الاستقرار السياسي والأمني. وقد أدت هذه الظروف إلى انخفاض موثوقية الشبكة وزيادة حساسيتها لفقد وحدات التوليد أو عناصر النقل، ولا سيما خلال فترات الأحمال المرتفعة، بما يزيد احتمالات الانقطاعات الواسعة واضطرابات استقرار المنظومة (Abunuar, 2026; U.S. EIA, 2024).

تتجلى خطورة أزمة الكهرباء في ليبيا في طبيعتها العابرة للقطاعات، إذ لا تقتصر آثار الانقطاعات على قطاع الطاقة، بل تمتد مباشرة إلى الأمن المائي نتيجة اعتماد آبار ومحطات ضخ منظومة النهر الصناعي على التغذية الكهربائية. وتشير دراسة حديثة حول الإمداد المائي في مدينة مصراتة إلى أن الأعطال الفنية والتخريب وانقطاع التيار الكهربائي يمكن أن تؤدي إلى انخفاض ضغط المياه وتراجع الكميات الواصلة إلى خزانات التجميع بنحو 30 – 50% في بعض الفترات، بما يكشف عن الترابط البنيوي بين استقرار الطاقة واستدامة خدمات المياه (Ogab, et.al., 2025). ومن ثم، فإن استمرار اضطرابات الكهرباء قد يحول أزمة الطاقة إلى أزمة مياه، تتسع آثارها بصورة غير مباشرة لتطال الأوضاع الصحية والخدمية والاقتصادية. وهذا الترابط يؤكد ضرورة تجاوز الحلول القطاعية المنفصلة نحو مقاربة تكاملية تربط أمن الطاقة بالأمن المائي واستمرارية الخدمات الأساسية.

والدليل الواقعي على قوة هذه العلاقة أصبح أكثر وضوحًا؛ فقد أعلن جهاز تنفيذ وإدارة مشروع النهر الصناعي في أغسطس 2026 أن الانقطاع الكامل للكهرباء أدى إلى توقف جميع محطات المنظومة، بدءًا من حقول آبار الحساونة وصولًا إلى محطات الضخ في ترهونة والرابطة.

وانطلاقًا من هذا الواقع، تأتي هذه الدراسة لتجاوز التفسير التقليدي لانهيار الشبكة الكهربائية بوصفه خللًا فنيًا منفردًا، والنظر إليه باعتباره ظاهرة ديناميكية مركبة تتطور عبر الزمن وتتأثر بتفاعلات متبادلة بين مكونات المنظومة الكهربائية والعوامل التشغيلية والمؤسسية والأمنية والخدمية . ومن هنا، يتمثل الهدف العام للدراسة في تطوير نموذج ديناميكي حيوي–زمني لإدارة انهيار الشبكة الكهربائية في ليبيا، قادر على تفسير مسارات الانهيار وتحديد نقاط الضعف والعتبات الحرجة ورصد انتقال الاضطراب بين مكونات الشبكة والقطاعات الحيوية المرتبطة بها، بما يسمح بالانتقال من الاستجابة اللاحقة للانقطاع إلى التنبؤ المبكر بالمخاطر، وتعزيز مرونة الشبكة، ودعم قرارات الوقاية والاستجابة والتعافي .وبذلك تسعى الدراسة إلى تقديم إطار تحليلي وتطبيقي يساعد صانعي القرار على فهم الأزمة باعتبارها منظومة مترابطة ومتغيرة زمنيًا، ويؤسس لإدارة أكثر استباقية ومرونة لأمن الطاقة واستمرارية الخدمات الحيوية في ليبيا.

## 2. مشكلة الدراسة

تتمثل مشكلة الدراسة في تكرار حالات عدم الاستقرار والانهيار في الشبكة الكهربائية الليبية في ظل محدودية قدرة الأساليب التقليدية على التنبؤ المبكر بمسارات الانهيار واحتوائها قبل تحولها إلى انقطاعات واسعة النطاق. وتتفاقم المشكلة نتيجة تداخل تقادم البنية التحتية، وتقلب الأحمال، والعوامل الزمنية والمناخية، وضعف التنسيق بين الكهرباء والقطاعات الحيوية المرتبطة بها. ومن ثم، تبرز الحاجة إلى نموذج ديناميكي حيوي–زمني يدمج الأبعاد الهندسية والزمنية والبيئية مع تقنيات الشبكات الذكية والتحليل التنبؤي، بما يدعم الانتقال من إدارة الأزمة بعد وقوعها إلى التنبؤ والاستجابة الاستباقية وتعزيز مرونة الشبكة .

### 2 .1 تساؤلات الدراسة

1. ما العوامل الفنية والتشغيلية والزمنية والبيئية الأكثر تأثيرًا في حدوث وانتشار انهيارات الشبكة الكهربائية في ليبيا؟
2. كيف يمكن توظيف الأنماط الزمنية والمكانية لاستهلاك الكهرباء في التنبؤ بذروة الأحمال ومخاطر عدم استقرار الشبكة؟
3. إلى أي مدى يمكن لتقنيات الشبكات الذكية والعدادات الذكية وخوارزميات LSTM–CNN تحسين التنبؤ بالأحمال والكشف المبكر عن احتمالات الانهيار؟
4. كيف يمكن لنظام EMS/SCADA وإدارة الأحمال الديناميكية الحد من انتشار الأعطال المتسلسلة وحماية القطاعات الحيوية، ولا سيما المياه والصحة والاتصالات؟
5. كيف يمكن بناء نموذج ديناميكي حيوي–زمني متكامل يعزز مرونة الشبكة ويدعم الانتقال من الإدارة التفاعلية إلى الإدارة الاستباقية لأزمات الكهرباء في ليبيا؟

## 3. أهداف الدراسة

1. تحليل العوامل الفنية والتشغيلية والزمنية والبيئية المؤثرة في حدوث وانتشار انهيارات الشبكة الكهربائية الليبية .
2. تحديد أنماط الاستهلاك الزمنية والمكانية وعلاقتها بذروة الأحمال ومؤشرات عدم استقرار الشبكة .
3. تقييم إمكانية توظيف الشبكات والعدادات الذكية وخوارزميات LSTM–CNN في تحسين دقة التنبؤ بالأحمال والإنذار المبكر بمخاطر الانهيار .
4. تحليل دور أنظمة EMS/SCADA وإدارة الأحمال الديناميكية في احتواء الأعطال المتسلسلة والمحافظة على استمرارية الخدمات الحيوية المرتبطة بالكهرباء .
5. تطوير نموذج ديناميكي حيوي–زمني متكامل يجمع الأبعاد الهندسية والزمنية والبيئية والتقنيات الذكية لدعم القرار وتعزيز مرونة واستباقية إدارة الشبكة الكهربائية في ليبيا. ويتسق هذا الهدف مع البنية المقترحة في الدراسة القائمة على البعد الهندسي، والجغرافيا الزمنية، والبعد البيئي/المناخي .

## 4. حدود الدراسة

6. **الحدود الموضوعية:** تركز الدراسة على إدارة مخاطر انهيار الشبكة الكهربائية الليبية والأعطال المتسلسلة من خلال دمج ثلاثة أبعاد رئيسة: البعد الهندسي للشبكة، والبعد الزمني المرتبط بأنماط الأحمال، والبعد البيئي والمناخي، مع توظيف الشبكات الذكية والعدادات الذكية وخوارزميات LSTM–CNN وأنظمة EMS/SCADA ودعم القرار .

- **الحدود المكانية:** تشمل الدراسة منظومة الشبكة الكهربائية في ليبيا، مع الاهتمام بالمناطق والعقد الأكثر تعرضًا لاضطرابات الأحمال والانقطاعات، وبالعلاقة بين الشبكة والقطاعات الحيوية المرتبطة بها.

- **الحدود الزمنية:** تركز الدراسة على الوضع الراهن للشبكة والأزمات والانهيارات الحديثة حتى عام 2026، مع استخدام البيانات الزمنية اليومية والأسبوعية والموسمية اللازمة لبناء وتحليل أنماط الأحمال.

- **الحدود التقنية:** يقتصر النموذج المقترح على التقنيات المرتبطة بـ Smart Grids, Smart Meters, LSTM–CNN, DSS, EMS/SCADA والمستشعرات والبيانات الآنية، ولا يستهدف إعادة تصميم المنظومة الكهربائية الليبية هندسيًا بكامل مكوناتها.

- **الحدود القطاع:** تظل الكهرباء محور الدراسة الأساسي، مع دراسة انعكاسات انهيارها على المياه والصحة والاتصالات والخدمات الحيوية بقدر ارتباط هذه القطاعات بمرونة الشبكة وإدارة أولويات الأحمال، وليس باعتبارها قطاعات مستقلة للدراسة. ويبرر ذلك ما وثقته الدراسة من امتداد آثار الانقطاع الكهربائي إلى المياه والخدمات الأساسية .

## 5. المراجعات الأدبيات

تكشف مراجعة الأدبيات الحديثة أن بحوث مرونة الشبكات الكهربائية انتقلت تدريجيًا من التركيز على زيادة القدرة التوليدية ومعالجة الأعطال المنفردة إلى دراسة الشبكة باعتبارها نظامًا ديناميكيًا معقدًا تتفاعل داخله البنية الكهربائية والأحمال والطقس والاتصالات والبيانات والسلوك التشغيلي. وفي السياق الليبي، تُعد دراسة Almaktar et al. (2020/2021)من الدراسات الأساسية التي ربطت ضعف موثوقية منظومة الكهرباء بالاضطرابات السياسية والحرب وتضرر محطات التوليد وأصول الشبكة وضعف الصيانة، واقترحت أنظمة كهروضوئية صغيرة موزعة ومترابطة محليًا كـ Non-Wires Alternative للحد من الانقطاعات وتحسين الموثوقية. وأظهرت الدراسة جدوى التوليد اللامركزي مقارنة ببعض البدائل التقليدية، وهو ما يقدم أساسًا مهمًا لفكرة المرونة المحلية؛ إلا أنها ركزت بصورة أساسية على PVوالمصغرات الشبكية Microgrids ولم تبنِ نموذجًا للتنبؤ بالانهيار المتسلسل على مستوى المنظومة الوطنية أو تربط الانهيار بأنماط الأحمال الزمنية والقطاعات الحيوية .

وفي اتجاه أكثر ارتباطًا باستقرار الشبكة الليبية، درس Alasali et al. (2023) تأثير ربط محطة شمسية بقدرة 10 MW بالشبكة الليبية، باستخدام نمذجة ومحاكاة لتقييم الجهد والفواقد والتوافقيات ومستويات القصر وأداء منظومة الحماية و Fault Ride-Through. وأظهرت النتائج أن دمج الطاقة الشمسية يؤثر بصورة ملموسة في مستويات تيار القصر وأداء الحماية، وأن ارتفاع اختراق المصادر المتجددة يستلزم تطوير استراتيجيات حماية أكثر تقدمًا. وتتميز الدراسة بارتباطها المباشر بالواقع الفني الليبي، لكنها تظل دراسة استقرار وحماية مرتبطة بدمج PV أكثر من كونها نموذجًا ديناميكيًا للتنبؤ بالانهيار وإدارته، كما أنها لا تدمج السلوك الزمني للأحمال أو الآثار العابرة للقطاعات .

أما Dwivedi et al. (2023) فقد قدموا اتجاهًا أكثر قربًا من المنظور الديناميكي للدراسة الحالية، إذ استخدموا نظرية الشبكات المعقدة Complex Network Theoryلتقييم المرونة التخطيطية والتشغيلية لشبكات التوزيع في ظل المصادر الموزعة والأحداث المتطرفة. واعتمدوا بيانات زمنية للقدرة الفعالة ومؤشرات شبكية لتحديد العقد الحرجة وقدرة النظام على تحمل الظروف غير المرغوبة. وأظهرت الدراسة أن إضافة مصادر الطاقة الموزعة لا تؤدي بالضرورة إلى رفع المرونة بصورة تلقائية، بل يمكن أن تنتج آثارًا عكسية بسبب التقطع والطقس والتعقيد التشغيلي. وتدعم هذه النتيجة جوهر الدراسة الحالية في رفض التفسير الخطي للمرونة، إلا أن نموذج Dwivedi et al. بقي في نطاق شبكة اختبار معيارية ولم يعالج بيئة دولة هشة مؤسسيًا وأمنيًا مثل ليبيا .

وفي مجال الانهيارات المتسلسلة، قدم Islam et al. (2023)مراجعة شاملة للـ Cyber-Physical Cascading Failures، وأوضحوا أن تطور الشبكات الذكية أدى إلى زيادة الاعتماد المتبادل بين الشبكة الكهربائية وشبكات الاتصالات والمعلومات، بحيث يمكن لاضطراب أولي محدود أن ينتقل بين الطبقتين ويتحول إلى فشل واسع النطاق. وأبرزت الدراسة أهمية الرصد والتحكم والحماية المتكاملة لتعزيز المرونة. غير أن هذا المنظور، رغم تقدمه مقارنة بالنماذج الكهربائية الصرفة، يركز بصورة رئيسة على التفاعل السيبراني–الفيزيائي، بينما تتطلب الحالة الليبية توسيع مفهوم الاعتماد المتبادل ليشمل المياه والصحة والاتصالات والظروف الأمنية والمناخية أيضًا .

وتوصلت المراجعة المنهجية لنماذج الانهيارات المتسلسلة في نظم الطاقة ذات الاختراق المتجدد إلى أن النماذج الساكنة وحدها لا تكفي لفهم جميع مراحل الانهيار، وأن النماذج الديناميكية الأكثر تطورًا ضرورية لتحقيق الرصد والتنبؤ والتخفيف من الانهيارات بصورة آنية. كما أبرزت الدراسة التحديات التي يفرضها الانتقال إلى أنظمة طاقة ذات اختراق مرتفع للمصادر المتجددة على الحماية والديناميكيات التشغيلية. وتمثل هذه النتيجة دعمًا نظريًا قويًا للانتقال الذي تتبناه الدراسة الحالية من إدارة الانقطاع بعد وقوعه إلى التنبؤ الديناميكي بمسار الانهيار، لكنها لا تقدم معالجة خاصة بالبيئات ضعيفة البيانات والمؤسسات .

ومن منظور أكثر حداثة، حلل Sami and Naeini (2024) تطبيقات التعلم الآلي في تحليل الانهيارات المتسلسلة، وصنفا استخداماته وفق مراحل تطور سلسلة الانهيار، بدءًا من تقييم المرونة قبل وقوع الاضطراب ووصولًا إلى تحليل النتائج بعد انتهاء السلسلة. وأظهرت المراجعة أن تزايد بيانات الرصد وتطور الخوارزميات الذكية جعلا ML أداة واعدة لاكتشاف أنماط الفشل والتنبؤ بها. ومع ذلك، أشار الباحثان إلى أن التطبيق لا يزال حديثًا وتوجد مسائل مفتوحة عديدة، وهو ما يبرر علميًا توظيف الذكاء الاصطناعي في الدراسة الحالية، لكنه ينبه في الوقت نفسه إلى ضرورة عدم التعامل مع الخوارزمية بوصفها بديلًا عن المعرفة الفيزيائية للشبكة .

كما قدم Venkatanagaraju et al. (2024) مسحًا للانقطاعات الكبرى في أنظمة القوى، ركز على أسباب الإظلام الشامل وتسلسل الأحداث المؤدية إليه وآليات الاستعادة. وتبرز أهمية هذه الأدبيات في التأكيد أن الـ Blackout ليس في العادة حدثًا أحادي السبب، وإنما نتيجة تتابع من الأعطال والاختلالات التشغيلية. إلا أن الدراسات المسحية العالمية تظل محدودة في قدرتها على تفسير الخصائص المحلية لشبكات الدول الهشة؛ لذلك فإن نقل نتائجها إلى الحالة الليبية يتطلب معايرة وفق بنية الشبكة والطلب والمناخ والقدرات المؤسسية المحلية .

وفي جانب المخاطر المناخية، قدم Liu et al. (2025) نموذجًا لتحليل مخاطر الانهيار المتسلسل في نظم القوى تحت تأثير الكوارث الجوية، وربط مخاطر خطوط النقل بانتشار الفشل واقترح استراتيجيات للتخفيف منه. وتدعم هذه الدراسة إدخال المتغير المناخي ضمن تفسير استقرار الشبكة بدل اعتباره متغيرًا خارجيًا ثانويًا. كما أن دراسات المرونة الحديثة للأحداث المتطرفة بينت أن تحديد العقد والخطوط الحرجة يمكن أن يكون أكثر فعالية من تعزيز الشبكة بصورة موحدة .وهذا يتقاطع مباشرة مع البعد البيئي/المناخي في النموذج المقترح للدراسة الحالية، الذي يربط تشغيل الشبكة بموجات الحر والرياح وغيرها من المؤثرات .

وعلى مستوى التحول من الشبكات التقليدية إلى الذكية، قدم Judge et al. (2022) مراجعة واسعة لأطر تطبيق Smart Gridوآثارها وتحدياتها، وأظهرت أن دمج تكنولوجيا المعلومات والاتصالات والقياس المتقدم والتدفق ثنائي الاتجاه والطاقة المتجددة والتخزين يتيح إمكانات self-healingوالتنبؤ وعدم اليقين وتحسين الموثوقية. وفي المقابل، أظهرت الدراسة أن الأمن السيبراني والتوافقية والتكلفة وتعقيد التنفيذ تظل قيودًا حقيقية. ولذلك فإن الدراسة الحالية تتفق معها في اعتبار الشبكة الذكية بنية تمكينية للمرونة، لكنها تختلف عنها في محاولة تكييف هذا المنطق مع سياق ليبي يعاني أصلًا من قصور في البنية التحتية والبيانات والاستقرار المؤسسي

وفي مراجعة أحدث، ناقش Gallegos et al. (2024) تطور شبكات التوزيع نحو الكهرباء المستدامة والشبكات الذكية في إطار الثورة الصناعية الرابعة، وأكدوا أهمية إدارة البيانات، والأتمتة، والعدادات الذكية، والمصادر الموزعة، والطاقة الشمسية، والتفاعل مع المستهلك. كما بينوا أن الانتقال الذكي لا يتعلق بتغيير مصدر التوليد فقط، بل بإعادة تشكيل بنية الإدارة والتشغيل والمعلومات في الشبكة .وهذه النتيجة تدعم دمج FTTH والعدادات والمستشعرات و EMS/SCADA الذي تقترحه الدراسة الحالية، لكنها لا تعالج بصورة مباشرة ديناميكيات الإظلام الشامل في البيئات الهشة.

أما في مجال التنبؤ بالأحمال، فقد قدم Wazirali et al. (2023) مراجعة متقدمة لأساليب ANN و MLو DL في التنبؤ بالطاقة والأحمال داخل الـ Microgridsعبر آفاق زمنية مختلفة، وخلصوا إلى أن دقة التنبؤ تؤثر مباشرة في المخاطر والاستقرار والموثوقية، وأن اختيار الخوارزمية يجب أن يتناسب مع طبيعة البيانات والأفق الزمني .ويؤيد ذلك اعتماد الدراسة الحالية على التعلم العميق، لكنه يكشف أيضًا أن اختيار–CNN LSTMيجب ألا يكون افتراضًا نظريًا فقط، بل ينبغي التحقق منه تجريبيًا مقابل نماذج بديلة.

وفي السياق نفسه، خلص Eren and Küçükdemiral (2024) في مراجعة شاملة للتعلم العميق في التنبؤ قصير الأجل بالأحمال إلى أن الاتجاه البحثي لم يعد منصبًا على زيادة الدقة وحدها، بل أصبح يشمل عدم اليقين، التنبؤ الآني، المتانة، الجدوى العملية، والارتباط ببرامج Demand Responseوتمثل هذه النتيجة نقطة نقدية مهمة للدراسة الحالية؛ إذ إن القيمة الحقيقية لنموذج LSTM–CNN لا ينبغي أن تقاس بـ RMSE أو MAPEفقط، وإنما بقدرته على إصدار إنذار مبكر قابل للتحويل إلى قرار تشغيلي آمن.

وبالمثل، أجرى Biswal et al. (2024) مراجعة لأساليب ML و DL المستخدمة في التنبؤ بأحمال الشبكات الذكية، وقارنوا النماذج وفق MAPEو RMSEو MSE، وأكدوا أهمية النماذج التجميعية والتنبؤ الاحتمالي في إدارة عدم يقين الطلب واستقرار الشبكة .ويشير ذلك إلى أن الاقتصار على نموذج هجين واحد قد لا يكون الخيار الأمثل في جميع الحالات، وأن النموذج الليبي المقترح ينبغي أن يسمح بالمقارنة والتحقق الخارجي وإعادة التدريب مع تغير أنماط الطلب.

وطور Wen et al. (2024) نموذجًا هجينًا قائمًا على التعلم العميق للتنبؤ قصير الأجل وإدارة معلومات الشبكة الذكية، جمع بين GRU و Temporal Convolutional Network لالتقاط العلاقات الزمنية والخصائص الديناميكية المعقدة للأحمال. وأكدت الدراسة أن الأحمال الكهربائية تتميز بعدم اليقين والعلاقات الزمنية طويلة المدى، وأن النماذج الهجينة قادرة على التعامل معها بصورة أفضل من بعض الأساليب المنفردة .وهي نتيجة تتوافق مفاهيميًا مع اختيار نموذج CNN–LSTM في الدراسة الحالية، مع اختلاف أن الهدف هنا لا يقتصر على forecasting وإنما ربط التنبؤ بمنع انتقال الانهيار.

كما أوضحت مراجعة Boopathy et al. (2024)أن تطبيقات التعلم العميق في الشبكات الذكية تتجاوز التنبؤ بالأحمال لتشمل تقدير الحالة، والكشف عن سرقة الطاقة، وتقاسم الطاقة، والتجارة، والاستجابة للطلب، وأن الدمج بين البيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي يسمح بتحديد ساعات الذروة واتخاذ قرارات أكثر استباقية .وفي اتجاه مماثل، وجد Judge et al. (2024)أن الذكاء الاصطناعي أصبح عنصرًا مركزيًا في تحسين تكامل الشبكات الذكية من خلال التنبؤ بالأحمال والطاقة المتجددة والـ Microgridsوجدولة الموارد .ومع ذلك، فإن اتساع التطبيقات في هذه الدراسات يجعلها أطرًا تقنية عامة أكثر من كونها نماذج لإدارة انهيار الشبكة في بيئة وطنية محددة.

وتكتسب دراسة Farkash et al. (2024) أهمية خاصة لارتباطها المباشر بليبيا؛ إذ استخدمت تقنيات ML للتنبؤ متوسط الأجل بالأحمال في محطات شمال بنغازي التابعة للشركة العامة للكهرباء، اعتمادًا على بيانات فعلية، وقارنت عددًا من الخوارزميات. وأظهرت النتائج تفوق Extra Trees Regressorفي التنبؤ بالحمل بدقة بلغت نحو 85%، بينما حقق Huber Regressorأفضل أداء للتنبؤ بالعجز بنحو 77%. كما ربط الباحثون نقص الكهرباء بفشل وحدات توليد كبيرة وتعطل خطوط النقل وذروة الطلب الصيفية .وعلى الرغم من القيمة التطبيقية لهذه الدراسة، فإنها بقيت في نطاق التنبؤ متوسط الأجل لمنطقة بنغازي ولم تربط توقع العجز آنيًا بقرارات عزل الشبكة أو إدارة الأعطال المتسلسلة.

ويأتي عمل Agaal et al. (2025)ليطور هذا الاتجاه الليبي بصورة أكبر؛ إذ قارن ARIMA و SARIMA والانحدار الديناميكي و Exponential Smoothing و XGBoost و LSTM في التنبؤ بالحمل والتوليد والعجز في بنغازي، مع إدخال متغيرات خارجية مثل درجة الحرارة والرطوبة. وأظهرت النتائج تفوق LSTM في تمثيل الأنماط الموسمية وغير المستقرة، وهو دليل مباشر يدعم إدخال البعدين الزمني والمناخي في النموذج الحالي .إلا أن الدراسة نفسها أشارت إلى صعوبة التقاط التقلبات القصيرة وغير المنتظمة في العجز، مما يعني أن التنبؤ وحده لا يكفي وأن الحاجة قائمة لطبقة قرار وتحكم تتعامل مع عدم اليقين.

وفي جانب Demand Response، قدم Akhila et al. (2025) مراجعة شاملة لدور الاستجابة للطلب في بناء بنية طاقة أكثر مرونة، وأظهرت أن Peak Clipping و Load Shifting والمرونة في الطلب يمكن أن تدعم التوازن اللحظي بين العرض والطلب وتزيد مرونة الشبكة، وأن دمج تحليلات البيانات و ML يجعل إدارة الطلب أكثر استباقية . وتلتقي هذه النتيجة بصورة مباشرة مع تصور الدراسة الحالية لطرح الأحمال الذكي، لكنها توضح أيضًا أن نجاح DR لا يعتمد على الخوارزمية فقط، بل على البنية التحتية للقياس، وتصنيف الأحمال، واستجابة المستهلكين والحوافز.

وفي أحدث الأدبيات الليبية، اقترح Abunuar (2026)إطارًا مرحليًا للتحول إلى الشبكة الذكية في ليبيا عبر بنية اتصال ثلاثية المستويات : HAN–NAN–WAN، مع تنفيذ تدريجي قصير ومتوسط وطويل المدى يوازي بين البنية التقنية ورأس المال البشري والاستعداد المؤسسي. وانطلقت الدراسة من تشخيص تقادم الشبكة وضعف الصيانة وعدم الاستقرار السياسي والأمني وتكرار الانقطاعات، مؤكدة أن نماذج الشبكات الذكية المبنية على افتراض بيئات مؤسسية مستقرة لا يمكن نقلها مباشرة إلى دولة هشة .وهذه الدراسة هي الأقرب إلى السياق المؤسسي للبحث الحالي، لكنها تركز على خارطة طريق للتحول الرقمي للشبكة ولا تطور نموذجًا حيويًا–زمنيًا للتنبؤ بالانهيار المتسلسل.

كذلك درس Saeid et al. (2026) إمكانية تطبيق الشبكات الذكية لتحسين كفاءة وموثوقية نظام الكهرباء الليبي، وأكدوا أن العدادات والاتصالات والطاقة المتجددة يمكن أن تساهم في معالجة الانقطاعات والفواقد والاعتماد المرتفع على الوقود الأحفوري، مع تحديد قيود تشمل ارتفاع التكلفة

ومخاطر الأمن السيبراني ونقص المهارات ICT

وعلى الرغم من حداثة الدراسة وارتباطها المباشر بليبيا، فإن طابعها أقرب إلى تقييم إمكانات التطبيق والتحديات منه إلى الاختبار الديناميكي لانتشار الأعطال.

### 1.5 التعقيب النقدي والفجوة البحثية

تكشف المقارنة النقدية بين هذه الدراسات عن ثلاثة مسارات بحثية متقدمة ولكنها ما تزال تسير بصورة متوازية أكثر من كونها متكاملة :الأول يعالج الانهيارات المتسلسلة والمرونة من منظور هندسي وشبكي؛ والثاني يستخدم الشبكات الذكية والذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأحمال وإدارة الطلب؛ والثالث، ولا سيما في ليبيا، يركز على موثوقية الشبكة والطاقة المتجددة والتنبؤ بالأحمال والتحول إلى Smart Grid. وعلى الرغم من القيمة العلمية لهذه المسارات، فإن الأدبيات الليبية الحديثة ما تزال موزعة بين

التوليد اللامركزي(Almaktar et al., 2020/2021) ، استقرار وربط الطاقة الشمسية (Alasali et al., 2023) ، التنبؤ بالأحمال (Farkash et al., 2024; Agaal et al., 2025)، والتحول التدريجي إلى الشبكات الذكية (Abunuar, 2026; Saeid et al., 2026)، دون نموذج واحد يربط حالة الشبكة + الزمن والمكان + الطقس + الحمل + احتمالية الفشل المتسلسل + القطاعات الحيوية + قرار التحكم الاستباقي. وهذا يتطابق مع الفجوة التي حددتها الدراسة الحالية في غياب نموذج ليبي متكامل، والفصل بين الطاقة والقطاعات الحيوية، وضعف البعد الاستباقي والزمني والتوظيف المتقدم للتقنيات الذكية .

ومن هنا لا تتمثل الإضافة العلمية للدراسة الحالية في مجرد استخدام CNN–LSTM؛ فهذا الاستخدام أصبح راسخًا نسبيًا في أدبيات التنبؤ. الإضافة الأكثر تميزًا هي محاولة تحويل التنبؤ إلى منظومة قرار ديناميكية متعددة الأبعاد : Real-time sensing → spatiotemporal load forecasting → climatic/environmental context → cascading-failure risk → critical-sector prioritization → DSS → EMS/SCADA intervention → adaptive recovery. وهذا التوجه يتسق مع هدف الدراسة في تطوير نموذج يجمع الأبعاد الهندسية والزمنية والبيئية والتقنيات الذكية لدعم القرار وتعزيز مرونة الشبكة، ويجعل الدراسة أقرب إلى مساهمة قابلة للتطوير للنشر الدولي من مجرد نموذج تقني إضافي للتنبؤ بالأحمال.

### 2.5 الاسهام العلمي للدراسة

تتمثل الإضافة العلمية الرئيسة لهذه الدراسة في انتقالها من التفسير الجزئي لانهيار الشبكة الكهربائية إلى بناء منظور تكاملي ديناميكي واستباقي يتعامل مع الانهيار بوصفه عملية مركبة تتشكل نتيجة التفاعل بين حالة البنية الكهربائية، والتغيرات الزمنية والمكانية للأحمال، والعوامل المناخية والبيئية، والاعتماد المتبادل بين الكهرباء والقطاعات الحيوية. فبينما توزعت الأدبيات السابقة بين دراسات الانهيارات المتسلسلة، والتنبؤ بالأحمال، والشبكات الذكية، وإدارة الطلب، والمرونة، تقترح الدراسة دمج هذه المسارات في إطار واحد ملائم للسياق الليبي، بما يعالج بصورة مباشرة الفجوة المتمثلة في غياب نموذج يجمع هذه الأبعاد ويحول إدارة الأزمة من الاستجابة اللاحقة إلى الوقاية والتنبؤ المبكر .

ويبرز الإسهام النظري للدراسة في اقتراح مفهوم النموذج الديناميكي الحيوي–الزمني لإدارة الشبكة الكهربائية، الذي يجمع بين ثلاثة أبعاد مترابطة :البعد الهندسي القائم على فهم الأعطال المتسلسلة ومرونة الشبكة، والبعد الزمني–المكاني الذي يفسر أنماط الاستهلاك والذروة اليومية والأسبوعية والموسمية، والبعد البيئي–المناخي الذي يدمج تأثير الحرارة والرياح والظروف البيئية في استقرار الشبكة. وبهذا لا يُنظر إلى الحمل الكهربائي أو المناخ أو حالة الشبكة كمتغيرات مستقلة، بل كمكونات لنظام ديناميكي تتغير علاقاته ودرجة خطورته بمرور الزمن .

أما الإسهام المنهجي والتقني فيتمثل في الربط بين جمع البيانات الآنية بواسطة العدادات الذكية والمستشعرات، والتحليل التنبؤي باستخدام CNN–LSTM، ونظام دعم القرار DSS، وأنظمة EMS/SCADA؛ بحيث لا تنتهي وظيفة الذكاء الاصطناعي عند التنبؤ بالحمل، وإنما تتحول مخرجاته إلى مدخلات لاتخاذ قرارات تشغيلية استباقية تتعلق بعزل مناطق الخطر، وإعادة توزيع الأحمال، وتحديد الأولويات قبل انتقال الاضطراب إلى انهيار متسلسل واسع النطاق .وتتمثل الجدة هنا في بناء سلسلة مترابطة يمكن تلخيصها في الشكل رقم (1).




**شكل 1**. إطار ديناميكي حيوي–زمني للإدارة التنبؤية والتكيفية لانهيارات الشبكة الكهربائية

## 6. المنهجية

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي–التحليلي النقدي المقارن بوصفه الأنسب لطبيعة موضوعها القائم على تفسير ظاهرة انهيار الشبكة الكهربائية في ليبيا وتحليلها في ضوء الأدبيات الحديثة، وليس اختبار نموذج ميداني نهائي في هذه المرحلة. وتم توظيف المنهج الوصفي في عرض وتحليل واقع الشبكة الكهربائية الليبية ومصادر هشاشتها، بما يشمل تقادم البنية التحتية، وتقلب الأحمال، والعوامل التشغيلية والزمنية والمناخية، إضافة إلى الترابط بين قطاع الكهرباء والقطاعات الحيوية الأخرى مثل المياه والصحة والاتصالات. ويتفق هذا التوجه مع مشكلة الدراسة التي تنظر إلى الانهيار باعتباره ظاهرة مركبة ومتعددة الأبعاد، وليس خللًا فنيًا منفردًا .

أما المنهج التحليلي النقدي، فقد استُخدم في مراجعة الدراسات السابقة الحديثة ومناقشة فرضياتها ومناهجها ونتائجها وحدودها، مع التركيز على خمسة مسارات رئيسة :الانهيارات المتسلسلة ومرونة الشبكات، الشبكات الذكية، التنبؤ بالأحمال باستخدام الذكاء الاصطناعي، إدارة الطلب والاستجابة للأحمال، والتأثيرات الزمنية والمناخية والقطاعية .ولم تقتصر المراجعة على تلخيص نتائج الأدبيات، بل تم نقد مدى قدرتها على تفسير الحالة الليبية والكشف عن أوجه القصور المتعلقة بالفصل بين الأبعاد الهندسية والزمنية والبيئية، وضعف الربط بين التنبؤ بالأحمال واتخاذ القرار التشغيلي، ومحدودية دمج القطاعات الحيوية في نماذج إدارة الانهيار. وقد أظهرت المراجعة أن الأدبيات القائمة، رغم تطورها، ما تزال موزعة بين مسارات بحثية متوازية أكثر من كونها متكاملة .

واستُخدم المنهج المقارن لمقارنة الدراسات الدولية والليبية من حيث نطاق الدراسة، ونوع الشبكة محل التحليل، والأدوات المستخدمة، والمتغيرات المدخلة، ونماذج الذكاء الاصطناعي والتنبؤ، وآليات التحكم والاستجابة، ومدى تضمين العوامل المناخية والزمانية والقطاعات الحيوية. وقد سمحت هذه المقارنة بتحديد نقاط الاتفاق والاختلاف بين الاتجاهات البحثية الحديثة، وكذلك تحديد العناصر القابلة للنقل إلى السياق الليبي وتلك التي تتطلب تكييفًا بسبب خصوصية الشبكة المحلية وعدم الاستقرار المؤسسي والأمني وضعف البنية الرقمية. كما استند التحليل إلى مجموعة من الدراسات المنشورة حديثًا في مجلات محكمة ودراسات مرتبطة مباشرة بليبيا خلال الفترة الحديثة، من بينها أعمال حول موثوقية الشبكة الليبية، التنبؤ بالأحمال، دمج الطاقة الشمسية، الشبكات الذكية، والتعلم العميق .

وبناءً على نتائج التحليل النقدي والمقارنة بين الدراسات، تم اعتماد الاستقراء العلمي لبناء الإطار المقترح للدراسة؛ إذ جرى تجميع العناصر المتكررة والمؤثرة في الأدبيات ضمن ثلاثة أبعاد مترابطة :البعد الهندسي للشبكة، والبعد الزمني–المكاني لأنماط الاستهلاك، والبعد البيئي–المناخي،

ثم ربط هذه الأبعاد بمنظومة تقنية تضم المراقبة الآنية، والعدادات الذكية، والمستشعرات، وخوارزمية CNN–LSTM، ونظام دعم القرار DSS، وأنظمة EMS/SCADA. ويهدف هذا التركيب إلى تحويل نتائج المراجعة من معرفة وصفية متفرقة إلى نموذج مفاهيمي متكامل يربط المراقبة الآنية → التنبؤ الزمني–المكاني → تقييم مخاطر الانهيار المتسلسل → ترتيب أولويات القطاعات الحرجة → دعم القرار → التدخل عبر EMS/SCADA → التعافي التكيفي .

وعليه، لا تعتمد هذه الدراسة في مرحلتها الحالية على استبيان أو تجربة تشغيلية مباشرة، بل على تحليل نقدي مقارن ومنهجي للأدبيات والنتائج المنشورة، مدعومًا بالاستقراء وبناء النموذج المفاهيمي المقترح .وتتمثل قيمة هذه المنهجية في قدرتها على تفسير الفجوة البحثية بصورة منظمة، واستخلاص العناصر الأكثر اتساقًا مع السياق الليبي، وصياغة إطار قابل للاختبار والتطوير لاحقًا باستخدام بيانات تشغيلية فعلية للشبكة وبيانات زمنية ومناخية وآنية.

## 7. مناقشة النتائج

تكشف نتائج التحليل الوصفي–النقدي المقارن أن انهيار الشبكة الكهربائية في ليبيا لا يمكن تفسيره بوصفه نتيجة لعجز التوليد أو عطل فني منفرد، وإنما بوصفه عملية ديناميكية متعددة الأسباب والمراحل، تتفاعل فيها حالة البنية التحتية، واختلال التوازن بين العرض والطلب، وأنماط الأحمال الزمنية والمكانية، والظروف المناخية والبيئية، والقدرة التشغيلية والمؤسسية، ثم تنتقل آثار الاضطراب من النظام الكهربائي إلى قطاعات مترابطة معه. وتعد هذه النتيجة جوهرية لأنها تنقل تفسير الأزمة من مفهوم العطل إلى مفهوم المخاطر النظاميةSystemic Risk ؛ أي إن خطورة الحدث الأولي لا تتحدد بحجمه فقط، وإنما بقدرته على الانتشار عبر شبكة تعاني أصلًا من نقاط ضعف مترابطة. ويتسق ذلك مع Almaktar et al. (2021)الذين ربطوا انخفاض موثوقية النظام الكهربائي الليبي بتضرر أصول الشبكة وضعف الصيانة والظروف السياسية والأمنية، إلا أن الدراسة الحالية تتجاوز هذا التشخيص من خلال النظر إلى هذه العوامل بوصفها مدخلات ديناميكية تحدد قابلية الشبكة للانتقال من اضطراب محلي إلى انهيار متسلسل .

وتؤكد النتائج، من ناحية ثانية، أن المرونة الكهربائية لا تتحقق بالضرورة من خلال إضافة قدرة توليدية جديدة فقط، لأن استقرار المنظومة يعتمد كذلك على بنية النقل والحماية والتحكم وطبيعة توزيع الأحمال وقدرة النظام على الاستجابة للاضطرابات. وتتفق هذه النتيجة مع Alasali et al. (2023)، الذين أظهروا في الحالة الليبية أن ربط محطة شمسية بقدرة 10 MWأحدث تغيرات في مستويات تيارات القصر وأداء منظومة الحماية، بما يعني أن إضافة مصادر جديدة للطاقة قد تفرض تحديات تشغيلية وحمائية جديدة إذا لم تتزامن مع تحديث الشبكة. كما تتفق مع Dwivedi et al. (2023)الذين توصلوا إلى أن إضافة موارد الطاقة الموزعة لا تؤدي تلقائيًا إلى زيادة المرونة، بل قد تولد تأثيرات عكسية مرتبطة بالتقطع والطقس والتعقيد التشغيلي. وتدعم هذه المقارنة موقف الدراسة الحالية الرافض للاختزال التقليدي للأزمة في فجوة «التوليد مقابل الطلب»؛ فزيادة التوليد دون تطوير الرصد والحماية والتنبؤ والتحكم قد تخفف عجز الطاقة دون أن تعالج بالضرورة قابلية الشبكة للانهيار المتسلسل .

وتشير النتيجة الثالثة إلى أن الأعطال المتسلسلة تمثل الحلقة الأكثر خطورة في تفسير الإظلام واسع النطاق؛ إذ يمكن لفقد عنصر أو عقدة حرجة أن يعيد توزيع التدفقات والأحمال بطريقة تزيد الضغط على مكونات أخرى، بما يوسع نطاق الاضطراب تدريجيًا. ويتفق هذا الاستنتاج مع Islam et al. (2023)الذين بينوا أن الاعتماد المتبادل بين الشبكة الكهربائية وأنظمة المعلومات والاتصالات يسمح بانتقال الاضطرابات بين الأنظمة وتحول حادث محدود إلى فشل واسع. إلا أن الدراسة الحالية توسع مفهوم الاعتماد المتبادل الذي ركزت عليه تلك الدراسة من الإطار السيبراني–الفيزيائي إلى اعتماد متبادل متعدد القطاعات يشمل الكهرباء والمياه والصحة والاتصالات والخدمات الأساسية. وهذه الإضافة مهمة في الحالة الليبية؛ لأن توقف الكهرباء قد لا يمثل نهاية سلسلة الفشل، بل بداية سلسلة ثانية داخل البنية التحتية الوطنية .

وتدعم الوقائع التي تناولتها الدراسة هذه القراءة؛ إذ تبين أن اعتماد بعض البنى الحيوية، وفي مقدمتها منظومة المياه، على استمرارية الكهرباء يجعل مرونة الشبكة الكهربائية مكونًا من مرونة البنية التحتية الوطنية بأكملها وليس مؤشرًا قطاعيًا منعزلًا. ومن ثم، فإن ترتيب الأحمال أثناء الطوارئ وفق حجم الاستهلاك فقط قد يكون غير كافٍ؛ لأن الحمل الصغير نسبيًا قد تكون له قيمة مجتمعية حرجة إذا كان مرتبطًا بمحطة مياه أو مستشفى أو بنية اتصالات. ولذلك يقترح النموذج الحالي الانتقال من Load Prioritizationالتقليدي إلى Critical-Sector Prioritization، بحيث تدخل أهمية الخدمة وتداعيات فقدها ضمن قرار الاحتفاظ بالحمل أو فصله. وهذه إحدى نقاط التمايز الأساسية للدراسة الحالية عن معظم الأدبيات السابقة التي ركزت على استقرار الشبكة نفسها أكثر من استمرارية الوظائف المجتمعية التي تعتمد عليها .

أما فيما يتعلق بالبعد الزمني–المكاني، فتشير النتائج إلى أن الحمل الكهربائي ليس قيمة ساكنة وإنما ظاهرة زمنية ومكانية متغيرة؛ ولذلك فإن الاعتماد على بيانات كلية أو متوسطات تاريخية وحدها قد يخفي الساعات والمناطق التي تتحول فيها الشبكة إلى حالة حرجة. وتتوافق هذه النتيجة مع Wazirali et al. (2023)الذين أكدوا أن دقة التنبؤ بالأحمال ترتبط مباشرة بالاستقرار والموثوقية وأن اختيار الخوارزمية يجب أن يتوافق مع طبيعة البيانات والأفق الزمني. كما تتفق مع Eren and Küçükdemiral (2024) في أن التنبؤ الحديث لا ينبغي تقييمه من خلال الدقة الإحصائية فقط، وإنما من خلال قدرته على التعامل مع عدم اليقين والتنبؤ الآني والارتباط بآليات الاستجابة للطلب. وبذلك تضيف الدراسة الحالية بعدًا وظيفيًا لمفهوم دقة التنبؤ :التنبؤ الجيد ليس بالضرورة الأكثر دقة رقميًا فقط، وإنما الأكثر قدرة على توفير زمن تدخل كافٍ لمنع تطور الاضطراب إلى انهيار متسلسل .

وتجد هذه النتيجة دعمًا أكثر مباشرة من الدراسات الليبية. فقد توصل Farkash et al. (2024)، باستخدام بيانات فعلية لمحطات شمال بنغازي، إلى قدرة تقنيات التعلم الآلي على التنبؤ بالأحمال، حيث حقق Extra Trees Regressorدقة تقارب 85% في التنبؤ بالحمل، في حين بلغ أداء Huber Regressor في توقع العجز نحو 77%. كما توصل Agaal et al. (2025)، بعد مقارنة نماذج ARIMA وSARIMA وXGBoost وLSTM وغيرها وإدخال متغيرات مثل الحرارة والرطوبة، إلى تفوق LSTMفي تمثيل الأنماط الموسمية وغير المستقرة. وتتفق الدراسة الحالية مع هاتين الدراستين في جدوى التعلم الآلي والعميق للتنبؤ بالطلب والعجز، لكنها تختلف عنهما في موضع التنبؤ داخل النظام؛فالتنبؤ في النموذج المقترح ليس المخرج النهائي، وإنما مرحلة وسيطة تليها عملية تقدير احتمالية الفشل المتسلسل وترتيب القطاعات الحرجة واتخاذ القرار والتدخل التشغيلي

وفي هذا السياق، تشير النتائج إلى وجود أساس علمي قوي لتوظيف CNN–LSTMضمن النموذج المقترح، لأن الطبيعة الزمنية المعقدة للأحمال تتطلب التقاط العلاقات قصيرة وطويلة المدى والأنماط غير الخطية. ويتفق ذلك مفاهيميًا مع Wen et al. (2024)الذين أثبتوا جدوى النماذج الهجينة للتعامل مع العلاقات الزمنية والخصائص الديناميكية

المعقدة للأحمال. كما تؤيد Boopathy et al. (2024)توسيع استخدام التعلم العميق من مجرد التنبؤ إلى تطبيقات الاستجابة للطلب واتخاذ قرارات أكثر استباقية. ومع ذلك، تكشف القراءة النقدية أن تبني CNN–LSTM لا ينبغي أن يتحول إلى افتراض مسبق بتفوقه؛ إذ تؤكد Biswal et al. (2024) أهمية مقارنة الخوارزميات والنماذج التجميعية والاحتمالية. ولذلك فإن النموذج الحالي يجب، عند اختباره ميدانيًا، أن يقارن CNN–LSTM بخوارزميات بديلة باستخدام مؤشرات مثل RMSE و MAEوMAPE، مع إضافة معيار أكثر أهمية تشغيليًا يتمثل في زمن الإنذار المبكر وقدرة التنبؤ على منع أو تقليل حجم الانهيار .

وتكشف النتائج كذلك أن العوامل المناخية والبيئية ينبغي ألا تعامل كمتغيرات خارجية هامشية؛ إذ يمكن لارتفاع درجات الحرارة والظروف الجوية أن تؤثر بصورة مزدوجة في المنظومة، من خلال زيادة الطلب من جهة والتأثير في أداء مكونات الشبكة من جهة أخرى. ويتفق ذلك مع Liu et al. (2025)الذين ربطوا مخاطر الكوارث الجوية بانتشار الأعطال المتسلسلة وأكدوا أهمية تحديد الخطوط والعقد الحرجة بدلًا من تعزيز جميع عناصر الشبكة بالدرجة نفسها. كما توفر نتائج Agaal et al. (2025) في ليبيا دعمًا تطبيقيًا لهذا الاتجاه من خلال إدخال الحرارة والرطوبة ضمن نماذج التنبؤ. وبناءً على ذلك، تفسر الدراسة الحالية العلاقة بين المناخ والحمل واستقرار الشبكة باعتبارها علاقة تفاعلية وليست مجرد علاقة خطية؛ فالموجة الحارة، على سبيل المثال، يمكن أن ترفع الطلب بالتزامن مع زيادة الضغط الحراري على البنية الكهربائية، فتقترب المنظومة من عتبة حرجة يصبح عندها اضطراب محدود أكثر قدرة على توليد سلسلة فشل .

ومن النتائج المهمة أيضًا أن التحول إلى الشبكة الذكية يمثل شرطًا تمكينيًا وليس حلًا مستقلًا .ويتفق هذا الاستنتاج مع Judge et al. (2022) و Gallegos et al. (2024)في أهمية القياس المتقدم، والاتصالات، والأتمتة، والعدادات الذكية، وإدارة البيانات في تحسين موثوقية الشبكات. إلا أن الدراسة الحالية تنتقد النقل المباشر لنماذج Smart Grid المصممة لبيئات ذات بنية اتصالات ومؤسسات مستقرة إلى الحالة الليبية. ويعزز هذا النقد ما توصل إليه Abunuar (2026)من أن التحول الليبي إلى الشبكة الذكية ينبغي أن يكون مرحليًا، بالتوازي مع بناء القدرات البشرية والمؤسسية، وما أشارت إليه الدراسات الليبية الحديثة من تحديات التكلفة وضعف بنية ICT والأمن السيبراني ونقص المهارات. وعليه، فإن نجاح النموذج المقترح يتطلب تحولًا اجتماعيًا–تقنيًا ومؤسسيًا بالتوازي مع التحول الرقمي، وليس مجرد شراء عدادات ومستشعرات وأنظمة تحكم .

وفيما يخص إدارة الطلب، أظهرت المقارنة أن الانتقال من طرح الأحمال التقليدي إلى الإدارة الديناميكية الذكية للأحمال يمثل أحد أكثر المسارات واقعية لتقليل احتمالية الانهيار في الأجل القصير والمتوسط. وتتوافق هذه النتيجة مع Akhila et al. (2025)الذين بينوا أن Peak Clipping وLoad Shiftingومرونة الطلب يمكن أن تعزز التوازن اللحظي بين العرض والطلب، خصوصًا عند دمجها بتحليلات البيانات والتعلم الآلي. إلا أن الدراسة الحالية تضيف قيدًا مهمًا: لا ينبغي أن يستهدف طرح الأحمال تحقيق التوازن الكهربائي فقط، وإنما يجب أن يخضع لمصفوفة أولوية تراعي الأهمية المجتمعية والقطاعية للحمل. ومن ثم، فإن فصل حمل غير حيوي مرتفع الاستهلاك قد يكون أقل ضررًا من فصل حمل محدود يغذي بنية مياه أو صحة أو اتصالات، وهو ما يحول إدارة الطلب من إجراء كهربائي صرف إلى أداة لإدارة مخاطر البنية التحتية الوطنية .

وبناءً على النتائج السابقة، تقترح الدراسة أن الحلقة المفقودة في معظم النماذج السابقة تقع بين التنبؤ والقرار .فالأدبيات قدمت تقدمًا واضحًا في التنبؤ بالأحمال، وتحليل الأعطال، والشبكات الذكية، وإدارة الطلب، إلا أن هذه المسارات ظلت إلى حد كبير منفصلة، وهو ما أكدته المراجعة النقدية للدراسة الحالية. لذلك يمثل الربط بين Real-Time Monitoring → Spatiotemporal Forecasting → Cascading-Failure Risk Assessment → Critical-Sector Prioritization → DSS → EMS/SCADA Intervention → Adaptive Recoveryالنتيجة التركيبية الرئيسة للدراسة. فهذا التسلسل لا يتعامل مع الذكاء الاصطناعي كبديل للمعرفة الهندسية أو المشغل البشري، بل كطبقة تحليلية داخل حلقة قرار مغلقة تجمع القياس والتنبؤ والتقييم والتدخل والتغذية الراجعة .

وبصورة إجمالية، تجيب النتائج عن تساؤلات الدراسة من خلال إظهار أن مرونة الشبكة الليبية تتطلب الانتقال من إدارة الانقطاع إلى إدارة احتمال الانهيار قبل وقوعه .فالاختلاف الجوهري بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة لا يكمن في استخدام تقنية منفردة جديدة؛ إذ إن LSTMوالتعلم الآلي والعدادات الذكية و SCADAوإدارة الطلب جميعها تقنيات تناولتها الأدبيات بالفعل، وإنما يكمن في طريقة دمجها ضمن نموذج ديناميكي حيوي–زمني واحد يتلاءم مع خصوصية ليبيا .ومن ثم، فإن القيمة العلمية للنموذج المقترح تتمثل في تحويل بيانات الشبكة والأحمال والمناخ إلى معرفة تنبؤية، ثم تحويل المعرفة إلى تقدير للمخاطر، والمخاطر إلى أولويات، والأولويات إلى قرار، والقرار إلى تدخل تشغيلي، ثم إعادة نتائج التدخل إلى النظام في حلقة تعلم وتكيف مستمرة. ومع ذلك، ينبغي تفسير هذه النتيجة بوصفها نتيجة مفاهيمية–تحليلية وليست إثباتًا تجريبيًا نهائيًا؛لأن الدراسة الحالية لم تختبر النموذج على بيانات تشغيلية وطنية متكاملة. ولذلك تظل الخطوة العلمية التالية هي التحقق التجريبي من النموذج باستخدام بيانات آنية فعلية وقياس قدرته على خفض احتمالية الانهيار وزمن الاستعادة والأحمال غير المخدومة مقارنة بأساليب الإدارة التقليدية. وهذا التحفظ المنهجي ضروري للحفاظ على قوة الاستدلال وعدم تجاوز ما تسمح به طبيعة الدراسة الحالية.

## 8. الخاتمة

خلصت الدراسة إلى أن أزمة انهيار الشبكة الكهربائية في ليبيا تتجاوز التفسير التقليدي القائم على نقص القدرة التوليدية أو الأعطال الفنية المنفردة، لتشكل مخاطر نظامية ديناميكية تنتج عن التفاعل بين هشاشة البنية الكهربائية، وتقلبات الأحمال زمانيًا ومكانيًا، والعوامل المناخية والبيئية، والقيود التشغيلية والمؤسسية، فضلًا عن الاعتماد المتبادل بين الكهرباء والقطاعات الحيوية. وتكمن خطورة هذا الترابط في أن الاضطراب الكهربائي المحدود قد يتحول، عبر سلسلة من الأعطال المتتابعة، إلى أزمة أوسع تتجاوز قطاع الطاقة لتؤثر في المياه والصحة والاتصالات والخدمات الأساسية؛ الأمر الذي يجعل مرونة الشبكة جزءًا من مرونة البنية التحتية الوطنية وأمن الخدمات وليس مجرد قضية هندسية تخص منظومة الكهرباء .

ومن منظور نقدي، أظهرت الدراسة أن المعالجات القائمة على زيادة التوليد وحدها، رغم أهميتها، لا تقدم حلًا كافيًا لمشكلة الانهيار ما لم تقترن بتحديث شبكات النقل والحماية والرصد والتحكم وإدارة الأحمال. كما أن الانتقال إلى الشبكات الذكية لا ينبغي اختزاله في تركيب العدادات والمستشعرات أو إدخال تطبيقات الذكاء الاصطناعي، لأن التحول التقني في بيئة تعاني ضعف البنية الرقمية والقدرات المؤسسية قد يؤدي إلى بناء منظومة متقدمة تقنيًا لكنها محدودة الفاعلية التشغيلية. ومن ثم، فإن نجاح التحول يتطلب مسارًا تدريجيًا يجمع بين التحديث الهندسي والرقمنة والحوكمة وبناء القدرات البشرية والأمن السيبراني، بما يتلاءم مع الخصائص الفعلية للشبكة الليبية .

وتبرز القيمة العلمية للدراسة في أنها لا تقترح CNN–LSTM أو SCADA/EMSأو العدادات الذكية بوصف أي منها حلًا منفردًا، وإنما تعيد تنظيم هذه التقنيات داخل نموذج ديناميكي حيوي–زمني متكامل .ففي هذا النموذج تتحول بيانات الشبكة والأحمال والمناخ إلى تنبؤ، والتنبؤ إلى تقدير لمخاطر الفشل المتسلسل، والمخاطر إلى أولويات للقطاعات الحرجة، ثم تتحول الأولويات إلى قرار وتدخل تشغيلي، يعقبه تعافٍ وتغذية راجعة تسمح للنظام بالتعلم والتكيف المستمر. وبذلك تتمثل الحلقة الأكثر أهمية التي تعالجها الدراسة في الفجوة الواقعة بين التنبؤ واتخاذ القرار التشغيلي، وهي فجوة ظلت واضحة في جانب من الأدبيات التي عالجت التنبؤ بالأحمال أو الشبكات الذكية أو الأعطال المتسلسلة بصورة منفصلة .

كما يضيف النموذج المقترح بعدًا مجتمعيًا مهمًا لإدارة الشبكة، يتمثل في الانتقال من ترتيب الأحمال وفق حجم الاستهلاك فقط إلى ترتيب القطاعات الحرجة(Critical-Sector Prioritization) ؛ فالقيمة التشغيلية للحمل ينبغي ألا تحدد بالميغاواط وحدها، وإنما بحجم الآثار المترتبة على فقده. وعليه، قد تكون المحافظة على حمل يغذي محطة مياه أو مستشفى أو شبكة اتصالات أكثر أهمية من المحافظة على حمل أكبر لا يرتبط بخدمة حيوية. ويعيد هذا المنظور تعريف إدارة الأحمال بوصفها أداة لإدارة مخاطر البنية التحتية الوطنية، وليس مجرد وسيلة لمعادلة العرض والطلب .

ومع ذلك، فإن القوة المفاهيمية للنموذج المقترح لا ينبغي أن تُفسر باعتبارها دليلًا تجريبيًا نهائيًا على كفاءته؛ إذ تعتمد الدراسة في مرحلتها الحالية على المنهج الوصفي–التحليلي النقدي المقارن والاستقراء العلمي، ولم تختبر النموذج باستخدام بيانات تشغيلية وطنية آنية متكاملة. ومن ثم، تظل الحاجة قائمة إلى التحقق الميداني من قدرته على تحسين زمن الإنذار المبكر، وتقليل الأحمال غير المخدومة، وخفض احتمال انتشار الأعطال، وتسريع استعادة الخدمة مقارنة بآليات الإدارة التقليدية. كما ينبغي عدم افتراض تفوق CNN–LSTM مسبقًا، بل مقارنته بخوارزميات بديلة وفق مؤشرات الدقة الإحصائية والكفاءة التشغيلية معًا. وهذا القيد لا يقلل من قيمة الدراسة، وإنما يحدد بوضوح انتقالها المستقبلي المطلوب من Conceptual Framework إلى Operationally and Empirically Validated Framework.

وبناءً عليه، تتمثل المساهمة النهائية للدراسة في إعادة صياغة فلسفة إدارة الشبكة الكهربائية الليبية من إدارة تفاعلية Reactive تستجيب للانقطاع بعد وقوعه إلى إدارة تنبؤية – استباقية – تكيفيةPredictive – Proactive–Adaptive تستشعر مقدمات الخطر، وتتنبأ بمساره، وتحدد العقد والقطاعات الحرجة، ثم تدعم التدخل قبل تحول الاضطراب إلى انهيار واسع. ومن هذا المنظور، لا يمثل النموذج المقترح حلًا تقنيًا لأزمة الكهرباء فحسب، بل إطارًا أوليًا لتعزيز أمن الطاقة ومرونة البنية التحتية واستمرارية الخدمات الحيوية في ليبيا .

## أولا :الاستنتاجات

1. انهيار الشبكة الليبية مشكلة نظامية متعددة الأبعاد وليس عطلًا فنيًا منفردًا .
2. زيادة القدرة التوليدية وحدها لا تكفي لتحقيق مرونة واستقرار الشبكة .
3. الأعطال المتسلسلة تمثل أحد أهم المسارات المؤدية إلى الإظلام واسع النطاق .
4. الأنماط الزمنية والمكانية للأحمال عنصر أساسي في التنبؤ المبكر بمخاطر الشبكة .
5. المتغيرات المناخية والبيئية تؤثر في الطلب وفي هشاشة الشبكة بصورة متزامنة .
6. الذكاء الاصطناعي أكثر قيمة عندما يرتبط بالقرار التشغيلي وليس بالتنبؤ فقط .
7. الشبكات والعدادات الذكية تمثل بنية تمكينية للمرونة وليست حلًا مستقلًا للأزمة .
8. حماية المياه والصحة والاتصالات يجب أن تدخل ضمن أولويات إدارة الأحمال .
9. التكامل بين CNN–LSTMو DSSو SCADA/EMSيوفر أساسًا لإدارة استباقية قابلة للتكيف .
10. النموذج المقترح واعد مفاهيميًا، لكنه يحتاج إلى تحقق تجريبي وتشغيلي باستخدام بيانات الشبكة الليبية الفعلية .

## ثانيا :التوصيات

1. إنشاء منصة وطنية موحدة للرصد الآني تجمع بيانات التوليد والنقل والأحمال والأعطال والطقس .
2. البدء ببرنامج مرحلي لنشر العدادات الذكية والمستشعرات في العقد والمناطق الأكثر عرضة للانهيار .
3. تطوير قاعدة بيانات زمنية–مكانية موحدة للأحمال تسمح بتحديد ساعات الذروة ومناطق الخطر .
4. اختبار CNN–LSTM ميدانيًا ومقارنة أدائه بـ LSTM و XGBoostوغيرها وفق RMSE و MAEو MAPE وزمن الإنذار المبكر .
5. تطوير نظام إنذار مبكر للأعطال المتسلسلة متكامل مع DSS و SCADA/EMS.
6. اعتماد استراتيجية إدارة أحمال ديناميكية بدلًا من الطرح التقليدي واسع النطاق وغير المميز .
7. إنشاء مصفوفة وطنية لترتيب الأحمال وفق Critical-Sector Prioritizationمع أولوية المياه والصحة والاتصالات والخدمات الأمنية .
8. تنفيذ التحول نحو Smart Grid تدريجيًا بالتوازي مع تطوير ICTوالأمن السيبراني والمهارات الوطنية والحوكمة المؤسسية .
9. إنشاء فريق وطني مشترك للكهرباء والمياه والصحة والاتصالات والأرصاد لإدارة المخاطر العابرة للقطاعات .
10. تنفيذ مشروع تجريبي Pilot Projectللنموذج الديناميكي الحيوي–الزمني في منطقة محددة، ثم تقييم نتائجه وتطويره قبل التوسع على المستوى الوطني.

## المراجع

Abunuar, A. S. (2026). A phased framework for smart grid integration in Libya: Enhancing grid reliability and mitigating recurrent outages. Journal of Bani Walid University for Humanities and Applied Sciences, 11(5). https://doi.org/10.58916/jhas.v11i5.1247

Agaal, A., Essgaer, M., Farkash, H. M., & Othman, Z. A. (2025). Data-driven insights for informed decision-making: Applying LSTM networks for robust electricity forecasting in Libya. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 17(3),65–89. https://doi.org/10.5815/ijisa.2025.03.05

Gallegos, J., Arévalo, P., Montaleza, C., & Jurado, F. (2024). Sustainable electrification—Advances and challenges in electrical-distribution networks: A review. Sustainability, 16(2), 698. https://doi.org/10.3390/su1602069 8

Islam, M. Z., Lin, Y., Vokkarane, V. M., & Venkataramanan, V. (2023). Cyber-physical cascading failure and resilience of power grid: A comprehensive review. Frontiers in Energy Research, 11, 1095303. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.109530 3

Judge, M. A., Khan, A., Manzoor, A., & Khattak, H. A. (2022). Overview of smart grid implementation: Frameworks, impact, performance and challenges. Journal of Energy Storage, 49, 104056. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.10405 6

Ogab, M., Mohamed, F. A., Mohd, S., & Didane, D. H. (2025). Techno-economic analysis of a hybrid PV/wind-diesel grid-connected system for the Great Man-Made River Project's wellfields, Libya. International Journal of Integrated Engineering, 17(8), 190–212.

Sami, N. M., & Naeini, M. (2024). Machine learning applications in cascading failure analysis in power systems: A review. Electric Power Systems Research, 232, 110415. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.11041 5

Wazirali, R., Yaghoubi, E., Abujazar, M. S. S., Ahmad, R., & Vakili, A. H. (2023). State-of-the-art review on energy and load forecasting in microgrids using artificial neural networks, machine learning, and deep learning techniques. Electric Power Systems Research, 225, 109792. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.10979 2

Wen, X., Liao, J., Niu, Q., Shen, N., & Bao, Y. (2024). Deep learning-driven hybrid model for short-term load forecasting and smart grid information management. Scientific Reports, 14, 13720. https://doi.org/10.1038/s41598-024-63262- x

Akhila, K., Pillai, A. S., Priya, K. R., & Al-Shahri, A. (2025). Towards resilient energy infrastructures: A comprehensive review on the role of demand response in smart grids. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 74, 104170. https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.10417 0

Alasali, F., Saidi, A. S., El-Naily, N., Alsmadi, O., Khaleel, M., & Ghirani, I. (2023). Assessment of the impact of a 10-MW grid-tied solar system on the Libyan grid in terms of the power-protection system stability. Clean Energy, 7(2), 389–407. https://doi.org/10.1093/ce/zkac08 4

Almaktar, M., Elbreki, A. M., & Shaaban, M. (2021). Revitalizing operational reliability of the electrical energy system in Libya: Feasibility analysis of solar generation in local communities. Journal of Cleaner Production, 279, 23647. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.12364 7

Biswal, B., Deb, S., Datta, S., Ustun, T. S., & Cali, U. (2024). Review on smart grid load forecasting for smart energy management using machine learning and deep learning techniques. Energy Reports, 12, 3654–3670. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.05 6

Boopathy, P., et al. (2024). Deep learning for intelligent demand response and smart grids: A comprehensive survey. Computer Science Review, 51, 100617. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.10061 7

Dwivedi, D., Yemula, P. K., & Pal, M. (2023). Evaluating the planning and operational resilience of electrical distribution systems with distributed energy resources using complex network theory. Renewable Energy Focus, 46, 156–169. https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.06.00 7

Eren, Y., & Küçükdemiral, İ. (2024). A comprehensive review on deep learning approaches for short-term load forecasting. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 114031. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.11403

Farkash, H. M., El Zuway, M. A., Mohammed, H. A., Agaal, A., & Essgaer, M. (2024). Machine learning methods for medium-term load forecasting: Study on the North Benghazi stations of the General Electricity Company in eastern Libya. International Science and Technology Journal, 35(1), 1–11. https://doi.org/10.62341/licase206