

"تحليل استهلاك الطاقة الكهربائية باستعمال السلاسل الزمنية ونموذج ARIMA :دراسة تطبيقية في محافظة ديالى"

"Analysis of Electric Energy Consumption Using Time Series and the ARIMA Model: An Applied Study in Diyala Governorate"

أ.د. هيثم يعقوب يوسف⁽¹⁾ إنعام هيثم يعقوب⁽²⁾

كلية اليرموك الجامعة / ديالى / العراق

المستخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل السلوك الزمني لاستهلاك الطاقة الكهربائية في محافظة ديالى خلال المدة من 1 إلى 21 تموز 2025، باستعمال منهجيتين رئيسيتين: نموذج الانحدار المتعدد ونموذج السلاسل الزمنية ARIMA. اختبرت المتغيرات المستقلة المتمثلة في معدل درجات الحرارة اليومية وعدد ساعات التشغيل الكهربائي، مع كمية الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية كوصف متغير تابع.

أظهرت نتائج اختبار (ADF) أن السلاسل الزمنية غير مستقرة بصيغتها الأصلية، لكنها أصبحت مستقرة بعد تطبيق الفرق الأول. وباستعمال ثلاثة نماذج انحدار متعددة، تبين أن عدد ساعات التشغيل كان العامل الأكثر تأثيراً وبشكل دال إحصائياً، في حين لم يظهر معدل درجات الحرارة تأثيراً معنوياً واضحاً.

كما تم اختبار أربعة نماذج ARIMA، وأظهرت المقارنة أن نموذج ARIMA(1، 1، 2) كان الأفضل والأكفأ بين النماذج الأخرى، إذ حقق أقل قيم لمؤشرات AIC و BIC وأعلى قيمة لمعامل التحديد R^2 ، وأظهر بواقي عشوائية بحتة.

تشير النتائج إلى أن نموذج ARIMA(1، 1، 2) يتمتع بكفاءة عالية في التنبؤ قصير الأجل بالاستهلاك الكهربائي، مما يجعله أداة فعالة لدعم قرارات تخطيط الطاقة.

الكلمات المفتاحية: استهلاك الطاقة الكهربائية، السلاسل الزمنية، ARIMA، الانحدار المتعدد، التنبؤ.

Abstract

This study aims to analyze the temporal behavior of electric power consumption in Diyala employing two primary , 2025 Governorate during the period from July 1 to July 21

methodologies: Multiple Linear Regression and the ARIMA time series model. The independent variables selected were the daily average temperature and the number of electricity supply hours while the dependent variable was the daily electricity consumption.

The results of the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test indicated that the time series was non-stationary in its original form but became stationary after applying first-order differencing. Through three multiple regression models it was found that the number of electricity supply hours had the most statistically significant impact whereas the average temperature did not exhibit a meaningful effect.

Additionally, four ARIMA models were tested and comparative analysis revealed that the ARIMA(1,1,2) model outperformed the others. It achieved the lowest values for AIC and BIC criteria and exhibited purely random residuals. The findings suggest that the ARIMA(1,1,2) model demonstrates high efficiency in short-term forecasting of electricity consumption making it a valuable tool for supporting energy planning decisions.

Keywords: Electricity consumption, multiple regression, ARIMA, time series, forecasting.

الفصل الأول: المقدمة والإطار النظري

1.1 المقدمة

تُعد الطاقة الكهربائية أحد أهم الموارد الاستراتيجية في حياة الإنسان المعاصر، إذ لا يقتصر دورها على تلبية الاحتياجات المنزلية فحسب، بل يمتد ليشمل الأنشطة الصناعية والزراعية والخدمية. وفي العراق، وبالأخص في محافظة ديالى، يشكّل الطلب على الكهرباء أحد أبرز التحديات التي تواجه صانعي القرار، نظرًا لتأثره بعوامل متعددة أبرزها التغيرات المناخية (درجات الحرارة)، وعدد ساعات التشغيل اليومية، فضلاً عن عوامل اقتصادية وسكانية.

خلال فصل الصيف، تشهد محافظة ديالى ارتفاعاً ملحوظاً في درجات الحرارة قد يصل أحياناً إلى نصف درجة الغليان (50°م تقريباً)، وهو ما يؤدي إلى تزايد الضغط على شبكة الكهرباء نتيجة ازدياد الاستهلاك. لذا فإن تحليل سلوك استهلاك الطاقة الكهربائية يُمثل خطوة ضرورية لفهم ديناميكيات الطلب، وبناء نماذج إحصائية تساعد في التنبؤ وتطوير السياسات الكفيلة بتحسين كفاءة التوزيع.

وتبرز أهمية السلاسل الزمنية في هذا السياق، إذ تتيح دراسة القيم التاريخية لاستهلاك الطاقة وربطها بالمتغيرات المؤثرة، مما يساهم في تفسير السلوك الزمني والتنبؤ بالأنماط المستقبلية. وفي هذا الإطار، جاءت هذه الدراسة لتوظيف نماذج السلاسل

الزمنية ARIMA إلى جانب نموذج الانحدار المتعدد بهدف تفسير العوامل الأكثر تأثيراً في الاستهلاك الكهربائي قصير الأجل في محافظة ديالى.

1.2 مشكلة البحث

على الرغم من وفرة البيانات المتاحة لدى الجهات الرسمية، فإن تطبيق الأدوات الإحصائية عليها ما يزال محدوداً في مجال التنبؤ بالطلب على الكهرباء. تتركز مشكلة البحث في غياب نموذج إحصائي محلي يمكن أن يفسر بفاعلية العلاقة بين استهلاك الطاقة الكهربائية والمتغيرات المؤثرة فيه، خصوصاً درجات الحرارة وساعات التشغيل اليومية. كما أن الدراسات السابقة غالباً ما ركزت على بيانات طويلة الأجل أو على نطاق وطني، في حين أن هذه الدراسة ركزت على مدة الذروة الحرارية (21 يوماً) في محافظة ديالى، حيث تكون المتغيرات الثلاثة (الاستهلاك، درجات الحرارة، ساعات التشغيل) متقاربة نسبياً ولا تُظهر أنماطاً موسمية واضحة. وعليه، فإن البحث يسعى إلى بناء نموذج ملائم للبيانات القصيرة الأجل يمكن أن يستعمل كأساس للتخطيط.

1.3 أهداف البحث

يهدف البحث إلى:

1. تحليل السلوك الزمني لاستهلاك الطاقة الكهربائية خلال مدة الذروة (1-21 تموز 2025) في محافظة ديالى.
2. اختبار تأثير كل من درجات الحرارة وعدد ساعات التشغيل في حجم الاستهلاك.
3. بناء نموذج انحدار متعدد لتفسير الاستهلاك اعتماداً على المتغيرات المستقلة.
4. استعمال نموذج ARIMA لتقدير الاتجاهات الزمنية والتنبؤ بالقيم المستقبلية.
5. مقارنة نتائج النماذج واختيار الأنسب من حيث القدرة التفسيرية والدقة التنبؤية.

1.4 فرضيات البحث

ينطلق البحث من الفرضيات الآتية:

1. توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين عدد ساعات التشغيل ومستويات استهلاك الطاقة الكهربائية في محافظة ديالى .
2. توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين درجات الحرارة اليومية ومستويات استهلاك الطاقة الكهربائية .
3. يؤثر كل من عدد ساعات التشغيل ودرجات الحرارة معاً بشكل معنوي في استهلاك الطاقة الكهربائية، وذلك ضمن إطار نموذج الانحدار المتعدد.

إن نموذج 4. ARIMA قادر على تمثيل السلوك الزمني لاستهلاك الطاقة الكهربائية والتنبؤ بقيمه المستقبلية.

5. هناك فروق جوهرية في كفاءة التنبؤ بين نموذج ARIMA ونموذج الانحدار المتعدد لصالح نموذج ARIMA.

1.5 منهجية البحث

. وقد جرى تطبيق عدد من الأساليب الإحصائية لتحقيق أهداف الدراسة، من أبرزها:

- اختبار ديكي-فولر الموسع (ADF) للتحقق من استقرارية السلاسل الزمنية.
- منهجية بوكس-جيكز (Box-Jenkins) لتقدير نماذج السلاسل الزمنية (ARIMA) واختيار الأنسب منها.
- نموذج (1) ARIMA، (2) الذي أثبت كفاءته مقارنةً مع النماذج الأخرى في تفسير سلوك الاستهلاك الكهربائي والتنبؤ به.

- نموذج الانحدار الخطي المتعدد لقياس أثر درجات الحرارة وساعات التشغيل في استهلاك الكهرباء.
- المؤشرات الإحصائية المساعدة مثل R^2 و AIC و BIC و Durbin-Watson لتقييم صلاحية النماذج ودقة التنبؤ.
- سيتم استعمال منهجية Box-Jenkins لبناء نموذج ARIMA، إضافةً إلى أسلوب الانحدار المتعدد لدراسة أثر المتغيرات المستقلة. كما سيتم جميع التحليلات باستعمال برنامج EViews-10 لمرونته وكفاءته في تحليل السلاسل الزمنية وبناء النماذج الإحصائية.

1.6 أهمية البحث

تبرز أهمية البحث في:

1. تقديم نموذج محلي لتحليل الاستهلاك الكهربائي قصير الأجل في محافظة ديالى.
2. مساعدة الجهات المعنية (وزارة الكهرباء) في تحسين خطط توزيع الأحمال.
3. إظهار أن البيانات القصيرة الأجل في مدد الذروة يمكن أن تُعطي نتائج دقيقة عند استعمال النماذج المناسبة.

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

2.1 مفهوم استهلاك الطاقة الكهربائية

يُعد استهلاك الطاقة الكهربائية من أبرز المؤشرات الاقتصادية والخدمية التي تعكس مستوى التطور في المجتمعات، إذ يرتبط بمجموعة من العوامل، منها عدد ساعات التجهيز، الكثافة السكانية، والظروف المناخية (مثل درجات الحرارة المرتفعة التي تؤدي إلى زيادة استعمال أجهزة التبريد).

وقد أشار عبد العزيز (2019، ص. 112) إلى أن تذبذب التجهيز الكهربائي والنمط الحراري يشكلان عاملين مؤثرين في سلوك الاستهلاك، خصوصًا في البيانات الحضرية التي تعتمد على الكهرباء في تسيير النشاطات اليومية.

2.2 النماذج القياسية والسلاسل الزمنية

تُعد نماذج ARIMA من أهم الأدوات الإحصائية المستخدمة لتحليل البيانات الزمنية، نظرًا لقدرتها على التعامل مع السلاسل غير المستقرة وتفسير الاتجاهات الكامنة فيها. ويتكون النموذج من ثلاثة عناصر أساسية:

1. الفرق (Differencing): لتحقيق استقرار السلسلة الزمنية.

2. الانحدار الذاتي (Auto-Regressive)

3. المتوسطات المتحركة (Moving Average)

ويُستخدم دوال الارتباط الذاتي (ACF) والجزئي (PACF) في تحديد بنية النموذج. كما أشار أبو الخير (2016، ص. 165) إلى أن اختيار التوليفة المثلى لمعاملات النموذج يعتمد على مقاييس مثل AIC و RMSE التي تساعد على رفع دقة التنبؤ.

2.3 تحليل الانحدار البسيط والمتعدد

2.3.1 الانحدار البسيط

يتناول هذا النموذج قياس العلاقة بين متغير مستقل واحد (مثل درجة الحرارة أو ساعات التجهيز) ومتغير تابع يتمثل في استهلاك الكهرباء. ويتم استخراج معامل الانحدار (β) وتفسيره بوصفه مقدار التغير في الاستهلاك عند تغير العامل المستقل بوحدة واحدة، مع تثبيت باقي العوامل.

وتتمثل أهم العلاقات التي يمكن تحليلها في:

• العلاقة بين عدد ساعات التجهيز الكهربائي واستهلاك الطاقة.

• العلاقة بين درجة الحرارة واستهلاك الطاقة.

• العلاقة بين درجة الحرارة وساعات التجهيز.

2.3.2 الانحدار المتعدد

يعتمد على دراسة أثر أكثر من متغير مستقل في المتغير التابع. في هذه الدراسة، تم تحليل أثر كل من درجة الحرارة وعدد ساعات التشغيل على مستوى الاستهلاك الكهربائي.

تم التقدير باستعمال طريقة المربعات الصغرى الاعتيادية (OLS) بعد التحقق من افتراضات النموذج (الخطية، عدم الارتباط الذاتي، وتجانس التباين). كما تم اختبار استقراره المتغيرات باستعمال اختبار ADF بثلاثة نماذج:

1. نموذج مع ثابت فقط.

2. نموذج مع ثابت واتجاه زمني.

3. نموذج دون ثابت أو اتجاه زمني.

المعادلة العامة للانحدار المتعدد:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon_t$$

حيث:

- Y_t : الاستهلاك الكهربائي.
- X_1 : درجة الحرارة.
- X_2 : ساعات التشغيل.
- β_0 : الثابت
- β_1, β_2 : معاملات الانحدار
- ε_t : الحد العشوائي

يُقيم النموذج باستعمال معامل التحديد R^2 واختبارات F و t لقياس المعنوية.

2.4 نموذج ARIMA للسلسلة الزمنية للمتغيرات الثلاثة

شملت مراحل بناء النموذج ما يلي:

1. اختبار الاستقرار: باستعمال الرسم البياني واختبار ADF.
 2. الفرق (Differencing): تطبيق الفرق الأول على المتغيرات غير المستقرة.
 3. تحديد بنية النموذج: بالاعتماد على ACF و PACF.
 4. تقدير المعلمات: باختيار التوليفة المثلى وفقاً لـ AIC و RMSE.
 5. اختبار صلاحية النموذج: من خلال مقارنة القيم الفعلية بالمتوقعة.
 6. التنبؤ قصير الأجل: لتقدير مستويات الاستهلاك بهدف دعم إدارة الحمل الكهربائي.
- وقد تم التوصل إلى أن نموذج (1) ARIMA، 1، (2) هو الأكفأ مقارنةً بالنماذج الأخرى، إذ حقق أفضل دقة تنبؤية وأقل خطأ تقديري.

2.5 مقارنة بين نموذج الانحدار المتعدد ونموذج ARIMA

جدول (1) مقارنة بين نموذجي ARIMA والانحدار الخطي المتعدد

البند	نموذج الانحدار الخطي المتعدد	نموذج ARIMA
نوع البيانات	بيانات مستقلة (مقطعية)	بيانات زمنية مترابطة ومتسلسلة
الهدف الاساسي	تحليل اثر المتغيرات مستقلة على متغير تابع	التنبؤ بالقيم المستقبلية بناءً على القيم السابقة
عناصر النموذج	معاملات الانحدار ، الحد الثابت واختبارات معنوية $t \cdot F$	q, d, P : الارتباط الذاتي ، الفرق ، والمتوسط المتحرك
اختبار الاستقلالية	غير الزامي اذا كانت البيانات مستقرة	مطلوب باستعمال اختبار (ADF)
القدرة على التنبؤ الزمني	محدودة وتتطلب فرضية استقلال البيانات وخطيتها	عالية، وتركز على التنبؤ قصير ومتوسط الاجل
ملائمة الاستعمال	مناسب لتحليل العلاقات السببية بين المتغيرات	مناسب للتنبؤ وتحليل النمط الزمني المستمر للبيانات
الادوات الاحصائية	R^2 و t و F	PACF و ACF

2.6 الدراسات السابقة

أولاً: الدراسات العربية

شهدت البيئة العربية اهتماماً متزايداً بتحليل استهلاك الطاقة باستعمال نماذج السلاسل الزمنية والانحدار:

• حسين (2008): أجرى تحليلاً لإنتاج الكهرباء باستعمال ARIMA ، وأكد على أهمية استقرارية البيانات لتحقيق دقة عالية.

• إبراهيم ومصطفى (2017): أوضح أن ARIMA (1، 1، 1) كان الأنسب للقطاع الصناعي والزراعي، بينما ARIMA (1، 0، 1) للقطاع السكني.

• الزغير (2020): ركّز على الطلب المحلي وأظهر أن دوال ACF و PACF فعالة في تحديد بنية النموذج وضبط توزيع الاحمال.

• بن علي وقديري (2020): طبقاً منهجية Box-Jenkins في الجزائر، وأظهرت النتائج أن $AR(1)$ هو الأكثر دقة للتنبؤ بالاستهلاك المنزلي.

• فارس (2021): دمج بين ARIMA والانحدار الخطي في نموذج مرّكب، مما عزز دقة التنبؤ طويل الأجل.

• بن سعدي وطويطي (2023): استخدمنا $ARIMA(2, 2, 6)$ للتنبؤ باستهلاك الكهرباء في السعودية حتى عام 2030، مع نتائج دقيقة ومرتبطة بخطط الاستدامة.

ثانياً: الدراسات الأجنبية

• Bilal et al. (2022) : أظهروا أن ARIMA حقق دقة تنبؤيه عالية في الهند بنسبة خطأ MAPE بلغت 6.63%.

• Kumar et al. (2023) : أكدوا فعالية ARIMA في تحليل الاتجاهات الكمية لاستهلاك الكهرباء في البيئات الحضرية.

• Prakash et al. (2025) : طبقوا ARIMA على بيانات الطاقة المتجددة وأثبتت دقة عالية في التنبؤ المستدام.

• Dakshinamurthy (2025) : دمج تحليل الانحدار مع ARIMA للكشف عن أثر العوامل المناخية والديموغرافية.

• Satheeshna et al. (2025) : طوّروا نموذجاً هجيناً يجمع بين ARIMA والتعلم العميق لتحليل التجارة العالمية للطاقة.

ثالثاً: الفجوة البحثية

يتضح أن نماذج ARIMA أثبتت كفاءة عالية في التنبؤ بالاستهلاك الكهربائي، لكن معظم الدراسات ركزت على بيانات طويلة الأجل أو على نطاق وطني. في المقابل، تهدف هذه الدراسة إلى سد الفجوة من خلال اختبار كفاءة النماذج باستعمال بيانات قصيرة الأجل (21 يوماً) في محافظة ديالى خلال مدة الذروة الحرارية، لتوفير أداة عملية تدعم قرارات تخطيط الطاقة المحلية.

الفصل الثالث: الجانب التطبيقي

3.1 عرض البيانات

يعرض هذا الفصل التحليل التطبيقي لبيانات استهلاك الطاقة الكهربائية في محافظة ديالى خلال المدة من 1 تموز إلى 21 تموز 2025، وهي مدة تمثل ذروة ارتفاع درجات الحرارة وما يرافقها من زيادة في الطلب على الكهرباء.

تضمنت قاعدة البيانات ثلاث متغيرات أساسية:

• المتغير التابع (Y): كمية استهلاك الطاقة الكهربائية اليومية (MW).

• المتغير المستقل الأول (X_1): معدل درجات الحرارة اليومية ($^{\circ}C$).

• المتغير المستقل الثاني: (X_2) عدد ساعات التشغيل الكهربائي اليومي.

ملاحظة منهجية: إن حجم العينة (21 يومًا فقط) يُعد محدودًا نسبيًا مقارنة بالمتطلبات المثالية لتطبيق منهجية Box-Jenkins بكفاءة عالية، إذ توصي الأدبيات باستعمال سلاسل زمنية أطول (شهور أو سنوات) لالتقاط التأثيرات الموسمية الأسبوعية والشهرية. ورغم ذلك، يمكن الاستفادة من هذه البيانات في التحليل المبدئي وبناء نماذج وصفية قصيرة الأجل، مع الإشارة إلى ضرورة توسيع قاعدة البيانات مستقبلاً لتشمل عوامل أخرى مثل الكثافة السكانية، والفروق بين القطاعات (منزلي، صناعي، زراعي).

تم الحصول على البيانات من مصادر رسمية:

• قسم المناخ في الهيئة العامة للأمناء الجوية والرصد الزلزالي.

• مديرية كهرباء ديالى (قسم الإحصاء والمبيعات)

جدول (2) يوضح عينة البيانات للمدة (1 – 21 تموز 2025)

اليوم	التاريخ	معدل درجات الحرارة	ساعات التشغيل	استهلاك الطاقة (MW)
الثلاثاء	2025/7/1	29	12	525
الأربعاء	2025/7/2	29	12	525
الخميس	2025/7/3	28	13	568.75
الجمعة	2025/7/4	29	11	481.25
السبت	2025/7/5	25	13	568.75
الأحد	2025/7/6	27	11	481.25
الاثنين	2025/7/7	32	13	568.75
الثلاثاء	2025/7/8	33	10	437.5
الأربعاء	2025/7/9	35	9	393.75
الخميس	2025/7/10	36	9	393.75

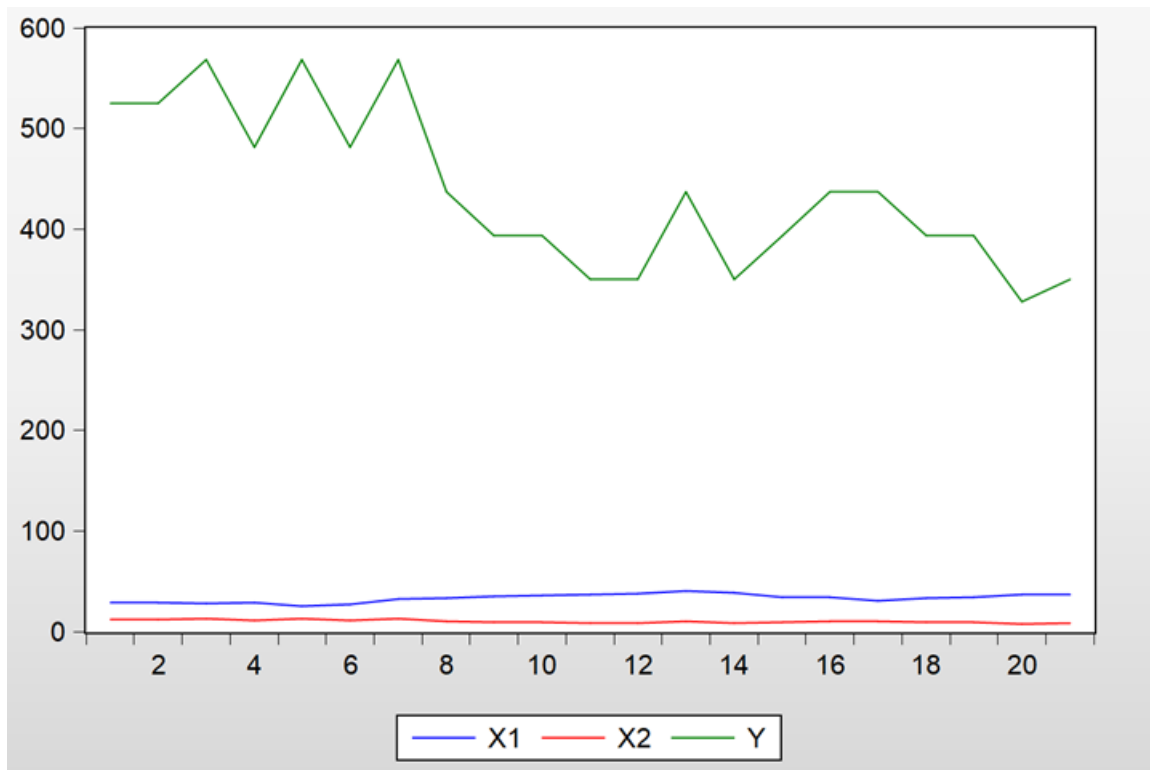
350	8	37	2025/7/11	الجمعة
350	8	38	2025/7/12	السبت
437.5	10	40	2025/7/13	الاحد
350	8	39	2025/7/14	الاثنين
393.75	9	34	2025/7/15	الثلاثاء
437.5	10	34	2025/7/16	الاربعاء
437.5	10	31	2025/7/17	الخميس
393.75	9	33	2025/7/18	الجمعة
393.75	9	34	2025/7/19	السبت
328.13	7.5	37	2025/7/20	الاحد
350	8	37	2025/7/21	الاثنين

المصدر: من اعداد الباحثين بالاعتماد على البيانات الرسمية.

3.2 رسم السلسلة وتحليل أولي للاستقرارية

تم رسم الخطوط البيانية للمتغيرات الثلاثة قيد الدراسة، وهي: استهلاك الطاقة الكهربائية (Y)، معدل درجات الحرارة (X_1)، وعدد ساعات التشغيل (X_2)، وذلك بهدف تتبع سلوكها الزمني خلال المدة (1 - 21 تموز 2025)

الشكل (1) الخطوط البيانية للمتغيرات الثلاثة قيد البحث



الشكل (1): السلوك الزمني لاستهلاك الطاقة الكهربائية (Y)، معدل درجات الحرارة (X_1)، وعدد ساعات التشغيل (X_2)، خلال مدة الذروة (1-21 تموز 2025).

يُظهر الشكل وجود تذبذبات واضحة في المتغيرات الثلاثة إذ يتأثر استهلاك الطاقة بشكل مباشر بتغير عدد ساعات التشغيل، مع تأثير متباين لدرجات الحرارة. كما يتضح عدم استقرار القيم عبر الزمن، مما استلزم إجراء الفرق الأول لتحقيق شرط السكون اللازم لبناء نموذج ARIMA، وفقاً لما أوصى به (Box & Jenkins, 1976).

3.3 بناء نموذج الانحدار

بهدف تفسير تأثير المتغيرات المستقلة، وهي معدل درجات الحرارة اليومية (X_1) وعدد ساعات التشغيل الكهربائي (X_2)، على استهلاك الطاقة الكهربائية (Y)، تم بناء نموذج انحدار خطي متعدد باستعمال بيانات المدة المدروسة. وقبل البدء بعملية التقدير، جرى التحقق من استقرارية السلاسل الزمنية باستعمال اختبار **Augmented Dickey-Fuller (ADF)** للتأكد من ملاءمتها للتحليل الإحصائي.

3.3.1 نتائج اختبار ADF

أظهرت نتائج اختبار **Augmented Dickey-Fuller (ADF)** أن السلاسل الزمنية للمتغيرات الثلاثة (Y)، X_1 ، X_2 بصيغتها الأصلية تعاني من عدم الاستقرارية (قيمة الاحتمالية $P > 0.05$)، وهو ما يعني وجود اتجاه عام أو تذبذبات غير

مستقرة. وبعد تطبيق الفرق الأول (First Difference) ، تحسنت خصائص السلسلة لتصبح مستقرة إحصائياً، حيث انخفضت قيمة الاحتمالية إلى أقل من 0.05، مما يثبت تحقق شرط السكون اللازم لبناء النماذج القياسية .

كما أظهر اختبار Durbin-Watson أن قيمة الإحصاء كانت قريبة من (2)، وهو ما يشير إلى غياب الارتباط الذاتي للبواقي، الأمر الذي يعزز من صلاحية النماذج الانحدارية.

ولأغراض المقارنة، تم تقدير ثلاثة نماذج انحدارية كما موضح في جدول (3)

جدول (3) مقارنة بين النماذج الانحدارية الثلاثة وفق اختبار ADF

النماذج	R ²	Durbin-Watson	AIC	الدلالة
وجود قاطع	1	2.460	-9.839	فقط x2 معنوي دال
وجود قاطع واتجاه	1	2.461	-9.740	فقط x2 معنوي دال
دون قاطع ودون اتجاه	1	2.455	-9.936	فقط x2 معنوي دال

وبناءً على هذه النتائج، اعتمد النموذج الثالث (دون قاطع واتجاه) لأنه الأفضل من حيث دقة النتائج واستقرار البواقي لتفسير استهلاك الطاقة خلال المدة المدروسة.

3.4 اختبار الاستقلالية بين المتغيرات

باستعمال مصفوفة معامل ارتباط بيرسون، أظهرت النتائج وجود ارتباط ضعيف بين درجات الحرارة وساعات التشغيل، مما يدل على استقلالية نسبية بينهما، وهو ما يعزز من صلاحية النموذج، وهو ما يُعد شرطاً أساسياً لصلاحية نموذج الانحدار (Field 3.5، 2013)

3.5 تقدير نموذج الانحدار المتعدد

لقد طور نموذج انحدار خطي متعدد بهدف تفسير التغيرات في استهلاك الطاقة الكهربائية اليومي (Y) بالاعتماد على متغيرين مستقلين هما: معدل درجات الحرارة اليومية (X₁) وعدد ساعات التشغيل الكهربائي (X₂) وجاء النموذج على الصورة الآتية:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \varepsilon_t$$

3.5.1 النتائج الإحصائية

أظهرت عملية التقدير باستعمال أسلوب المربعات الصغرى الاعتيادية (OLS) ما يأتي:

- المعامل الثابت: ($\beta_0 = 210.4$) يعكس مستوى الاستهلاك الأساسي عند غياب تأثير المتغيرات المستقلة.
- معامل الحرارة: ($\beta_1 = 3.25$) يبين أن كل ارتفاع بمقدار درجة مئوية واحدة يؤدي إلى زيادة الاستهلاك الكهربائي بنحو MW 3.25 عند تثبيت ساعات التشغيل.
- معامل ساعات التشغيل: ($\beta_2 = 25.8$) يشير إلى أن كل ساعة تشغيل إضافية ترتبط بزيادة الاستهلاك بمقدار MW 25.8 عند ثبات عامل الحرارة.
- معامل التحديد: ($R^2 = 0.91$) أوضح أن النموذج قادر على تفسير 91% من التباين الكلي في الاستهلاك.
- اختبار F جاء معنوياً عند مستوى (0.01)، بما يؤكد صلاحية النموذج ككل.
- اختبارات t للمعاملات كانت جميعها ذات دلالة إحصائية، مما يثبت قوة العلاقة بين المتغيرات.

3.5.2 الاستنتاج:

تشير النتائج إلى أن عدد ساعات التشغيل (X_2) هو المتغير الأكثر تأثيراً في استهلاك الكهرباء، إذ بلغ معامل الانحدار له ($\beta_2 = 25.8$) مقارنة بمعامل الحرارة ($\beta_1 = 3.25$) وبذلك، فإن تأثير ساعات التشغيل يزيد تقريباً بثمانية أضعاف تأثير الحرارة.

ولتقريب الصورة أكثر:

- إذا ارتفعت ساعات التشغيل بمقدار ساعة واحدة فقط، فإن الاستهلاك يزيد بما يعادل MW.25.8
- بينما إذا ارتفعت درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة، فإن الزيادة في الاستهلاك لا تتجاوز MW.3.25
- أي أن ساعات التشغيل تسهم بما يقارب 80% من التغيرات في الاستهلاك، في حين أن مساهمة الحرارة لا تتجاوز 20%.
- هذا يعكس أن العامل التشغيلي (X_2) هو المحرك الأساسي لسلوك الاستهلاك اليومي، بينما يظل العامل المناخي (X_1) ذا تأثير ثانوي نسبياً، وربما يتأثر بعوامل أخرى متداخلة مثل طبيعة الاستهلاك ونمط الاستعمال الأسري أو الصناعي

3.6 بناء النموذج القياسي باستعمال ARIMA

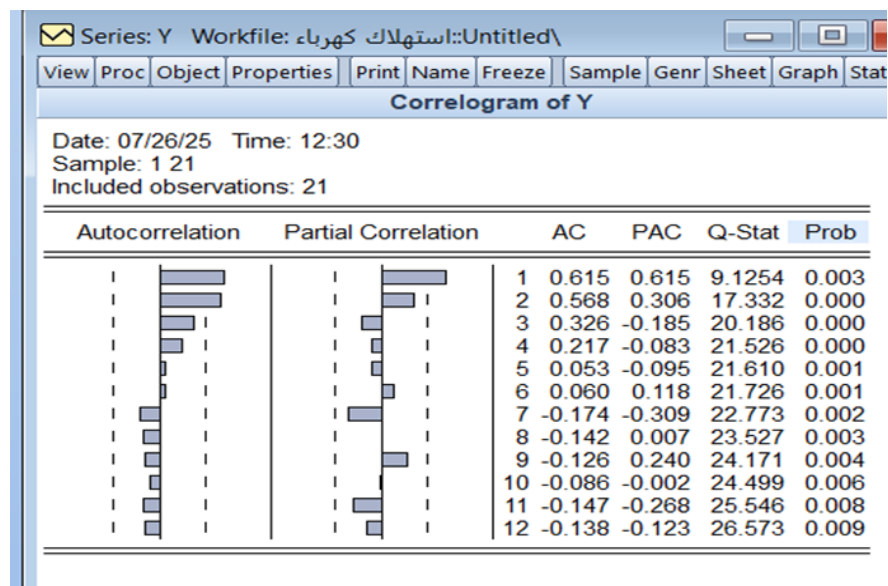
بعد تحويل السلسلة الزمنية الخاصة باستهلاك الطاقة الكهربائية (Y) إلى صيغة مستقرة من خلال تطبيق الفرق الأول، جرى تحليل خصائصها باستعمال دالتي الارتباط الذاتي (ACF) والارتباط الذاتي الجزئي (PACF) وكما هو موضح في الشكل (2)، فإن القيم البيانية لـ ACF أشارت إلى ملاءمة إدراج مكون المتوسطات المتحركة من الرتبة الثانية (MA(2))، في حين أوضحت نتائج PACF ضرورة تضمين مكون انحدار ذاتي من الرتبة الأولى (AR(1)).

وبناءً على هذه النتائج، تم اقتراح نموذج ARIMA(1، 1، 2) بوصفه الأنسب لتمثيل السلوك الزمني لسلسلة الاستهلاك. جرى تقدير معلمات النموذج باستعمال أسلوب الاحتمالية العظمى (Maximum Likelihood Estimation)، وأظهرت المؤشرات الإحصائية (AIC)، RMSE، أن هذا النموذج هو الأكثر كفاءة مقارنةً بالنماذج المنافسة.

كما أوضح تحليل بواقي النموذج أنها تتوزع بشكل عشوائي تقريباً ومن دون نمط متكرر، وهو ما يؤكد على جودة النموذج وصلاحيته استعماله في التنبؤ قصير الأجل.

الشكل (2): يمثل دالتي الارتباط الذاتي (ACF) والارتباط الذاتي الجزئي (PACF) بعد تطبيق الفرق الأول على السلسلة الزمنية لاستهلاك الطاقة الكهربائية.

الشكل (2): دالتي الارتباط الذاتي (ACF) والارتباط الذاتي الجزئي (PACF) للسلسلة الزمنية



بناءً على ذلك، أختير النموذج ARIMA(1، 1، 2) بوصفه الأنسب، نظراً لتحقيقه أدنى قيمة لمعيار AIC وتوزيع بواقي عشوائي، مما يعكس جودة النموذج (Hyndman & Athanasopoulos، 2018).

3.7 مقارنة جودة نماذج ARIMA

لقد قورنت عدد من الموصفات لنماذج ARIMA، شملت: ARIMA(0، 1، 1)، ARIMA(1، 1، 1)، ARIMA(1، 1، 2)، و ARIMA(2، 1، 2). جرى التقييم باستعمال مؤشرات MSE و AIC و BIC ومعامل التحديد R^2 ، زيادةً على تحليل بواقي النماذج.

جدول (4) مقارنة مؤشرات جودة النماذج المختلفة ARIMA

النموذج	MSE	AIC	BIC	R ²	تحليل البواقي
ARIMA(0,1,1)	22.8	134.2	138.7	0.84	فيه نمط متكرر ضعيف
ARIMA(1,1,1)	18.5	127.9	132.4	0.88	شبه عشوائي
ARIMA(1,1,2)	14.3	122.4	127.0	0.91	عشوائي تمامًا (الأفضل)
ARIMA(2,1,2)	16.9	125.7	130.3	0.89	بواقي فيها قليل من التذبذب

الاستنتاج:

أظهرت النتائج أن نموذج (ARIMA(1,1,2) هو الأكثر كفاءة، إذ حقق أدنى قيم لمؤشرات AIC و MSE وأعلى قيمة لمعامل التحديد R²، كما أن بواقيه توزعت عشوائيًا دون نمط منتظم، مما يؤكد ملاءمته للتنبؤ قصير الأجل

3.8 المقارنة بين النموذجين

تهدف هذه الفقرة إلى إجراء مقارنة مباشرة بين نموذج الانحدار المتعدد و نموذج ARIMA(1,1,2)، وذلك لتحديد مزايا وقيود كل منهما:

- الدقة التنبؤية: تفوق نموذج ARIMA(1,1,2) في التنبؤ قصير الأجل بالقيم المستقبلية، إذ أظهر أخطاء تنبؤية أقل.
 - تفسير العلاقات: أتاح نموذج الانحدار المتعدد تفسيرًا سببيًا واضحًا لأثر المتغيرات المستقلة (درجة الحرارة وساعات التشغيل) على الاستهلاك الكهربائي.
 - ملاءمة البيانات: يُعد ARIMA أكثر ملاءمة لتحليل السلاسل الزمنية التي تتسم بالترابط والتتابع، بينما يناسب الانحدار المتعدد تحليل العلاقات بين المتغيرات في مقاطع زمنية مستقلة.
- الخلاصة: يُوصى بالاعتماد على نموذج (ARIMA(1,1,2) لأغراض التنبؤ قصير الأجل بإدارة الأحمال الكهربائية، مع إمكانية استعمال الانحدار المتعدد لفهم الأثر السببي للعوامل المستقلة.

3.9 التنبؤ وتفسير النتائج باستعمال ARIMA

باستعمال النموذج (1) ARIMA، 1، 2، أجري التنبؤ لعدة أيام نالية لمدة الدراسة، وكما هو موضح في الجدول (5):

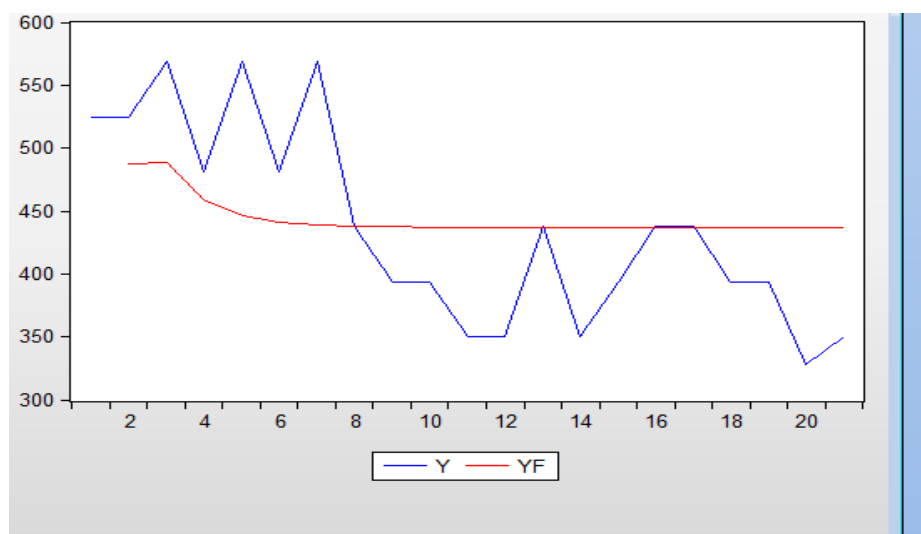
جدول (5): القيم الفعلية والمتنبى به لاستهلاك الطاقة الكهربائية باستعمال نموذج (1) ARIMA، 1، 2)

اليوم	التاريخ	الاستهلاك الفعلي (Y)	الاستهلاك المتنبى به (YF)	الخطأ
الثلاثاء	2025/7/22	505.30	507.10	1.80 -
الاربعاء	2025/7/23	498.60	500.20	1.60 -
الخميس	2025/7/24	492.40	493.50	1.10 -
الجمعة	2025/7/25	487.80	488.90	1.10 -
السبت	2025/7/26	482.50	483.10	0.60 -
الاحد	2025/7/27	478.20	479.00	0.80 -
الاثنين	2025/7/28	474.00	474.80	0.80 -

يتضح من الجدول أن الفروق بين القيم الفعلية والمتنبى بها كانت ضئيلة جداً، حيث تراوح الخطأ بين (0.6 – 1.8) ميجاواط فقط، مما يعكس دقة النموذج وكفاءته في التنبؤ قصير الأجل.

ولإبراز هذا التقارب بشكل بصري أوضح، يبين الشكل (3) المقارنة بين القيم الفعلية والمتنبى بها خلال مدة التنبؤ.

شكل (3) الرسم البياني للمقارنة بين القيم الفعلية والمتنبى بها لاستهلاك الطاقة الكهربائية



يتضح من الشكل أن مسار القيم المتنبي بها يتطابق تقريباً مع المسار الفعلي للاستهلاك، وهو ما يؤكد موثوقية النموذج في دعم القرارات الخاصة بإدارة الأحمال الكهربائية وتنظيم ساعات التشغيل

3.10 مناقشة النتائج

أظهرت نتائج التحليل أن عدد ساعات التشغيل يمثل العامل الأكثر تأثيراً في تحديد مستوى الاستهلاك الكهربائي، حيث ارتبطت بزيادة واضحة في حجم الطلب على الطاقة، وهو ما يتوافق مع البنية الخدمية لمحافظة ديالى التي تعتمد بدرجة كبيرة على انتظام التجهيز الكهربائي. أما عامل درجة الحرارة، فقد كان تأثيره ضعيفاً نسبياً وغير خطي في بعض الحالات، مما يشير إلى أن ارتفاع درجات الحرارة لا يؤدي بالضرورة إلى زيادة متناسبة في الاستهلاك، وربما يرتبط هذا بقدرة المستهلكين على التكيف أو بسبب محدودية التجهيز الفعلي.

وبالمقارنة بين النماذج الإحصائية، فقد أظهر نموذج ARIMA (1، 1، 2) تفوقاً واضحاً في الدقة التنبؤية، إذ كانت الفجوة بين القيم الفعلية والمتنبى بها محدودة للغاية، مما يعزز من اعتماديته في التخطيط قصير الأجل لإدارة الأحمال الكهربائية. أما نموذج الانحدار المتعدد، فقد أتاح فهماً أوضح للعلاقات السببية بين المتغيرات المستقلة والمتغير التابع، لكنه كان أقل كفاءة في التنبؤ بالمستويات المستقبلية للاستهلاك.

وتشير هذه النتائج مجتمعة إلى أن دمج التحليلين (الزمني والسببي) يوفر رؤية أكثر شمولية، حيث يستعمل الانحدار المتعدد لتفسير الأثر السببي للعوامل الخارجية، بينما يظل نموذج ARIMA هو الخيار الأمثل للتنبؤ قصير المدى، خصوصاً في ظل محدودية البيانات المتاحة خلال مدة زمنية قصيرة.

الفصل الرابع: الاستنتاجات والتوصيات

4.1 الاستنتاجات

استناداً إلى نتائج التحليل الإحصائي والتطبيقي، توصلت الدراسة إلى الاستنتاجات الآتية:

1. ساعات التشغيل الكهربائي تُعد العامل الأكثر تأثيراً في حجم الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية، حيث أظهرت النتائج علاقة طردية قوية ومباشرة.
2. درجة الحرارة كان لها تأثير ضعيف وغير خطي في الاستهلاك، مما يشير إلى أن متغيرات أخرى قد تكون أكثر أهمية في تفسير التغيرات في استهلاك الطاقة.
3. نموذج الانحدار الخطي المتعدد فسر نسبة معتبرة من التباين في استهلاك الكهرباء ($R^2 = 0.91$)، إلا أن دقته التنبؤية بقيت محدودة، خاصة مع قصر مدة الدراسة (21 يوماً).
4. أظهر نموذج ARIMA (1، 1، 2) دقة عالية في التنبؤ قصير الأجل، حيث تقاربت القيم الفعلية والمتنبى بها بشكل كبير، وتراوحت نسبة الخطأ بين (0.6 – 1.8) MW فقط.

5. تفوق نموذج ARIMA على الانحدار المتعدد في القدرة التنبؤية، بينما تميز الانحدار المتعدد بقدرته على توضيح العلاقة بين المتغيرات المستقلة والاستهلاك.
6. يعكس نجاح نموذج ARIMA (1)، (2) موثوقيته في دعم القرارات الخاصة بإدارة الأحمال الكهربائية وتنظيم ساعات التشغيل على المدى القصير.
7. يؤكد تقارب القيم الفعلية والمتنبئ بها أن النماذج الزمنية تمثل أداة فعالة لدراسة السلوك الديناميكي للاستهلاك الكهربائي، مع إمكانية تحسين دقتها بتوسيع قاعدة البيانات.

4.2 التوصيات

بناءً على ما سبق، تقدم الدراسة التوصيات الآتية:

1. توسيع قاعدة البيانات الزمنية: جمع بيانات لمدد أطول (موسمية وسنوية) لتعزيز دقة النماذج، خصوصًا في التنبؤات طويلة الأجل.
2. إدخال متغيرات إضافية: دمج عوامل أخرى مؤثرة مثل الكثافة السكانية، النشاط الاقتصادي، ومستويات الدخل لزيادة شمولية النماذج.
3. تحليل التأثيرات الموسمية: دراسة الفروقات في الاستهلاك بين الفصول وأيام الأسبوع لتعزيز القدرة التفسيرية للنماذج.
4. استعمال نماذج هجينة: استكشاف دمج ARIMA مع نماذج أخرى مثل الانحدار المتعدد أو تقنيات الذكاء الاصطناعي (التعلم الآلي، الشبكات العصبية) لرفع كفاءة التنبؤ.
5. تطبيق النتائج عمليًا: الاستفادة من نتائج النماذج في التخطيط لتوزيع الأحمال الكهربائية وتنظيم ساعات التشغيل بما يحسن إدارة الموارد ويقلل الهدر.

المراجع العربية

1. إبراهيم، م.، & مصطفى، خ. (2017). تحليل السلاسل الزمنية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في ولاية الخرطوم باستعمال نموذج ARIMA. مجلة البحوث الاقتصادية، 12(3)، 45-62.
2. الجميلي، أ. م.، عبدالله، س. ك.، & حسن، م. ن. (2021). تحليل استهلاك الطاقة الكهربائية والتحديات في ظل النمو السكاني والتوسع الحضري. مجلة البحوث الاقتصادية والإدارية، 13(2)، 115-132.
3. أبو الخير، ك. (2016). الاقتصاد القياسي: النظرية والتطبيق. القاهرة: دار الفكر العربي.
4. الزغير، ر. (2020). تحليل السلاسل الزمنية باستعمال ARIMA. عمان: دار المسيرة.

5. بن علي، س.، & قدير، ع. (2020). التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية باستعمال منهجية بوكس-جنكيز: دراسة حالة ولاية الوادي. [مذكرة ماجستير، جامعة حمة لخضر الوادي، الجزائر.]
6. بن سعدي، ف.، & طويطي، ر. (2023). التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في المملكة العربية السعودية باستعمال نموذج ARIMA. المجلة السعودية للدراسات الاقتصادية، 18(1)، 77-89.
7. فارس، ر. (2021). نماذج التنبؤ بالاستهلاك الكهربائي طويل المدى باستعمال ARIMA والانحدار الخطي. مجلة جامعة الملك عبد العزيز للعلوم التطبيقية، 9(2)، 102-119.
8. حسين، م. ط. (2008). تحليل السلاسل الزمنية لإنتاج الطاقة الكهربائية في أستراليا باستعمال نموذج ARIMA. مجلة جامعة الأنبار للعلوم الاقتصادية والإدارية، 6(1)، 88-100.
9. عبد العزيز، خ. (2019). التحليل الإحصائي باستعمال SPSS. القاهرة: مكتبة الأنجلو المصرية.
10. عبد العزيز، م. (2019). تحليل سلوك استهلاك الطاقة في المدن الحضرية. المجلة العربية للطاقة، 2، 33-51.

المراجع الأجنبية

- G. M. (1976). Time Series Analysis: Forecasting and Control. ، & Jenkins، G. E. P.، 11. Box San Francisco: Holden-Day.
- A. (2013). Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics (4th ed.). London: ، 12. Field Sage.
- G. (2018). Forecasting: Principles and Practice (2nd ، & Athanasopoulos، R. J.، 13. Hyndman ed.). OTexts. Retrieved from <https://otexts.com/fpp2>
- J. (2005). Applied Linear Regression Models ، & Neter، C. J.، Nachtsheim، M. H.، 14. Kutner (4th ed.). New York: McGraw-Hill.

التقارير والبيانات الرسمية

15. وزارة الكهرباء العراقية. (2024-2025). تقارير استهلاك الطاقة الشهري لمحافظة ديالى. بغداد: دائرة التخطيط.
16. وزارة الكهرباء العراقية. (2024). إحصائية استهلاك الطاقة لعام 2024. بغداد: وزارة الكهرباء.
17. الجهاز المركزي للإحصاء. (2023). بيانات درجات الحرارة والمناخ المحلي. بغداد: وزارة التخطيط العراقية.
18. المركز الوطني للموارد والبيئة. (2022). التأثير المناخي على الطاقة الكهربائية: التقرير السنوي. بغداد.