**عنوان مقاله:**  
**برآورد داده‌محور مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ساختمان با استفاده از هوش مصنوعی قابل‌توضیح**  
نویسندگان: Yan Zhang و همکاران  
منتشر شده توسط دانشگاه فناوری نانیانگ، دانشگاه شهر هنگ‌کنگ، دانشگاه هواتژونگ و گروه مهندسی هوبی

**📝 چکیده مقاله – ترجمه فارسی**

پیش‌بینی مصرف انرژی، بخش جدایی‌ناپذیری از برنامه‌ریزی و کنترل مصرف انرژی در بخش ساختمان است؛ بخشی که **۴۰٪ از مصرف انرژی جهانی** و سهم قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است. با این حال، مطالعات اندکی به **اثر ترکیبی ویژگی‌های ساختمان، هندسه ساختمان و مورفولوژی شهری** بر عملکرد انرژی پرداخته‌اند.

این پژوهش با توسعه یک مدل **یادگیری عمیق قابل توضیح (Explainable AI)** به این خلأ پاسخ می‌دهد. در این مدل از الگوریتم **Light Gradient Boosting Machine (LGBM)** همراه با الگوریتم **SHAP (SHapley Additive exPlanation)** برای **تحلیل اهمیت ویژگی‌ها** استفاده شده است. این ترکیب امکان درک بهتر از نحوه تأثیرگذاری ویژگی‌ها بر پیش‌بینی مصرف انرژی را فراهم می‌سازد.

با استفاده از این مدل هوش مصنوعی قابل‌توضیح، مقاله موفق شده است:

* **مصرف انرژی** و **انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)** ساختمان‌های مسکونی را پیش‌بینی کند.
* **مهم‌ترین عوامل مؤثر را شناسایی و میزان تأثیر آن‌ها را ارزیابی کند.**

**📍 یافته‌های کلیدی (نتایج موردی بر اساس داده‌های شهر سیاتل):**

1. **هندسه ساختمان** و **مورفولوژی شهری** تأثیر چشم‌گیری بر مصرف انرژی دارند؛ استفاده از این عوامل باعث **افزایش دقت مدل تا ۳۳٫۴۶٪** نسبت به حالتی شد که فقط ویژگی‌های ساختمان در نظر گرفته شده بود.
2. **مساحت کل زیربنای ساختمان (Gross Floor Area)** مهم‌ترین عامل برای مصرف انرژی شناخته شد، و **میزان مصرف گاز طبیعی** نیز بیشترین تأثیر را بر انتشار گازهای گلخانه‌ای داشت.
3. مدل پیشنهادی دقت بالایی دارد؛ میانگین **ضریب تعیین R² برابر با ۰٫۸۴۳۵** به‌دست آمده است، که از مدل‌های دیگر مانند **XGBoost، Random Forest، و SVR** عملکرد بهتری نشان می‌دهد.

**✅ مهم‌ترین نوآوری‌های مقاله:**

* ایجاد ساختاری جامع که **ویژگی‌های ساختمان، هندسه و مورفولوژی شهری** را با هم ترکیب می‌کند.
* استفاده از **مدل هوش مصنوعی قابل‌توضیح (XAI)** مبتنی بر **LGBM + SHAP** برای پیش‌بینی دقیق و قابل درک مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای.

## English Summary

### ✅ ****Approaches and Methods****

* Focus is on integrating **building characteristics**, **building geometry**, and **urban morphology**.
* Developed an **Explainable AI (XAI)** model using:
  + **LightGBM** (Light Gradient Boosting Machine)
  + Integrated with **SHAP** (SHapley Additive exPlanations) for interpretability
* Conducted a case study in **Seattle, USA** using GIS and OpenStreetMap data.

### 🔍 ****Best Algorithms and Models Compared****

| **Model** | **Accuracy (R²)** |
| --- | --- |
| **LightGBM** | **0.8435** |
| XGBoost | 0.8058 |
| Random Forest (RF) | 0.7828 |
| Support Vector Regression (SVR) | 0.5313 |

* LightGBM outperformed others, especially in speed and interpretability.
* SHAP helped identify **most influential features**:
  + For **Energy Use**: Total Gross Floor Area (GFA), Natural Gas, Energy Star Score
  + For **GHG Emissions**: Natural Gas, Shape Form, GFA

### 🧰 ****Software and Tools Used****

* **LightGBM**: Open-source ML framework by Microsoft (Python)
* **SHAP**: Python library for XAI
* **Geopandas**: For spatial analysis
* **OpenStreetMap & GIS**: For urban morphology and layout extraction
* **Python 3.8**: Programming language

## 🧠 خلاصه فارسی

### ✅ ****روش‌ها و رویکردها****

* مدل پیش‌بینی انرژی ساختمان بر پایه داده‌ها و هوش مصنوعی قابل تفسیر ساخته شده است.
* ترکیب ویژگی‌های ساختمان، هندسه ساختمان و شکل‌شناسی شهری در مدل لحاظ شده.
* از الگوریتم **LightGBM** به همراه **SHAP** برای تفسیرپذیری استفاده شده است.

### 🔍 ****الگوریتم‌ها و مدل‌های برتر****

| **مدل** | **دقت (R²)** |
| --- | --- |
| **LightGBM** | **۰.۸۴۳۵** |
| XGBoost | ۰.۸۰۵۸ |
| Random Forest | ۰.۷۸۲۸ |
| SVR | ۰.۵۳۱۳ |

* LightGBM بهترین عملکرد را در پیش‌بینی مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای داشت.
* SHAP نشان داد مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار:
  + برای **مصرف انرژی**: سطح کل زیربنا (GFA)، مصرف گاز طبیعی، امتیاز انرژی ستاره‌ای
  + برای **انتشار گازهای گلخانه‌ای**: گاز طبیعی، فرم هندسی ساختمان، GFA

### 🧰 ****نرم‌افزارها و ابزارهای استفاده‌شده****

* **LightGBM** و **SHAP** (پایتون)
* **Geopandas** برای تحلیل مکانی
* **OpenStreetMap و GIS** برای استخراج شکل شهری
* زبان برنامه‌نویسی **Python 3.8**