

Elektrik Piyasası Fiyat Tahmini

İspanya gün öncesi elektrik piyasasında saatlik fiyatı, sızıntısız bir zaman serisi hattıyla tahmin ettim. Karşılaştırma ölçütü, dünün aynı saatini kopyalayan naif modeldir. Sunumdaki model sırası sabittir: Ridge, LightGBM, XGBoost, ARIMA, Ridge+B+AR(1).

Elektrik fiyat tahmini, ilk bakışta talep ve üretim dengesine indirgenebilir. Yük artınca fiyat yükselir, rüzgâr üretimi güçlenince fiyat baskılanır; bir modelin bu ilişkiyi öğrenmesi beklenir. Bu çalışmada gördüğüm asıl mesele algoritma seçimi değildi. Asıl mesele, teslim saati geldiğinde elde gerçekten hangi bilginin bulunduğunu ayırmaktı.

Çalışmayı İspanya gün öncesi elektrik piyasası üzerinde yürüttüm. Hedef değişken price day ahead, birimi €/MWh. Bu, teslim saatinden önce ihaleyle oluşan saatlik fiyattır. Veri setinde ayrıca price actual yer alıyor; gerçekleşmiş piyasa tarafına daha yakın bir seri. Bu kolonu özellik olarak kullanmadım. Kullanılsaydı doğrulama skoru yükselirdi, ancak skorun operasyonel karşılığı kalmazdı.

Problem tanımı

Gün öncesi piyasada her teslim saati için ayrı bir fiyat oluşur. Tahmin, o saatin gerçekleşmiş üretim, yük ve hava bilgisi görülmeden üretilmek zorundadır. Bu bilgiler teslim anında henüz elde değildir; sızıntısız bir kurulumda da kullanılamaz.

Araştırma sorusunu buna göre kurdum: teslim saati t gelmeden önce yayınlanmış ihale fiyatları, yük ve yenilenebilir gün öncesi tahminleri ile geçmiş üretim ve hava gözlemleri kullanılarak, dünün aynı saatini kopyalayan naif modelden daha düşük hata elde edilebilir mi? Naif model ilk bakışta zayıf bir temel gibi durur. Elektrik piyasasında durum farklıdır. Dünün 18.00 fiyatı, bugünün 18.00 fiyatına çoğu günde yeterince yakındır. Lag-24'ü geçemeyen bir sistemin pratik katkısı sınırlı kalır. Bu nedenle tüm resmi karşılaştırmayı bu tabana bağladım.

Veri seti

Kaynak iki ham CSV dosyasından oluşuyor. Enerji dosyası üretim kısımlarını, yükü, gün öncesi tahminleri ve fiyatları içeriyor; 35.064 saatlik kayıt. Hava dosyası Madrid, Barcelona, Bilbao, Sevilla ve Valencia için aynı saat diliminde gözlem taşıyor. Kapsam, Aralık 2014'ün son saatinden 2018 yıl sonuna kadardır. Seri saatlik, UTC zaman damgalı ve kopuksuzdur. Hedef 2,06 ile 101,99 €/MWh arasında değişiyor; boş fiyat kaydı yoktur.

Üretim kolonlarında boşluk vardı. Bu boşlukları sıfırla doldurmadım. En fazla üç saatlik iç boşlukları zamana göre tamamladım, daha uzun ve kenar boşluklarını eksik bıraktım. Sıfır, veri yok anlamına gelmez; modele öyle yedirilirse hata gizlenmiş olur. Ham dosyaların üzerine yazmadım. Temizlik işlemlerini kopyalar üzerinde yürüttüm.

Sızıntı kontrolü ve zaman serisi bölmesi

Zaman serisinde rastgele eğitim–test bölmesi, gelecek saati geçmişe karıştırır. Model bu sızıntıyı öğrenir; elde edilen skor yanıltıcı olur. Seriyi karıştırmadım. Bölmeyi kronolojik %70 / %15 / %15 olarak

kestim. Eğitim dönemi 2014 sonundan 2017 Ekim'ine, doğrulama 2018 Mayıs'ına, test 2018'in kalanına uzanıyor.

Test setini model seçiminde, hiperparametre ayarında, eşik belirlemede veya artık düzeltmesinde kullanmadım. Testi dondurulmuş hâliyle, hattın en sonunda bir kez skorladım. Hedef gecikmelerini t-24, t-48 ve t-168 ile sınırladım; t-1 yoktur. price actual hiç kullanılmadı. Yüksek fiyat oranlarını, önce 24 saat kaydırılmış seri üzerinde hesapladım.

Özellik mühendisliği

Hattın sonunda 184 güvenli kolon oluştu. Fit anında üç kolon daha eklendi: son 7, 14 ve 30 günde fiyatın belirli bir eşiğin üzerinde kaldığı saatlerin oranı. Eşik, testten değil, geliştirme döneminin 75. yüzdeliğinden geldi. Bu üçlüye METHOD_B adını verdim. İşlevi sadedir: pahalı saatlerin geçmişte kümelenip kümelenmediğine bakan, nedensel bir frekans ölçüsü.

Kolon grupları takvim, gün öncesi yük, güneş ve rüzgâr tahminleri, geçmiş fiyat, geçmiş üretim ve gecikmeli hava gözlemlerinden oluşuyor. Takvim, Madrid saatine çevrilmiş saat, haftanın günü, ay ve döngüsel kodları içeriyor.

Model seçimi ve doğrulama

Eğitim ve doğrulamayı birleştirip walk-forward doğrulama uyguladım. Dört genişleyen pencere kullandım. Her katmanda eksik değer doldurma ve ölçekleme yalnızca o katmanın eğitim bloğunda fit edildi. Test dosyası bu aşamada açılmadı. Karşılaştırmayı sunum sırasıyla yürüttüm.

Birinci model Ridge'dir. Ceza katsayısı walk-forward ızgarasında 0,001 seçildi. 184 güvenli özellikte ortalama MAE 5,80 oldu. Ridge çözümünü NumPy'de kapalı formda aldım.

İkinci model LightGBM, üçüncü model XGBoost'tur. İkisi de aynı 184 özellikte, sızıntısız kurulumda denendi. Beklentim ağaçların öne geçmesi yönündeydi. Geçmediler. LightGBM 5,92, XGBoost 5,95. Ağaçlar daha esnektir; bu veri, sızıntı kesildikten sonra o esnekliği ödüllendirmede.

Dördüncü adım ARIMA'dır. Ham fiyata 184 özelliği yutan klasik tek değişkenli ARIMA kurmadım. Ridge ve METHOD_B çok değişkenli kısmı aldıktan sonra artığa ARIMA(1,0,0), yani AR(1) oturtuldu. Protokol gün öncesine uygundur: 24 saatlik blok tahmin, gün bitince artıklar güncellenir. Walk-forward MAE 4,53'e indi. Mevsimsel ARIMA daha çok parametreyle AIC'de önde göründü; tahmin hatasında AR(1)'den kötü kaldı. Bu yüzden teslimata sade AR(1) alındı.

Beşinci ve kilitli model Ridge+B+AR(1)'dir. Yani Ridge ($\alpha = 0,001$), METHOD_B'nin üç sıklığı, geliştirme artıklarından dondurulmuş +1,47 €/MWh ekleme ve artığa AR(1). Walk-forward MAE 4,53'tür. Test bu bileşim seçildikten sonra bir kez skorlandı.

Sıra	Model	Walk-forward MAE	RMSE	R ²	Test MAE
1	Ridge	5,80	7,41	0,622	—
2	LightGBM	5,92	7,85	0,606	—

3	XGBoost	5,95	7,91	0,601	—
4	ARIMA	4,53	6,07	0,748	—
5	Ridge+B+AR(1)	4,53	6,07	0,748	3,99

Tablo 1. Walk-forward karşılaştırma (sunum sırası) ve kilitli test.

Kilitli test sonuçları

Kilitli test seti 5.260 saati kapsıyor; 2018 Mayıs sonundan yıl sonuna. Aşağıdaki tablo, dondurulmuş holdout üzerindeki resmi karşılaştırmadır. Test, Ridge+B+AR(1) seçildikten sonra bir kez skorlanmıştır.

Metrik	Ridge+B+AR(1)	Naif Lag-24
MAE	3,99	6,05
RMSE	5,88	9,03
R ²	0,67	0,22
sMAPE	%7,31	%11,68
Sapma	+1,42	≈ 0

Tablo 2. Kilitli test performansı (5.260 saat, 2018 Mayıs–Aralık).

Mutlak hata yaklaşık yüzde 34 daha düşüktür. Bu metrikler tek başına yeterli değildir. Model sapması +1,42; yani ortalama olarak fiyat hâlâ yukarı yazılmıştır. Naif model neredeyse yansızdır. Düşük MAE, yansız bir model anlamına gelmez. Fiyat düzeyinde de kayma vardır: geliştirme ortalaması yaklaşık 47,9, test 61,1 €/MWh. Test dilimi hem daha pahalı hem daha az oynaktır.

Hata analizi

Geliştirme katmanlarında Ridge+METHOD_B, pahalı saatleri sistematik olarak eksik tahmin ediyordu. P75 üstü sapma yaklaşık -5,9, P90 üstünde -8,2 idi. METHOD_B bu sapmayı yumuşattı, ortadan kaldırmadı. AR(1) katmanı ortalama hatayı indirdi; kuyruk sapmasını sihirli biçimde silmedi. Kilitli testte işaret döndü. Genel sapma pozitif; P75, P90 ve P95 dilimleri de pozitifdir. Doğrulama döneminde gözlediğim eksik tahmini çözdüğümü söyleyemem.

Test skorunu sonradan iyileştirme baskısı oluşur. Eşik kaydırılabilir, model ailesi değiştirilebilir. MAE düşer; fakat elde kalan şey bağımsız bir değerlendirme olmaktan çıkar. Ridge+B+AR(1) walk-forward'da seçildi, test bir kez skorlandı. Panodaki rakam da bu kilitli değerlendirmedir; sistem yeniden eğitilmez.

Açıklanabilirlik

Kilitli modelin omurgası doğrusal olduğu için TreeSHAP kullanmadım. Walk-forward katmanlarında Ridge için tam doğrusal SHAP hesapladım. En güçlü öngörü sinyali geçmiş fiyattır: t-24 ve t-48. Bunu toplam yük tahmini izler. Rüzgârın yük içindeki payı, güneş tahmini ve yenilenebilir tahmin toplamı da katkı verir. Bu, rüzgârın fiyatı düşürdüğüne dair nedensel bir kanıt değildir. AR(1) katmanı tek bir düzey düzeltmesidir; özellik bazlı SHAP terimi değildir.

Takvim tarafında month ile day_of_year neredeyse aynı bilgiyi taşır. Katsayıları büyük ve zıt çıkabilir. Bunu ayrı sürücüler gibi okumak yanıltır. SHAP, tahminin içini açar; nedensellik kanıtı sunmaz.

Operasyonel 24 saatlik tahmin

Mevcut dosyalar ve kilitli 187 kolonlu Ridge+METHOD_B omurgası ile, D-1 öğlen civarı bir çıkış anında 24 saatlik operasyonel tahmin üretilemez. 106 kolon güvenli, 6 kolonun yayın saati dosyada doğrulanmamış, 75 kolon o anda henüz gözlenmemiştir. Katı üretim yolunda eksik kolonu sıfırla doldurmadım. Tahmin boş kalır. Karar kilitlidir: 24 saatlik üretim tahmini hazır değildir.

Karar panosu ve tekrarlanabilirlik

Sonuca salt okunur bir Streamlit panosu ekledim. Uygulamanın adı projenin adıyla aynıdır: Elektrik Piyasası Fiyat Tahmini. Pano model eğitmez, SHAP hesaplamaz, 24 saatlik üretim basmaz. Model karşılaştırması sayfası Ridge, LightGBM, XGBoost, ARIMA ve Ridge+B+AR(1) sırasını korur. Ham CSV'den kilitli modele giden adımlar ayrı betiklerde ve defterde durur. Test seti en sonda, bir kez skorlanır.

Değerlendirme ve sınırlılıklar

Elektrik piyasasında fiyat tahmini, daha derin bir model seçmekten önce bilgi sınırını doğru kurma problemidir. t-1 gecikmesi eklendiğinde çoğu model iyileşir. Operasyonda o gecikme yoksa iyileşme de yoktur. LightGBM ve XGBoost bu sette Ridge'i geçmedi. ARIMA katmanı, Ridge'in bıraktığı düzeyi dünden yarına taşıdığı için işe yaradı; ham seriyi tek başına açıklayan bir sihir değildi.

Kilitli holdout'ta naif modeli geçtim; MAE 3,99'a indi. Buna karşılık sapma kaldı, işaret bile değişti. Yüksek fiyat rejimini çözdüğümü iddia etmiyorum. 24 saatlik üretim teslimi de yoktur. Yakıt, arıza ve sınır ötesi kısıt gibi dış değişkenler eksiktir. Tek bir 2018 dilimi, bir piyasanın tamamını temsil etmez.

Elimde kalan çerçeve nettir. Kronolojik, sızıntısız, walk-forward ile seçilmiş ve testte bir kez değerlendirilmiş bir hat. Sunum sırası Ridge, LightGBM, XGBoost, ARIMA, Ridge+B+AR(1)'dir. Kilitli teslimat sonuncusudur. Gün öncesi fiyat tahmini için önce ilgili saatte elde bulunan bilgi yazılmalıdır; model ondan sonra kurulmalıdır.