

MADDE

<https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>

AÇIK

Enerji eşitliği açığını kullanarak gizli enerji yoksulluğunu ortaya çıkarmak

Şuchen Kong^{1,2}✉, Kader Nock^{1,2}✉, Yueming Lucy Qiu³✉ & Bo Xing⁴

Gelire dayalı enerji yoksulluğu ölçümleri, insanların davranış kalıplarını, özellikle de finansal stresi sınırlamak için enerji tüketimini azaltmayı göz ardı eder. Düşük gelirli hanelerde enerjiyi sınırlayan davranışı, konut elektrik tüketimi veri setini kullanarak araştırıyoruz. Önce hanelerin soğutma sistemlerini kullanmaya başladığı dış mekan sıcaklığını, yani dönüm sıcaklığını belirliyoruz. Göreceli enerji yoksulluğu ölçümümüz, enerji eşitliği açığı, düşük ve yüksek gelirli gruplar arasındaki dönüm sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanır. Çalışma bölgemizde, enerji eşitliği açığının 4,7–7,5 °F (2,6–4,2 °C) arasında olduğunu tahmin ediyoruz. 4577 haneden oluşan bir örnekleme, 86 enerji fakiri ve 214 enerji güvencesiz hane bulduk. Buna karşılık, gelir tabanlı enerji yoksulluğu metriği, enerji yükü (%10 eşik), 141 haneyi enerji güvencesiz olarak tanımladı. Enerji eşitliği açığımız ile gelir tabanlı ölçüm arasında yalnızca üç hane örtüşüyor. Bu nedenle, enerji eşitliği açığı, enerji yoksulluğunun ve güvencesizliğinin gizli ancak tamamlayıcı bir yönünü ortaya koyuyor.

¹Mühendislik ve Kamu Politikası Bölümü, Carnegie Mellon Üniversitesi, Pittsburgh, PA, ABD. ²İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Carnegie Mellon Üniversitesi, Pittsburgh, PA, ABD. ³Kamu Politikaları Okulu, Maryland Üniversitesi, College Park, College Park, MD, ABD. ⁴Tahmin, Kaynak Planlama ve Geliştirme Departmanı, Salt River Projesi, Tempe, AZ, ABD. ✉eposta: dnock@andrew.cmu.edu; yqiu16@umd.edu

Enerji yoksulluğu, gelirin büyük bir yüzdesinin enerji faturalarını ödemeye harcanması, elektrik kesintisi riskinin artması ve bir hanenin konforlu iç mekan sıcaklıklarını koruyamaması veya istenen hizmetleri (örneğin klima, ısıtma, bilgisayar) kullanamaması şeklinde kendini gösterir.^{1,2} Enerji yoksulluğu analizinde sıklıkla göz ardı edilen bir alan, finansal stresi ölçen metrikler (toplam gelire göre enerji harcaması olarak tanımlanan enerji yükü) ile enerji hizmetlerinin tamamen yokluğu (hizmet kesintileri) arasındaki boşluğu yer alır. Bu boşluğun içinde, finansal sıkıntıyı azaltmak için enerji tüketimlerini sınırlandıran haneler bulunur. Bu haneler, gelirlerinin küçük bir kısmını enerji faturalarına harcarken, hizmet sağlayıcının elektrik tedarikini kesmesini önlemek için yeterli enerjiyi sınırlayabilirler. ABD’de her yıl aşırı sıcağın 1300 kişinin öldüğü tahmin edilmektedir.³ Sadece 2009 ve 2010 yıllarında, ABD’de 8250’den fazla acil servis ziyareti ısı çarpmasından kaynaklandı,⁴ düşük-

İklim değişikliğinin etkileri sıcak hava dalgaları şeklinde kendini gösterirken⁷ ve derin dondurucular nedeniyle, toplumların uyum sağlaması (yani hastalık ve ölüm riskini azaltması) gerekecektir.⁸ evlerinde konforlu iç mekan sıcaklıkları yaratarak. Ancak bu, enerji açısından verimli ısıtma ve soğutma sistemlerini benimsemek için kaynaklarına güvenip güvenemeyeceklerine bağlıdır, yani enerji tüketimlerini sınırlayan ve potansiyel olarak kendilerini sıcak çarpması veya hipotermi riskine atan birçok savunmasız hane, mevcut programlar kapsamında enerji yoksulluğunun hafifletilmesi için uygun olmayabilir.

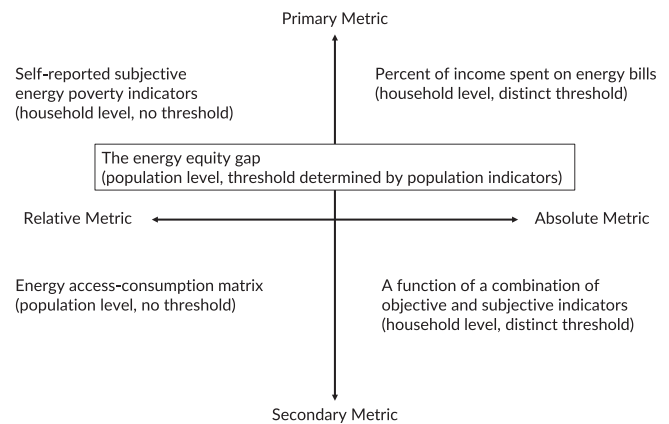
Örneğin ABD'de iki ana enerji yardım programı olan Düşük Gelirli Ev Enerji Yardım Programı (LIHEAP) ve Hava Koşullarına Dayanıklılık Yardım Programı (WAP), uygunluğu belirlemek için bir gelir eşiği kullanır^{9,10}LIHEAP, bir hanenin enerji yükündeki azalmayı, hizmet kaybını önlemeyi ve hizmetin yeniden sağlanmasını kullanarak yardımının etkinliğini hesaplar. WAP, performanslı hava koşullarına dayanıklı hale getirilmiş hane sayısı ve yardım alanları için hava koşullarına dayanıklı hale getirildikten sonraki anketlere dayanan, enerji yükündeki değişim ve enerji faturalarını ödemek için yiyecek gibi diğer ihtiyaçlardan feragat etmedeki değişim gibi sorular içeren ev sahiplerine daha fazla yöneliktir.^{9,11} Bu, bu programların insanların yiyecek veya sağlık hizmeti gibi diğer ihtiyaçlara kıyasla enerji ihtiyaçlarını ilk önce karşıladıkları veya karşılamaya çalıştıkları yönünde örtük bir varsayım bulunduğunu göstermektedir. Ne WAP ne de LIHEAP, diğer ihtiyaçları karşılamak için enerji tüketiminden vazgeçenleri (yani enerjiyi sınırlayan davranışları) açıkça hesaba katmaz ve enerji yoksulluğunun net bir tanımını sunmaz.⁹Enerjiyi diğer ihtiyaçlar için harcayan hanelerin dikkate alınmaması, yoksulluğun çok boyutlu doğasının belirlenmesinde bir sınırlama oluşturmaktadır.^{12,13} ve politika müdahalesi seçeneklerini azaltır. LIHEAP ve WAP'ta, harcama kalıpları bu enerji yardım programlarının etkinliğini ölçmek için yeterli yollar olarak görülür^{9,11}.

Daha geniş anlamda, enerji yoksulluğu, arz eksikliği, düşük karşılanabilirlik, sınırlı miktar, düşük kalite, güvenilirlik veya bu eksikliklerin bir kombinasyonu nedeniyle yetersiz enerji erişimi olarak tanımlanır. Mevcut enerji yoksulluğu ölçütleri şu kategorilere ayrılır: A) birincil veya ikincil ve B) Şekil 2’de görüldüğü gibi göreceli veya mutlak.¹ Burada her kategori kombinasyonu tanımlıyoruz ve her birinin bazı örneklerini sağlıyoruz. Birincil bir metrik, doğrudan tüketici düzeyindeki bilgileri kullanan bir metrik olarak tanımlanır. İkincil bir metrik, bir sonuca ulaşmak için türetme gerektirir. İkincil metrikler, fayda bilgilerini toplayan veya yoksulluk endeksleri için ağırlıklı puanlama kullanan metrikleri içerir. Göreceli bir metrik, iki veya daha fazla varlığın (yani, ülke-ülke veya hane-hane) enerji yoksulluk durumunu karşılaştırır veya

kendiyle bir olmak (yani, bir ülke için zaman içindeki ilerleme). Son olarak, mutlak bir ölçüt enerji yoksulluğu için katı bir eşik sağlayacaktır.

Enerji yoksulluğu için göreceli ikincil metrikler, bölgesel veya yerel düzeyden (bireyler değil) özet istatistikleri kullanır ve farklı bölgelerin ilerlemesini bazı kıyaslama ölçütleriyle karşılaştırır. Bunlar genellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji yoksulluğunun azaltılmasındaki ilerlemeyi tanımlamak için kullanılır. Bir örnek, ulusal düzeyde bir erişim tüketim matrisidir¹⁴. Erişim-tüketim matrisleri bir ülkenin enerji profilindeki değişimleri, özellikle yakıt kullanımındaki değişimi ve her yakıtı kullanan kişi sayısını gösterir. Az gelişmiş bir ülkede daha fazla insan enerji hizmetlerine erişiyorsa ve gelişmekte olan bölgelerde daha fazla insan daha kirli yakıtlardan daha temiz yakıtlara geçiyorsa, enerji yoksulluğunun azaldığı bildirilmektedir^{14,15}. Gelişmekte olan bölgelerdeki enerji yoksulluğunun genellikle modern enerji hizmetlerine erişim eksiğiyle anlanına gelmesi nedeniyle, ulusal enerji erişim ölçütleri en iyi şekilde orantılı olarak etkilenen etendizi enerji erişimi, başlıca yakıt ve ömlemler, uygun seçme erişimi kabul ediliyorlar^{14,15}.

Göreceli-birincil metrikler doğrudan hanelerden veya bireylerden gelir ve enerji yoksulluğu hislerini nüfus içindeki diğerleriyle kıyaslar. Bunlar, enerji yoksulluğuna ilişkin öz algıya ilişkin sorular soran bir anketten alınan puanlar olabilir. Örneğin, Yunanistan'da yapılan bir anket, öznel enerji yoksulluğu hissini elde etmek için "evi yeterince sıcak tutamama", "sızıntılar, nemli duvarlar, kûf" ve "diğer temel ihtiyaçların kısıtlanması" gibi göstergeler kullandı^{16,17}10 enerji yükü eşiğıyle karşılaştırıldığında, çalışma bir hanenin nesnel olarak enerji açısından fakir olarak kategorize edildiğinde, öznel göstergeler için "evet" yanıtını verme olasılıklarının daha yüksek olduğunu buldu. Başka bir çalışma, iyi sosyal ilişkiler ve daha yüksek kaliteli enerji erişimi arasında pozitif bir geri bildirim döngüsünün bulunduğu sosyal ilişkiler ve enerji erişimi arasındaki ilişkiyi araştırıyor^{2,18}Ancak anket tabanlı ölçümlerin dezavantajları, uzun tamamlanma süreleri ve yaşanan enerji yoksulluğu düzeyini karşılaştırmanın zorluğudur.



Şekil 1. Enerji yoksulluğu ölçümlerinin kategorileri. The X-eksen, göreceli veya mutlak metrikleri veya metriğin enerji yoksulluğu için belirgin bir eşik değerine sahip olup olmadığını temsil eder. Y-eksen, birincil veya ikincil metrikleri veya bir metriğin hesaplanması için temel tüketici düzeyindeki verilerden daha fazlasını gerektirip gerektirmediğini temsil eder. Birincil bir metrik, enerji yükü veya enerji faturalarına harcanan gelir yüzdesi olabilir; birincil-göreceli bir metrik, kendi kendine bildirilen enerji yoksulluğu göstergeleri olabilir; ikincil-mutlak bir metrik, enerji yükü ve anket sonuçlarına göre keyfi bir puanın hesaplandığı önceki ikisinin bir kombinasyonu olabilir; ve ikincil-göreceli bir metrik, genellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji erişiminin ilerlemesini tasvir etmek için kullanılan bir enerji erişim-tüketim matrisi olabilir. Enerji eşitliği açığı, hem göreceli hem de mutlak olabilen birincil bir metriktr ve bize bir bölgenin göreceli enerji eşitliği ilerlemesini ve hanehalkı düzeyindeki enerji yoksulluğunu söyleyebilir.

haneler arasında. Konut özellikleri ve algılanan enerji yoksulluğu üzerine birçok anket çalışması olmasına rağmen^{16,19,20}, bir hanenin mali yükü hafifletmek için vazgeçtiği enerji miktarını (yani enerjiyi sınırlayan davranış) ölçebilecek ölçütlerin eksikliğini buluyoruz. Bu nedenle, enerjiyi sınırlayan davranış algılarını ortaya çıkarmak için veri odaklı yaklaşımlarla birlikte anketler kullanılması ve aynı zamanda insanların enerji tüketimini gerçekten ne ölçüde sınırladığının belirlenmesi gerekmektedir.

Mutlak ikincil metrikler, enerji kullanımına ilişkin bilgileri önceden belirlenmiş bir eşik değerine göre karşılaştırır. Bu metrikler genellikle gelir tabanlı metrikleri sosyodemografik faktörler ve konut koşullarıyla birleştirilerek enerji yoksulluğunu ölçmek için ağırlıklı bir puan hesaplar^{2,18}. Ancak, bu önlemler (gelir bazlı, anket ve birleşik) şu anda enerji yoksulluğu yaşayanları seçtiğinden, zaman içindeki dağılım değişikliklerini ve enerji yoksulluğu deneyiminin nüfusun geri kalanına göre ciddiyetini gözden kaçırabilir. Ek olarak, bir sınırlama da bu ölçümlerin genellikle eşitliğe (yani, belirli bir statüye ulaşan tüm haneler) odaklanması ancak enerji yoksullarının enerji yoksulu olmayanlarla nasıl karşılaştırıldığını belirleyemedikleri için eşitliği gözden kaçırmasıdır. Enerji eşitliğine ulaşmak, herkese istenen enerji tüketim seviyesine ulaşmak için aynı araçları vermek anlamına gelir. Örneğin, hanelere gelirlerinin %10'undan daha azını mevcut enerji faturalarına harcamaları için bir kupon sağlamak. Enerji eşitliğine ulaşmak, gruplara fırsatlardan eşit şekilde yararlanabilmeleri veya istenen bir hedefe ulaşabilmeleri için farklı türde araçlar vermek anlamına gelir. Örneğin, bir enerji eşitliği politikası, her bir kişinin evlerini istedikleri konforlu sıcaklığa soğutmak veya ısıtmak için yeterli yardımı almasını gerektirebilir.

Mutlak birincil metrikler bireysel veya hanehalkı bilgilerini kullanır ve enerji kullanımını ve diğer bilgileri önceden belirlenmiş bir eşike göre ölçer. Bu metrikler genellikle hanehalkı düzeyindeki enerji yükünü (yani, gelire göre enerji harcamasını) ölçmek için kullanılır. Alta yatan teori, enerjiye harcanan gelirin önemli yüzdesi ne kadar fazlaysa, Engel'in gıda harcaması Katsayısı'na benzer şekilde, kişinin o kadar enerji fakiri olduğudur.²¹ Bir hanenin enerji açısından fakir olduğunu gösteren enerji yükü için ortak bir eşik (1991'de önerildi) %10'dur.^{9,18} Enerji yükü, elektrik fiyatı, diğer malların fiyatları ve ısıtma veya soğutma ihtiyaçları gibi bir dizi faktöre bağlı olabilir.¹ Bu eşik metriğinin avantajı, enerji ihtiyaçlarını karşılamanın ekonomik yükünü göstermesi ve yüksek bir hesaplama yükü olmamasıdır. Ancak, enerji yükü eşik metriğinin kullanılmasının sınırlamaları arasında brüt (yani vergi öncesi) ve harcanabilir gelir (yani vergi sonrası ve ipotek ve kira gibi diğer zorunlu ücretler) arasında ayırım yapılmaması, iç mekan konfor seviyelerinin dikkate alınmaması ve yerel ve cari yaşam maliyetlerinin dikkate alınmaması yer alır.¹⁸ Sonuç olarak, haneler aynı vergi öncesi gelir düzeyine sahip olabilir ancak ipotek veya kira maliyetleri oldukça farklı olabilir; bu da brüt gelirdeki %10 eşişinin, gelirlerinin %90'ından fazlasını diğer temel ihtiyaçlara harcayan kişileri göz ardı edebileceği anlamına gelir.²²

Tüketici davranışlarını yakalamak için yeni ölçümlerin (örneğin, enerjinin yetersiz tüketimi ve termal konfor seçimi) son zamanlarda geliştirilmesine rağmen^{3,8} Gelişmiş ülkelerdeki hükümet yardım programları için hane düzeyindeki enerji yoksulluğu değerlendirmesi mutlak birincil gelir tabanlı ölçütler tarafından yönlendirilmiştir^{9,18,23,24}. Bu gelir bazlı ölçümler yaygın olarak kullanılsa da birkaç eksikliği vardır. Birincisi, enerji fiyatlarına karşı hassaslar ve hanelerin fiyat değişikliğinden sonra enerji tüketim davranışlarını ne ölçüde değiştirdiklerini maskelerler.¹⁸ İkincisi ve belki de daha önemlisi, enerji yükü metriği, finansal stresi azaltmak için enerji kullanımından vazgeçen savunmasız düşük gelirli haneleri kapsamaz. Son olarak, gelire dayalı metrikler, evleri konforlu ve/veya güvenli sıcaklıklara soğutmak veya ısıtmak için yeterli enerjiyi kullanamama gibi enerji yoksulluğunun temel boyutlarını gözden kaçırır.²⁵

Bir hanenin arzu edilen enerji talebini karşılayamamasını araştıran makalelerin çoğu, gelişmekte olan ülkelerdeki elektrik arzı ve güvenilirlik kısıtlamalarına odaklanmaktadır²⁶⁻²⁸ ve gelişmiş ülkelerde enerji uygunluğu^{1,29,30} Gelişmiş ülkelerde (yani, %100'e yakın elektrik arzı erişimi olanlar)³¹, enerji yoksulluğu ve güvensizliği, 1) ödeme yapılmaması nedeniyle elektrik kesintileri, 2) mali sıkıntı nedeniyle ısıtma hizmetlerinden vazgeçme ve güvenli olmayan uygulamalara katılma (örneğin, ısıtmak için soba veya fırın kullanma, yangınlara yol açan mekan ısıtma teknolojilerinin güvenli olmayan şekilde kullanılması) şeklinde kendini gösterebilir.³² 3) gelirin büyük bir yüzdesini enerji faturalarına harcamak ve 4) temiz enerji ve verimli teknolojileri benimsemede zorluk^{17,33-35} Birçok makale enerji yoksulluğunun göstergelerini ele alırken^{9,36,37} ve güvensizlik^{17,35}, kendilerini ısıyla ilgili hastalık, aşırı iç mekan nemi, küf oluşumu ve diğer olumsuz sağlık etkileri riskine sokabilecek enerji kısıtlayıcı haneleri (yani konforlu iç mekan sıcaklıklarına sahip olmayanlar) belirleyebilecek ölçümlerin eksikliğini buluyoruz^{35,38,39} (örneğin solunum yolu hastalıkları ve astım).

Tüm nüfusun modern enerji altyapısına erişebildiği ülkelerde, hane düzeyindeki enerji yoksulluğu, hane içinde yetersiz enerji hizmetleri olması veya enerjiyi istenilen düzeyde tüketememe şeklinde kendini göstermektedir.² Bu nedenle, enerji yoksulluğunun daha bütünsel bir tanımı, enerji tüketimlerini sınırlayan (yani, enerji sınırlama davranışı gösteren) ve gelirlerinin büyük bir kısmını enerji faturalarına harcayan (yani, yüksek enerji yükü) kişileri içerecektir. Çalışmamız, enerji sınırlama davranışını belirleyebilen bir ölçüm oluşturarak bu boşluğu dolduruyor. Enerji sınırlama davranışını, bir hanenin istenen konfor seviyesine ulaşmak için yeterli enerjiyi tüketmemesi veya tüketmek istememesi olarak tanımlıyoruz. Bir hane, enerji harcaması için bütçe kısıtlaması olmayan aynı bölgedeki başka bir hanenin enerji tüketimini önemli ölçüde altına düşürürse enerji sınırlama davranışı gösterir. Örneğin, A ve B hanelerinin aynı bölgede yaşadığını ve ideal iç mekan sıcaklıkları için benzer tercihlere sahip olduğunu varsayalım, yaklaşık 70 °F (21 °C). A hanesi düşük gelirli bir hanedir (yani, enerji harcamasında bütçe kısıtlaması vardır) ve B hanesi yüksek gelirli bir hanedir (yani, bütçe kısıtlaması yoktur). Eğer Hane B, dışarısı 21 °C (70 °F) iken klima ünitesini kullanmaya başlarsa, fakat Hane A dışarısı 24 °C (75 °F) olana kadar beklerse, bu durumda Hane A, Hane B'ye kıyasla 3 °C (5 °F) enerji sınırlama davranışı sergiliyor demektir.

Burada, enerji yoksulluğunun kritik bir yönünü (yani enerji sınırlayıcı davranışı) yakalayan ve bir bölgedeki eşitsizliği yakalamak için tamamlayıcı bir ölçüm sağlayan davranışa dayalı bir enerji yoksulluğu ölçüsü olan enerji eşitliği açığını sunuyoruz. İlk olarak, hanelerin soğutma sistemlerini kullanmaya başladığı dış mekan sıcaklığını, yani dönüm sıcaklığını belirliyoruz. Ardından, göreceli enerji yoksulluğu ölçümümüz olan enerji eşitliği açığı, düşük ve yüksek gelirli gruplar arasındaki dönüm sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanıyor. Çalışma bölgemizde, enerji eşitliği açığının 4,7 °F (2,6 °C) ile 7,5 °F (4,2 °C) arasında olduğunu tahmin ediyoruz. 2015-2016'da, 4577 haneden oluşan örneğimizde 86 enerji yoksulu ve 214 enerji güvencesiz hane bulduk. Buna karşılık, gelir bazlı enerji yoksulluğu ölçütü olan enerji yükü, eşik %10 olarak belirlendiğinde 141 hanenin enerji güvencesiz olduğunu tespit etti ve yalnızca üç hanenin enerji eşitliği açığımızla gelir bazlı ölçüm arasında örtüştüğü görüldü.

Sonuçlar

Konutlardaki elektrik tüketim modellerinin niceliksel olarak belirlenmesi. Gelir tabanlı enerji yoksulluğu ölçümleri tarafından geride bırakılan haneleri yakalamak için farklı bir enerji yoksulluğu metriği öneriyoruz: enerji eşitliği açığı. Rahat iç mekana ulaşamama riski taşıyan haneleri belirlemedeki etkinliğini gösteriyoruz

sıcaklıklar ve muhtemelen ısıyla ilgili hastalıklar. ABD'deki çalışma bölgemiz Arizona'da uzun, yüksek sıcaklıklı yazlar ve ılıman kışlar vardır (bkz. Ek Bilgi Notu 6). Arizona'da ısıyla ilgili hastalıkların seviyesi daha yüksektir (2019'da 2944 ısıyla ilgili acil servis ziyareti⁴⁰) soğuk algınlığıyla ilgili hastalıklarla karşılaştırıldığında (2019'da 495 soğuk algınlığıyla ilgili acil servis ziyareti⁴¹), yazın soğutma enerjisinin büyük kısmını elektrik sektörünün sağlaması (klima (AC) veya vantilatör kullanımı) nedeniyle enerji yoksulluğu analizimizi elektrik sektörüne odaklamamıza yol açıyor. Soğutma sistemi kullanımının belirlenmesi, temiz enerji geçişi için faydaların uygun şekilde dağıtılmasına dayanan enerji adaletini ele almak ve planlamak için hayati önem taşıyor⁴²⁻⁴⁴ve sıcak hava dalgalarının etkisini azaltma yeteneği. Ayrıca, en savunmasız hanelerin enerji yoksulluğu ihtiyaçlarını belirlemek ve ele almak için kademeli bir sistem sunuyoruz ve bunu mevcut gelir tabanlı ölçümle karşılaştırıyoruz.

Enerji eşitliği açığı, gelir grupları arasında tüketici elektrik tüketim davranışının sıcaklıkla nasıl değiştiğini araştıran bir ölçüdür (yani tüketicilerin sıcaklık tepkisi fonksiyonları). Önceki araştırmalar, tüketicilerin sıcaklık tepkisi fonksiyonlarının (enerji kullanımını sıcaklığa veya diğer iklim faktörlerine göre modelleme) iklimle nasıl değiştiğini araştırmıştır^{45,46}, ancak bu işlevleri enerji yoksulluğu tanımlamasına dahil etmediler. Enerji eşitliği açığı metriği, dış mekan sıcaklığının enerji tüketimi üzerindeki etkisini ele alır ve bütçelerinde daha az kısıtlama olanların bölgede konforlu bir iç mekan sıcaklığını korumak için istenen enerji tüketim seviyesi için eşik belirlediği göreceli enerji sınırlayıcı davranışı niceliksel olarak belirler (Yöntemlere bakın). Enerji eşitliği açığını kullanarak, bir metropol bölgesindeki gelir grupları arasındaki elektrik kullanım modellerini ölçüyoruz, böylece büyük çalışma alanlarında meydana gelebilecek farklı haneler için hava durumu veya dış mekan sıcaklığının elektrik kullanımı üzerindeki etkisini ortadan kaldırıyoruz. Birincil-göreceli enerji yoksulluğu metriğimiz olan enerji eşitliği açığının bir faydası, politika yapımcıların öncelikle bölgelerini ısıyla ilgili hastalıklar veya enerji sınırlayıcı davranışlar açısından risk altına sokan dış mekan sıcaklığını belirleyerek daha hedefli enerji adaleti çabaları gösterebilmeleridir. Eşik belirlendikten sonra, politika yapımcılar göreceli metriğimizi kullanarak enerji yoksulluğuna düşmeye tehlikeli derecede yakın olan enerji güvensiz haneleri belirleyebilir ve yüklerini azaltmak ve konforlarını artırmak için enerji tüketme yeteneklerini artırmak için proaktif önlemler oluşturabilirler. Enerji eşitliği açığı, hane düzeyindeki elektrik tüketim davranışını yakalamanın yanı sıra, bir bölge içindeki nüfus düzeyindeki enerji eşitliğinin zamansal olarak karşılaştırılmasına da olanak tanır.

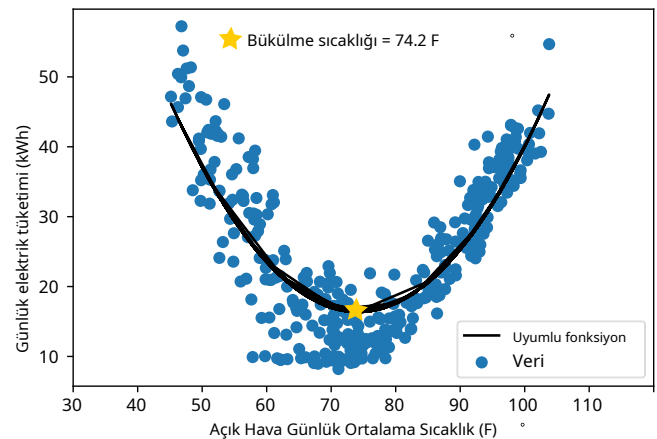
Enerji eşitliği açığının temeli hane düzeyindeki dönüm sıcaklıklarıdır. Davranış metriğe en iyi şekilde dahil etmek için dönüm sıcaklığını, bir hanenin ilkbahardan yaz geçerken soğutma sistemini kullanmaya başladığı dış mekan sıcaklığı olarak tanımlıyoruz; gelir grupları arasında konfor tercihi veya ihtiyacında bir fark olmadığını varsayıyoruz. Her hanenin dönüm sıcaklığını bulmak için günlük elektrik tüketimi, ortalama günlük sıcaklık, elektrik fiyatlandırma planı, tatil etkileri ve haftanın günü ve yılın ayı sabit etkileri kullanılarak modellenir (Yöntemlere bakın). Yukarıda belirtilen yardımcı değişkenler kontrol edildikten sonra elektrik tüketimi ve sıcaklık arasındaki ikinci dereceden denklemin minimum değeri, insanların soğutma sistemlerini kullanmaya başladığı sıcaklık, dönüm sıcaklığı (Şekil) olarak tanımlanır.²) Bu varsayım, 1) ısıtma ve klima sistemlerinin bir hanedeki en büyük enerji tüketicisi olmasından kaynaklanmaktadır.⁴⁵ve 2) çalışma bölgemizin kısa, ılıman kışlar ve uzun, yüksek sıcaklıklı yazlar ile sıcak ve kuru bir iklime sahip olması. Çalışma bölgesi daha soğuk bir iklimde veya daha belirgin mevsimlere sahip bir iklimdeyse, yılı iki iklim bölgesine ayırmanızı öneririz (yani, ilkbahar-yazsonbahar ve sonbahar-kış-ilkbahar). Enerji eşitliği açığını ısıtma sistemi enerji kullanımını belirlemek için uyarlamak için şunları dahil etmemiz gerekir:

gaz ve petrol sektöründen bilgi. Isıtma sektörü analizini gelecekteki çalışmalara bırakıyoruz. Düşük gelirli hanelerin yazın paradan tasarruf etmek için evlerini soğutmaya başlamadan önce daha yüksek sıcaklıklara dayanma olasılıklarının daha yüksek olduğunu ve bu nedenle daha yüksek dönüm sıcaklıklarına sahip olabileceklerini varsayıyoruz.

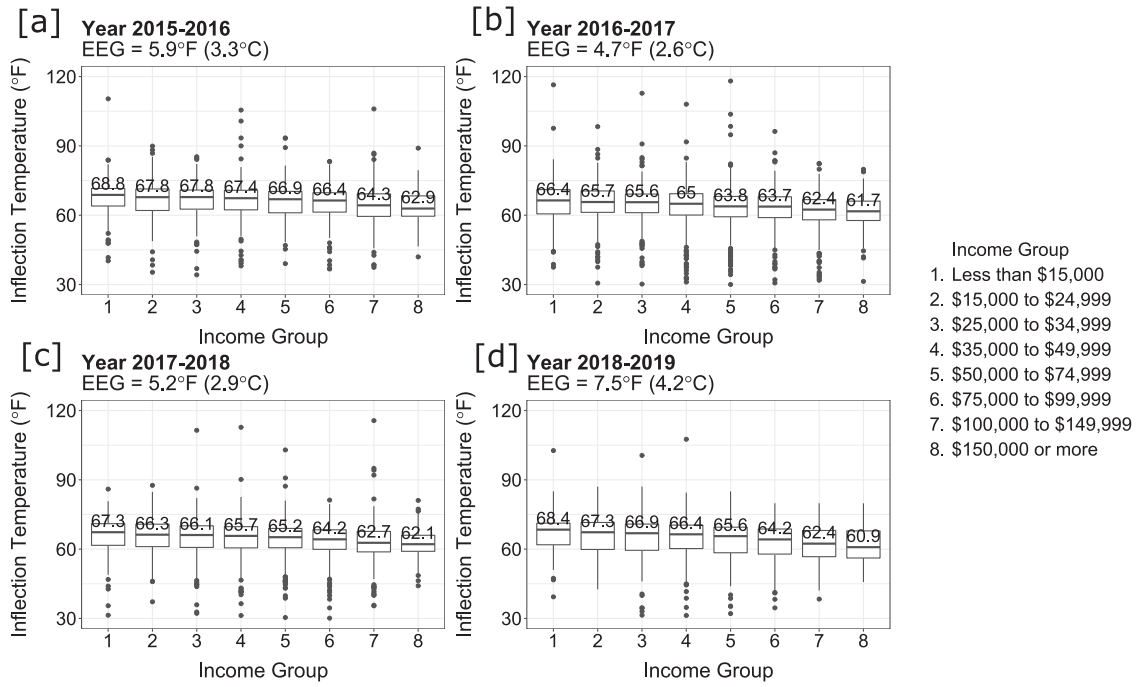
Enerji yoksulluğunun ve enerji güvensizliğinin yeniden tanımlanması. Enerji eşitliği açığı, tüm gelir grupları arasında en yüksek ve en düşük medyan hanehalkı dönüm sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1).³ çalışma bölgesinin, Arizona'daki bir metropol alanı (Yöntemlere bakın). Ölçüyü aykırı değerlerden duyarısızlaştırmak için ortalama yerine medyanı kullanmayı seçtik. Enerji eşitliği açığı, bir bölge için gelir yelpazesinde enerji kullanımındaki eşitsizliği gösterirken iklim ve elektrik fiyatlandırmasının etkisini ortadan kaldırır. Metropol bölgemizde, örnek verilerdeki haneler için iklimin tekdüze olduğunu ve herkesin aynı enerji hizmetlerine erişebildiğini varsayıyoruz. Bu nedenle, enerji eşitsizliğinin azaldığının bir işareti, hanelerin benzer bir dönüm noktasına doğru yakınsadığını ve dolayısıyla enerji eşitsizliğinin azaldığını gösteren daralan bir enerji eşitliği açığı olacaktır.

Hane düzeyindeki dönüm sıcaklıklarının gelir gruplarına göre dağılımı Şekil'de gösterilmektedir.³Enerji eşitliği açığının 2,6-4,2 °C (4,7-7,5 °F) arasında değiştiğini görüyoruz; bu da düşük gelirli grupların yüksek gelirli gruplara kıyasla yaz sonuna kadar soğutma hizmetlerinden vazgeçme olasılığının daha yüksek olduğunu vurgulamaktadır (başka bir örnek analiz için Ek Bilgi Notu 5'e bakın). Ayrıca, her gelir grubu arasındaki medyan dönüm sıcaklıkları arasında tüm yıllar için istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır; bu da dönüm sıcaklığı farklarının şans eseri meydana gelme olasılığının düşük olduğu anlamına gelir; bu, Mood'un Medyan testi kullanılarak doğrulanmıştır (Yöntemlere bakın).

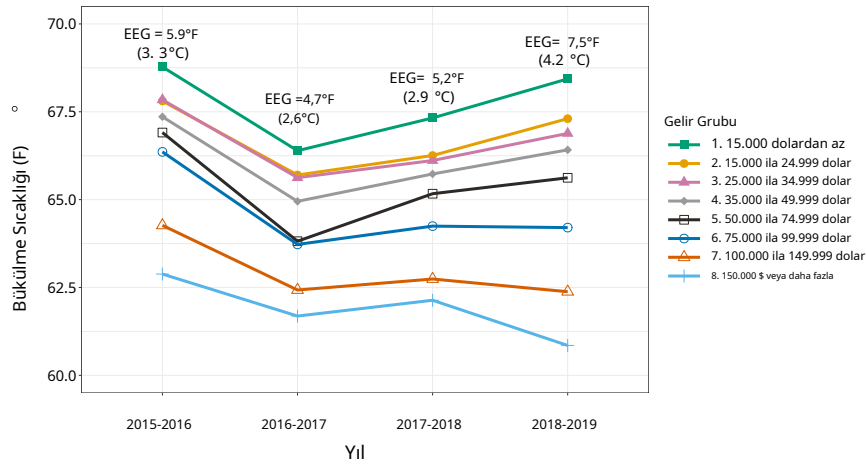
Figür4Analizimizdeki dört yıl boyunca gelir grupları arasında enerji eşitliği açığındaki değişimi göstermektedir. Daha yüksek dönüm sıcaklıkları, düşük gelirli hanelerin klima ünitelerini açmak için daha uzun süre bekleme eğiliminde olduklarını, bunun da altta yatan kısıtlamalara, bütçeye veya başka bir şeye işaret ettiğini ve soğutmaya erişimlerini kısıtladığını göstermektedir. Soğutma kısıtlandığında, binaların küf, alerjen ve mantar büyüme oranlarının artması açısından daha yüksek risk altında olduğu gösterilmiştir^{47,48}ve derecesi ne zaman



Şekil 2. Günlük elektrik tüketimi ve yerel günlük ortalama dış ortam sıcaklığı için dönüm sıcaklığının belirlenmesi. Bu grafik bir hanenin bir yıl boyunca günlük elektrik tüketimini göstermektedir (N = 365). Yıldız, bu hane için bu yılki dönüm sıcaklığını işaretler. Gerçek sıcaklık tepki fonksiyonumuzun elektrik fiyatı, hafta sonu, tatil, haftanın günü ve yılın ayı etkilerini içerdiğini not ediyoruz. Dönüm sıcaklığı, bu faktörler ve dış sıcaklık kontrol edildikten sonra kalıntılar arasındaki ikinci dereceden sıcaklık tepki fonksiyonunun minimumudur.



Şekil 3. Gelir gruplarına göre dönüm sıcaklığının dağılımı. Her yıl için enerji eşitliği açığı (EEG), dört paneldeki tüm gelir grupları arasında en yüksek ve en düşük medyan dönüm sıcaklığı arasındaki fark (ortadaki çubuk ve sayı ile gösterilir) olarak hesaplanır; gelir grubu 1 en yüksek medyan dönüm sıcaklığına, gelir grubu 8 ise en düşük medyan dönüm sıcaklığına sahipti. Enerji eşitliği açığı (EEG), her panelin en üstünde gösterilir. A) 2015–2016N = 4577 hane, (B) 2016–2017N = 4522 hane, (C) 2017–2018N = 3852 hane, (D) 2018–2019N = 2650 hane. Her kutu ve bıyık çizimi, bir gelir grubunun bir yıl boyunca dönüm sıcaklıklarının minimum ve maksimumlarını (bıyıkların alt ve üst sınırı), birinci ve üçüncü kantilleri (kutunun alt ve üst sınırı) ve medyanı (orta çizgi) gösterir. Aykırı değerler, bıyıkların her iki tarafında noktalar olarak gösterilir. Kaynak veriler kod deposunda bulunabilir.



Şekil 4. Çalışma yılları boyunca enerji eşitliği açığı (EEG) ve medyan dönüm sıcaklığı değişimleri. Her satır bir gelir grubunu temsil eder. Her veri noktası o yıl için gelir grubunun medyan dönüm sıcaklığını temsil eder.

rahatsızlık çok fazla olduğunda (yüksek iç ortam sıcaklığı) nüfus ısı çarpmasına yakalanma riski daha yüksek olur⁴⁹.

Enerji eşitliği açığı, düşük gelirli hanelerin önce dönüm sıcaklıklarını düşürmeleri ve sonra artırmaları sonucunda daralır ve genişlerken, yüksek gelirli hanelerin analizimizde yıllar boyunca dönüm sıcaklıklarını düşürme yönünde genel bir eğilimi vardır. Bu nedenle, bölgede artan enerji eşitsizliği vurgulanmaktadır.

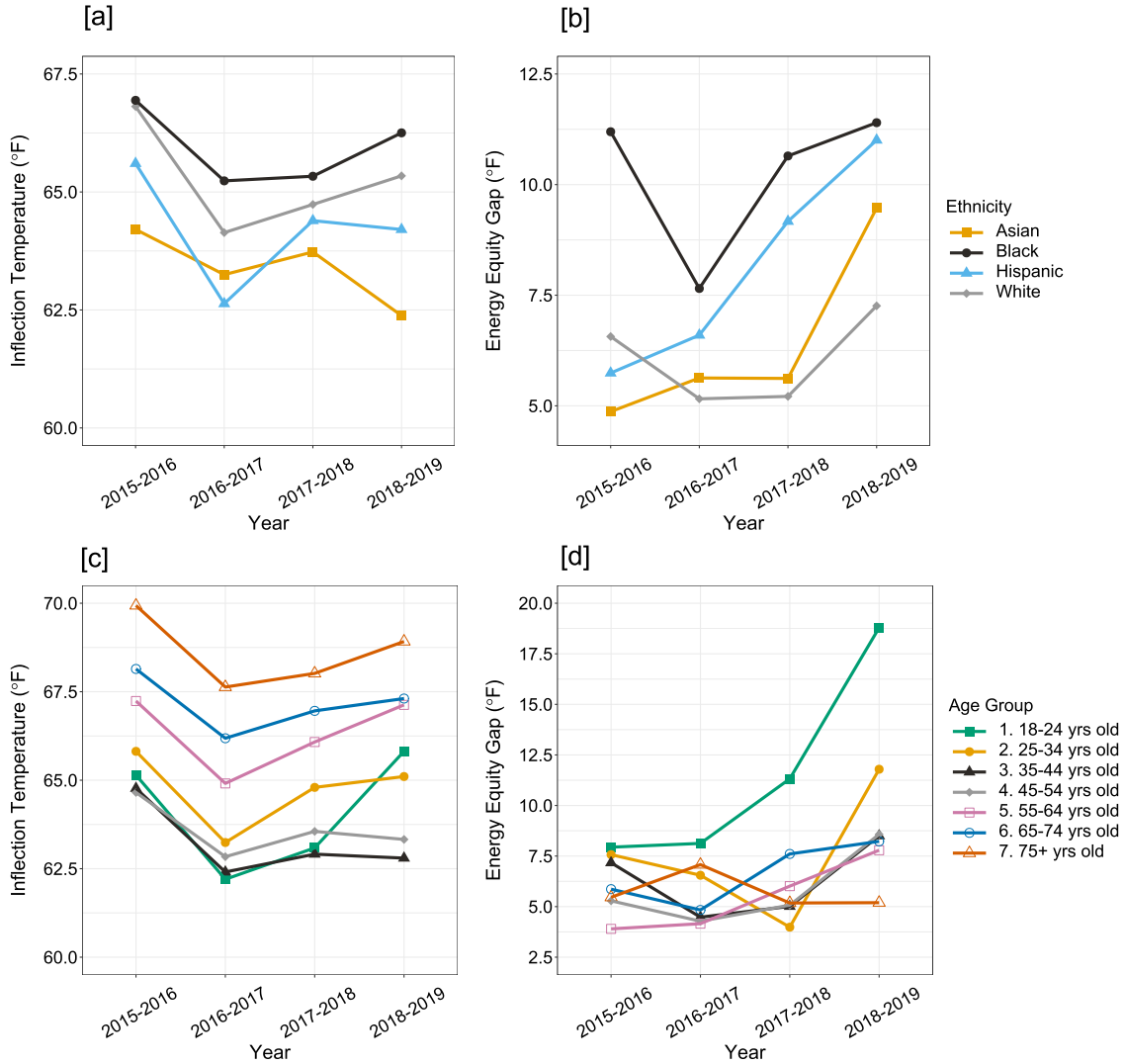
Çalışmamızın ilk iki yılında enerji eşitliği açığı %20,3 daraldı, ancak Tablo'da görüldüğü gibi çalışmamızın son üç yılında sırasıyla %10,6 ve %44,2 oranında genişledi. Soğutma derece günlerinde veya konut elektrik fiyatlarında meydana gelen bir değişikliğin, takip eden yıldaki enerji eşitliği açığındaki değişikliklerle ilişkili olduğunu görüyoruz.

Birinci ve ikinci yıllar arasında, konut elektrik fiyatlarında %2,4'lük bir artış ve soğutma derecesi günlerinde %3,6'lık bir artış oldu. Bu, büyük olasılıkla düşük gelirli grupların AC sistemlerini açmak için daha uzun süre beklemesinden kaynaklanan, 3. yıldaki enerji eşitliği açığındaki %10,6'lık bir artışla paralellik göstermektedir. Bu, yıl bazında konut elektrik fiyatı değişikliklerinde ve ısınan iklimde talep etkilerinin gecikmiş bir fiyat esnekliğini gösterebilir. İkinci ve üçüncü yıllar arasında, konut elektrik fiyatı tekrar %2,7 ve soğutma derecesi günleri %2,5 arttı; bu da yılın enerji eşitliği açığında %44,2'lik bir artışa karşılık geliyor. Bu nedenle, hem daha yüksek bir sıcaklık hem de daha yüksek bir elektrik fiyatı enerji eşitliğinin bozulmasına neden olabilir. Çalışma popülasyonumuzda, düşük gelirli

Tablo 1 Arizona'da sıcaklık, elektrik fiyatı ve enerji eşitliği açığı değişimleri.

Arizona metriği	1. yıldan 2. yıla geçiş	2. yıldan 3. yıla geçiş	3. yıldan 4. yıla geçiş
En Sıcak Ay Ortalama Maksimum dış ortam sıcaklığı	1,0%	- %0,2	- %0,2
Soğutma Derece Günleri (CDD)	%3,6	%2,5	- %5,2
Ortalama konut elektrik perakende fiyatı (sent/kWh)	%2,4	%2,7	- %2,7
Enerji eşitliği açığı	- %20,3	%10,6	44,2%

En Sıcak Ay Ortalama Maksimum, bir yılın en sıcak ayının ortalama maksimum sıcaklığıdır.



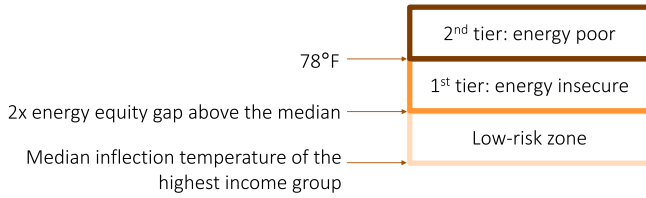
Şekil 5. Etnik köken ve yaş gruplarına göre dönüm sıcaklığı ve enerji eşitliği farkının grup içi ve gruplar arası karşılaştırması.(Ortalama dönüm sıcaklıkları)A) etnik köken ve (C)yaş grubu demografik açıdan farklılıklar göstermektedir. Enerji eşitliği açığı, kendi içlerindeki yüksek ve düşük gelirli nüfuslar arasındaki enerji tüketim davranışları farklılıklarını vurgulamaktadır (B)etnik köken ve (D)yaş grupları. Daha fazla ayrıntı için Ek Bilgi Notları 3 ve 4'e bakın.

hanelerin daha eski konutlarda yaşama olasılığı daha yüksektir (bkz. Ek Bilgi Notu 2), bu da evi soğutmak için gereken daha önemli enerji gereksinimlerine ve mali sıkıntıya katkıda bulunabilir.

Fiyat değişimleri, azınlık grupları içindeki ve birden fazla savunmasız grubun (örneğin, düşük gelirli azınlık grupları veya düşük gelirli yaşlı nüfus) kesiştiği noktalarındaki elektrik tüketim değişimlerini farklı şekilde etkileyecektir. Şekil 5a, c her etnik köken ve yaş grubu için ortalama dönüm sıcaklığını göstermektedir; Şekil 5b, d sırasıyla her etnik köken ve yaş grubundaki enerji eşitliği açığını göstermektedir. Şekil 1'i karşılaştırdığımızda 5a, b (benzer olduğunu varsayarak)

etnik kökenler arasındaki sıcaklık tercihi^{50,51}), genel dönüm noktası sıcaklığının Siyah nüfusta en yüksek olduğunu görüyoruz. Bu, yüksek enerji eşitliği boşluklarıyla birleştiğinde, Siyah nüfusun daha kötü durumda olduğunu ve yüksek düzeyde eşitsizlik yaşadığını gösterir. Asyalı nüfusta, genel medyan dönüm noktası sıcaklıkları düşüktür ancak grup içinde yüksek gelir eşitsizliğini gösteren geniş enerji eşitliği boşlukları vardır.

Siyahi nüfusta, artan eşitsizliğin ardından 1. yıldan 2. yıla elektrik fiyatında %2,4'lük bir artış görüyoruz; bu da tüm nüfusu etkileyen büyük fiyat şokundan daha erken, 2. yıldan 3. yıla enerji eşitliği açığında %39'luk bir artışla sonuçlanıyor.



Şekil 6. Enerji eşitliği açığını kullanarak enerji yoksulluğu ve güvensizliğinin belirlenmesi için kademeli sistemler. Gölge ne kadar koyuysa hane halkının yaşadığı enerji yoksulluğu seviyesi o kadar şiddetlidir.

Bu, Siyah nüfusun diğer etnik kökenlere kıyasla fiyat değişimlerinden orantısız bir şekilde etkilendiğini gösterir. Beyaz nüfus, genel nüfus eğilimine en çok benzeyendir çünkü beyaz nüfus, örneğimizdeki sakinlerin çoğunluğunu (%70'ten fazla) oluşturur. Genel olarak, bir azınlık grubunun medyan dönüm noktası sıcaklığı düşük olsa bile, düşük ve yüksek gelirli nüfuslar arasında yüksek bir farklılık olabileceğini (bkz. Ek Bilgi Notu 3) görüyoruz; bu durum Asyalı nüfusta da belirgindir.

Ayrıca hane reisi yaş grupları arasında enerji yoksulluğunu ve eşitliğini de araştırdık (Şekil.5c, d). Yaş grupları arasında medyan dönüm sıcaklıkları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar vardır ($s < 0,05$), Mood'un Medyan testi kullanılarak doğrulandığı gibi (bkz. Yöntemler), bu değişimlerin yalnızca şansa bağlı olarak meydana gelme olasılığının düşük olduğunu göstermektedir. 18-24 yaş grubu için, hem medyan dönüm sıcaklığı ($>7^\circ\text{F}$, $3,9^\circ\text{C}$) hem de enerji eşitliği açığı 2018 ve 2019 arasında keskin bir şekilde arttı ($>14^\circ\text{F}$, $7,8^\circ\text{C}$), daha yaşlı nüfus için ise enerji eşitliği açığı yıllar içinde çok az değişti. Enerji yoksulluğu hedefleme açısından, bu, yaşlı nüfus içinde tüm sakinlerin dönüm sıcaklıklarını düşürmeye hedeflenmesi gerektiğini, en genç yaş grupları için ise en etkili yoksulluk ortadan kaldıran politikasının düşük gelirli grupları hedeflemek olacağını vurgulamaktadır.

75+ yaş grubu hariç tüm yaş grupları için, enerji eşitliği açığındaki sonraki artış, düşük gelirli hanelerin daha kötü durumda olması ve yüksek gelirli hanelerin daha iyi performans göstermesinden kaynaklanmaktadır; bu durum en çok 18-24 ve 25-34 yaş gruplarında belirgindir. Yaş grupları arasındaki dönüm sıcaklıklarındaki fark, her yaş grubunun farklı sıcaklık konfor seviyelerine atfedilebilir. Yaşlılar daha sıcak iç mekan sıcaklıklarını tercih edebilir ve bir AC sisteminden gelen serin hava artriti alevlendirebilir⁵², ancak rahat bir sıcaklık ile sakini ısıyla ilgili bir hastalık riskine sokan sıcaklık arasındaki farkı ayırt ederken dikkatli olunmalıdır⁵³Hanehalkı geliri ile dönüm sıcaklığı arasında anlamlı bir ilişki olduğu için, genç yaş gruplarındaki yüksek enerji eşitliği açığı, gençler arasındaki gelir eşitsizliğinin daha büyük olmasına bağlanabilir.

Dönüm noktası sıcaklığı ve enerji eşitliği açığının iç mekan termostat tercihlerinden etkilenme ihtimalinin olduğunu kabul ediyoruz. Etnik ve yaş grupları arasındaki farklı tercihleri hesaba katmak için, demografik ayrımlar içinde farklı gelir grupları için dönüm noktası sıcaklığı farklılıklarını araştırıyoruz (bkz. Ek Bilgi Notu 3). Örneğin, bir etnik grup klima ünitelerini belirli bir sıcaklıkta açmayı tercih ederse, dönüm noktası sıcaklıkları için dar bir dikey dağılım bulmayı bekliyoruz (yani, Ek Bilgi Notu 3'teki Hispanik nüfus). Öte yandan, farklı dönüm noktası sıcaklıkları eşitsizliği temsil ediyorsa, geniş bir dikey dağılım bulmayı bekliyoruz (yani, Ek Bilgi Notu 3'teki Siyah ve Asyalı nüfus). Bu nedenle, enerji eşitliği açığı bir bölgedeki gruplar arasında ve gruplar içinde eşitsizlikleri vurgulayabilir. Ek Bilgi Notu 3'te tercih sınırlaması hakkında daha ayrıntılı bir tartışma sunuyoruz.

Kademeli bir sistem sunuyoruz (Şekil.6) ısıyla ilgili hastalık ve ölüm riski en yüksek olan haneleri belirlemek için. İlk olarak, en yüksek gelir grubunun medyan dönüm sıcaklığının bu bölge için ideal dönüm sıcaklığı olduğunu varsayıyoruz. Bu varsayım, en yüksek gelir gruplarının bütçelerini kısıtlama olasılıklarının en düşük olduğu ve bu nedenle yılın en erken döneminde soğutma sistemlerini başlatacakları inancından kaynaklanmaktadır. Standart sapma kullanmaya benzer şekilde, dönüm sıcaklıkları ideal dönüm sıcaklığının bir ila iki enerji eşitliği boşluğu üzerinde olan kişileri düşük risk bölgesinde tanımlıyoruz. Ardından, iki enerji eşitliği boşluğu ve 78°F ($25,6^\circ\text{C}$) arasında dönüm sıcaklığına sahip haneler enerji güvensiz bölgededir. Devlet binaları içinde, iç mekan ayar noktasının 78°F derece olması önerilir⁵⁴, bu sıcaklık ayarının küf ve alerjen birikimi riskini ve ısıyla ilişkili hastalık ve ölümü sınırlayabileceği anlamına gelir. Son olarak, 78°F 'den ($25,6^\circ\text{C}$) yüksek eğim sıcaklıklarına sahip haneler enerji açısından fakir olarak tanımlanır. Evlerin bu dış mekan sıcaklığının üzerinde bir dereceye kadar soğutmaya ihtiyaç duyacağı için, iç mekan 78°F ($25,6^\circ\text{C}$) konfor ayar noktasını enerji yoksulluğu eşliğimiz olarak kullanırız.

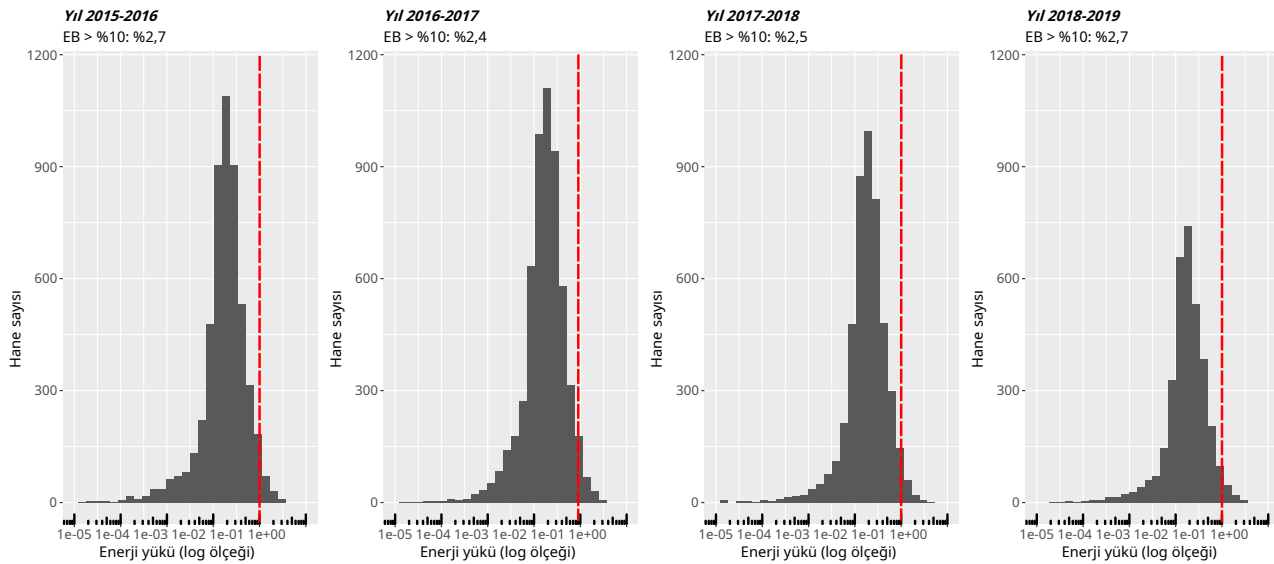
Yüksek ısı sıcaklıklarında konfor seviyelerini ve sakinlerin sağlık riskini etkileyebilecek birden fazla faktör olduğunu kabul ediyoruz. Önceki çalışmalar, dış ortam sıcaklığının 90°F ($32,2^\circ\text{C}$) üzerine çıktığında ısı ölüm riskinin ortaya çıktığını göstermiştir.⁵⁵Ancak hedefimiz, daha düşük bir sıcaklık eşliğinden kaynaklanabilecek hem sağlıkla ilgili hastalık hem de ölüm riski taşıyan haneleri belirlemektir. Bu daha düşük eşik (78°F , $25,6^\circ\text{C}$) hükümet binaları için önerilen iç mekan AC ayarından türetiliyoruz^{54,56}, ayrıca çeşitli kamu hizmetleri şirketlerinin tavsiyelerinden^{57,58}Bu eşikteki temel varsayım, dış ortam sıcaklığı bu seviyenin üzerinde olduğunda, iç ortam sıcaklığının klimayı açmayı gerektirecek kadar yükseleceğidir.

Bu kademeli sistemi kullanarak, politika yapımcılar ve kamu hizmeti şirketleri daha hedefli hava koşullarına dayanlı yardım programları oluşturabilirler. Kademe sistemini 2015-2016 verilerine uyguladığımızda (Tablo2), 86 enerji fakiri (örneğimizin %1,9'u) ve 214 enerji güvensiz hane (örneğimizin %4,7'si) tespit ettik.

Enerji eşitliği açığının gelir temelli ölçümlerle karşılaştırılması. ABD hükümet yardım programlarında enerji yoksulluğu için net bir tanım bulunmazken, enerji yükündeki değişim genellikle bu programların sonucunu ölçmek için kullanılır^{9,11}. Hem LIHEAP hem de WAP, uygunluğu belirlemek için hanehalkı büyüklüğüne göre gelir sınırını kullanır^{59,60}, eyaletlerin uygunluk eşiği olarak hangi gelir düzeyini belirleyeceklerine karar vermeleri için bir miktar esneklikle. Çalışma bölgemizde enerji güvensiz haneleri belirlemek için %10 enerji yükü eşliğini kullandığımızda, hanelerin %3'ünden azının enerji güvensiz olarak tanımlandığını bulduk (Şekil.7), bunların %70'inden fazlası çalışmamızdaki tüm yıllarda en düşük gelir grubunda (<15.000 \$) ikamet etmektedir. Enerji eşitliği açığı kategorizasyonunu bireysel hanelerin enerji yükü ölçüsüyle karşılaştırdığımızda, birkaç hanenin (≤ 20) her iki metriktir de enerji güvensizliği veya enerji fakiri olarak tanımlandı (Tablo2, ayrıca görsel bir sunum için Ek Bilgi Notu 7'ye bakın). Enerji yükü metriği daha fazla haneyi enerji güvensiz olarak kategorize eder, ancak kademeli sistemimiz soğutma ile ilişkili enerji kullanımını sınırlayarak kendilerini riske atabilecek daha fazla enerji fakiri haneyi belirler. Enerji yükü metriği, yüksek dönüm sıcaklıklarına sahip olanların ve dolayısıyla aşırı sığa maruz kalma riskinin daha yüksek olduğu %95'ten fazlasını atlar. Bu %95'in yaklaşık yarısı üç düşük gelir grubundan birindedir (<35.000 \$). Düşük gelirli olmayan gruplarda belirlenen enerji güvensiz haneler vardır, bu da bazılarının

Tablo 2 Enerji eşitliği açığı (EEG) ve finansal tabanlı enerji yardımı kategorilerinin karşılaştırılması.

(Her kategorideki hane sayısı)	2015–2016	2016–2017	2017–2018	2018–2019
Toplam hane sayısı	4577	4522	3852	2650
Enerji eşitliği açığı (EEG) düşük risk bölgesi	2719	2143	1889	1619
EEG 1stkatman: Enerji güvensiz EEG 2ve	214	631	484	42
kademe: Enerji açısından fakir haneler Enerji	86	83	57	59
yükü olan haneler $\geq$ %10	141	135	111	88
Enerji yükü olan düşük riskli bölge haneleri için EEG $\geq$ %10	94	59	64	55
EEG 1stenerji yükü olan kademeli haneler $\geq$ %10 EEG 2ve	6	16	9	1
enerji yükü olan kademeli haneler $\geq$ %10 EEG 1stve 2veEnerji	3	4	1	2
yükü <%10 olan kademeli haneler EEG 2. kademe haneler	274	587	286	93
LIHEAP için uygun değildir	72	63	48	48
EEG 2. kademe haneler WAP için uygun değildir	53	37	33	29



Şekil 7. Enerji yükü (EB) metriği kullanılarak ölçülen enerji güvensizliği. The X-eksen, bir hanenin elektrik için harcadığı gelir yüzdesini temsil eder. Kırmızı noktalı çizgi, %10 gelir harcama eşiğini gösterir ve EB10, enerji harcama eşiğinin üzerindeki hanelerin oranını ayrıntılı olarak belirtir. Örneğin, 2015-2016'da, örneklerimizdeki hanelerin %2,7'si gelirlerinin %10'undan fazlasını elektriğe harcadı. Örnek popülasyonumuzdaki maksimum harcama miktarı %35'tir.

haneler düşük gelirli olarak sınıflandırılmamıştır, düşük harcanabilir gelire sahip olabilirler (örneğin, yüksek ipotek veya kira maliyetleri) ve enerji tüketimlerini azaltarak mali yüklerini sınırlayabilirler. Bu, enerji güvensiz hanelerde mali ve davranışsal enerji tüketim eğilimlerini belirlemek için birden fazla enerji yoksulluğu ve güvensizliği önlemine olan ihtiyacı daha da vurgulamaktadır.

Ayrıca LIHEAP ve WAP'a uygunluğu ve 2'deki haneleri karşılaştırdıkveenerji eşitliği açığı metriğinin kademesi. 6002 haneden oluşan veri setimizde, 871 hane LIHEAP'a hak kazandı ve 1553 hane kendi gelir eşiklerini kullanarak WAP'a hak kazandı⁹. Her yıl 48-72 hanenin yüksek dönüş sıcaklıklarına sahip olduğunu ancak LIHEAP'e uygun olmadığını bulduk. WAP'ın LIHEAP'ten daha yüksek bir gelir eşiği olduğundan, LIHEAP'e uygun olan tüm haneler WAP'ye de uygundur, bu nedenle enerji eşitliği açığı ve WAP karşılaştırıldığında bu aralık 29-53 haneye düşer. Bu kaçırılan hanelerin çoğu düşük gelir eşiğinin hemen kenarındadır ancak rahatsız edici ve bazen tehlikeli derecede yüksek dönüş sıcaklıklarına sahiptir ve bu da onları yardım olmadan savunmasız hale getirir.

Analizin sınırlılıkları ve gelecekteki çalışmalar için fırsatlar. Enerji yoksulluğu çeşitli biçimlerde mevcuttur ve çok sayıda soruna yol açar

herhangi bir niceleme yöntemindeki sınırlamalar. Burada yöntemlerimizin sınırlamaları ve gelecekteki iyileştirmeler için fırsatlar hakkında bir tartışma sunuyoruz. Bu makalede özetlenen enerji eşitliği açığının yinelenmesinin kullanımındaki belirsizlikler arasında doğal gaz sağlayıcısından gelen ısıtma verilerinin eksikliği yer almaktadır. Elektrik şirketi tarafından sağlanan veri setinden, bu çalışmadaki hanelerin %60'ının hem soğutma hem de ısıtma için elektrik kullandığını, geri kalanların ise büyük olasılıkla ısıtma için doğal gaz veya petrol kullandığını öğreniyoruz. Ancak, ısıtma sisteminin türünün hanehalkı dönüş sıcaklıklarının önemli bir göstergesi olduğunu bulamadık. Bu nedenle, dönüş sıcaklığını hesaplamak için kullanılan model, özellikle Arizona gibi ısıyla ilgili hastalık ve ölümlerin soğukla ilgili olanlardan önemli ölçüde daha yüksek olduğu yüksek ısıya sahip bir bölge için, bu özel elektrik tabanlı veri setini (bkz. Yöntemler) hala temsil etmektedir^{40,41}.

Evin enerji verimliliği ile ilgili konut özellikleri⁶¹(örneğin, pencere sayısı, yalıtım, duvar kalınlığı, kaplama malzemesi, evin yönü, vb.) veri setine dahil edilmemiştir ancak gelecekteki kamu hizmetleri veri toplama çabalarına değerli katkılar sağlayacaktır. Düşük gelirli hanelerin büyük bir kısmının eski evlerde yaşadığı (bkz. Ek Bilgi Notu 2) ikamet yaşı ile gelir grubu arasında bir ilişki bulduk; bu, daha yüksek eğitim sıcaklıklarına ve daha düşük genel hane enerjisi verimliliğine katkıda bulunabilir.

Bu çalışmanın bir sınırlaması, iç mekan termostat verilerinin eksikliği ve evlerin gerçek iç mekan sıcaklığını ölçme yetersizliğidir. Termostat verileri, sakinlerin soğutma ve ısıtma ihtiyaçları için enerji tüketme istekleri hakkında daha fazla bilgi sağlayabilir. Ancak, termostat bilgileri bir tüketicinin gerçek sıcaklık konfor tercihlerini ortaya koymaz. Termostat verilerinin gerçek hanehalkı tercihlerini belirleyememesi, hanehalkı sakinlerinin termostatlarını harcama limitleri (yani, harcanabilir gelir), konfor ve enerji tasarrufu alışkanlıkları gibi birden fazla faktöre göre ayarlamasından kaynaklanır. Bu nedenle, bir kişi paradan veya enerjiden tasarruf etmek için termostatlarını gerçek konfor sıcaklıkları yerine kasıtlı olarak ideal olmayan sıcaklıklarda (yani, enerjiyi sınırlayan davranış) tutabilir. Bir diğer olasılık ise, kentsel ısı adası etkisi nedeniyle enerji eşitliği açığının analizlerimizin önerdiğinden daha geniş olabileceğidir.^{62,63} Düşük gelirli hanelerin kentsel ortamlardaki gölge ve bitki örtüsünün az olması nedeniyle yüksek ısıya daha fazla maruz kalmasıyla.

Bu sınırlamalara rağmen, bu analizin bir metropol bölgesindeki düşük gelirli hanelerde enerji sınırlayıcı davranışları belirlemede önemli bir ilk adım sağladığına inanıyoruz. Gelecekteki çalışmalar için verimli bir yön, evdeki gerçek sıcaklık farklılıklarını araştırmak olacaktır.

Tartışma

Enerji yükü metriği, enerji ihtiyaçlarını karşılamak için diğer gereklilikleri sınırlayan haneleri hedefler ancak diğer ihtiyaçlarını karşılamak için enerji harcamalarını sınırlayanları atlar. Enerji eşitliği açığı, yazın daha yüksek sıcaklıklara katlanmayı seçenleri ve fiyat artışları ve hava değişiklikleri nedeniyle davranışlarının nasıl değişebileceğini belirleyerek bu boşluğu doldurur. Bu iki tür metrik, birden fazla enerji yoksulluğu biçimi yaşayan haneleri belirlemek için birlikte kullanılmalıdır: enerji ihtiyaçlarını karşılamak mali sıkıntı yaşayanlar ve mali sıkıntıyı azaltmak ve diğer gereklilikleri karşılamak için enerji tüketiminden vazgeçenler. Politika yapımcılar, harcama kalıplarına ek olarak davranış kalıplarını da dikkate alarak, kimin enerji yardımına ihtiyacı olduğunu daha iyi belirleyebileceklerdir. Ülkeler eşitlikçi ve sürdürülebilir enerji politikaları tasarlamaya devam ederken, bölgelerin mevcut enerji yoksulluğu seviyesini ekonomik, tüketim ve davranışsal bir perspektiften değerlendirmek için basit bir yöntem ihtiyacı vardır.

Haneleri gelir ve enerji eşitliği açığının şiddetine göre gruplandırarak, politika yapımcılar ve kamu hizmeti şirketleri enerji faturaları ve hava koşullarına dayanıklılık konusunda acil mali yardıma ihtiyaç duyan en riskli haneleri hedefleyebilir. Enerji eşitliği açığının değeri, aşırı hava olaylarına (örneğin sıcak hava dalgaları) uyum sağlama yeteneklerine ve bölgedeki diğerlerine göre nasıl performans gösterdiklerine göre nüfus için hava koşullarına dayanıklılık hedefleri belirleyebilecek kayan ölçekli bir enerji yoksulluğu yardım programı olasılığını yaratmasıdır. Örneğin, birincil politikalar, 78 °F'nin (25,6 °C) üzerinde bir dönüm sıcaklığına sahip haneleri ve gelirlerinin %10'undan fazlasını enerji ihtiyaçlarını karşılamaya harcayan haneleri hedeflemek üzere tasarlanırsa, bu, bölgedeki mali sıkıntıyı ve ısıyla ilgili hastalık riskini azaltabilir. İkincil politika hedefleri, düşük gelire ve ortalamanın üzerinde dönüm sıcaklığına sahip hanelere odaklanmalıdır. Bu hanelerin birden fazla enerji yoksulluğu ve güvensizliğinden muzdarip olma olasılığı yüksektir, ancak ısıyla ilgili ölümler açısından yüksek risk altında değildir.

Öte yandan, yüksek dönüm sıcaklıklarına sahip yüksek gelirli haneler indirimli hava koşullarına dayanıklı hale getirme programları için en uygun olanlar olabilir. Daha yüksek gelirlere sahip olmalarına rağmen, sınırlı atık geliri varsa, hava koşullarına dayanıklı hale getirme maliyetleri bu haneler için hala çok yüksek olabilir. Enerjiyi uyarlar

Diğer bölgelere göre eşitlik açığı, elektrik tüketimi benzer şekilde yüksek ısı bölgeleri için yeterli olabilir. Ancak araştırmacılar ve enerji planlamacıları, daha soğuk iklimler için toplam enerji tüketimini tahmin etmek için gaz, elektrik ve potansiyel olarak ısıtma için kullanılan diğer yakıtları dikkate almalıdır. Enerji eşitlik açığını hesaplamak, geleneksel enerji yoksulluğu metriği için aynı bilgileri gerektirir, bu nedenle enerji eşitlik açığını hesaplamının ve kullanmanın maliyeti marjinal olacaktır.

Eşitlik, adalet ve politika etrafında sürekli gelişen tartışmalarda, tarihsel ve sistematik olarak dışlanmış olanların ihtiyaçlarına cevap veren politikaları incelememiz ve geliştirmemiz gerekiyor. Enerji tüketim davranışıyla sergilenen yoksulluğu da içeren daha ince bir ağ atarak, ekonomik temelli yoksulluk ölçütlerinin politika çatlaklarından düşenleri belirleyerek başlayabiliriz. Enerji eşitliği açığı, gelir temelli ölçütlerin geride bırakmış olabileceği haneleri de dahil ederken bir bölgenin göreceli ilerlemesine yakalayarak mevcut enerji yoksulluğu ölçütlerinin tartışılmasına katkıda bulunur. Eşitlik merkezli politikalarla idealden daha yüksek dönüm sıcaklıklarına sahip nüfusu hedefleyerek, bölgeler enerji yoksulluğunu daha etkili bir şekilde ortadan kaldıracak ve sakinlerinin iklim değişikliğine uyum sağlamasına yardımcı olacaktır.

Yöntemler

Veri. Veriler, Arizona'daki büyük bir kamu hizmeti şirketi olan Salt River Project tarafından sağlandı. Veri seti iki bölümden oluşuyor: birincisi, Mayıs 2015'ten Nisan 2019'a kadar 6000 hane için kWh cinsinden saatlik elektrik tüketimi ve her hane için faturalama planı; ikincisi, bu haneler için 2017'de yürütülen kapsamlı bir Konut Ekipmanı ve Teknolojisi Anketi. Anket, hanehalkı sosyodemografik bilgileri ve konut özellikleri (örneğin, konut yaşı, büyüklüğü ve türü) hakkında bilgiler içeriyordu. Demografik bilgilerin özetleri için Lütfen Ek Bilgi Notu 1'e bakın.

Salt River Projesi, müşterilerin tercihlerine göre seçim yapabilecekleri farklı faturalama paketleri sunar. Her faturalama paketinin kendi fiyatlandırma kuralları ve koşulları vardır. Faturalama paketleri Temel Tarife Planı, Kullanım Zamanı Planları ve Ön Ödemeli Planlar olarak kategorize edilebilir. Fiyatlandırma kuralları, günün 24 saati boyunca tekdüze ağırlıklı ortalama elektrik fiyatının hesaplandığı elektrik fiyatlandırmasına dayalı enerji tüketim modellerini hesaba katmak için tüketim veri setine entegre edilmiştir.

Saatlik elektrik tüketimi günlük tüketime toplandı. Günlük tüketim bilgisi daha sonra WeatherForYou.com'dan derlenen çalışma bölgesi için günlük ortalama sıcaklıklarla birleştirildi.⁶⁴

Bükülme sıcaklığı. Dönüm noktası sıcaklığı, bir hanenin ısıtma sistemini kullanmaktan soğutma sistemine geçtiği dış mekan sıcaklığı olarak tanımlanır. Hanenin ne ısıtma ne de soğutma kullandığı bir sıcaklık aralığı olabileceğini ve bu dönemdeki temel seviye enerji tüketiminin sıcaklıktan bağımsız olacağını kabul ediyoruz.⁴⁶ Bu bağlamda, dönüm sıcaklığı hala enerji tüketim davranışındaki değişimin bir göstergesidir. Bir hanenin dönüm sıcaklığı doğrusal olmayan bir regresyon modeli kullanılarak hesaplanır (Denklem (1)), hane halkının günlük elektrik tüketimini tahmin eder. Benign (E_{BT}) aşağıdaki değişkenlere dayanmaktadır: günlük ortalama sıcaklık (T_g), elektrik fiyatı hane halkının faturalandırma planına ve sezona göre belirlenir (P_{ben}), kukla değişkenler günün olup olmadığı (T_{bir} tatildir (H₁), haftanın günü sabit etkileri (δ₁), ve yılın ayı sabit etkileri (μ₁). Haftanın günü ve yılın ayı kukla değişkenleri modellenirken, doğrusallığı önlemek için sırasıyla Çarşamba ve Mart ayları çıkarıldı.

$$E_{BT} = \alpha + \beta_1 T_g + \beta_2 T_r + \beta_3 P_{ben} + \beta_4 H_1 + \beta_5 \mu_1 \quad D1\$$$

İkinci dereceden denklem, günlük elektrik tüketimi ile günlük ortalama sıcaklık arasındaki ilişkiyi modeller. İkinci dereceden bir ilişkiyi seçtik çünkü elektrik tüketimi ve sıcaklık verilerinin şekliyle en iyi şekilde örtüşüyor ve bir medyan R² tüm haneler için 0,8 değeri (Şekil).² Eğrinin dışbükey şekli, elektrik tüketiminin sıcaklıkla yüksek oranda ilişkili olduğunu fikrini doğrular. Dönüm noktası sıcaklığı, minimum elektrik tüketim noktasıdır (Denklem (2)) ve bir hanenin klima ünitelerini çalıştırmadan önce maruz kalması gereken dış ortam sıcaklığını ifade eder.

$$T_{inf} = \frac{1}{4} T_{me} \text{ zaman } f_0 E_{BT} \quad \$ \quad D2\$$$

İnşaat literatüründe, soğutma ve ısıtmanın devreye girme noktalarını (genellikle denge noktaları olarak adlandırılır) belirlemek için parça parça doğrusal bir fonksiyon kullanan çalışmalar olduğunu kabul ediyoruz.^{45,46,65-67} Daha yüksek R nedeniyle parçalı doğrusal fonksiyon yerine ikinci dereceden fonksiyonu kullanırsanız diğer çalışmalarla tutarlı olan değerler⁶⁸ (Daha fazla tartışma için Ek Bilgi Notu 12'ye bakınız).

Dönüm noktası sıcaklığı modelinin aykırı değerleri, çalışma bölgesi içerisinde ölçülen dış sıcaklık sınır aralıklarına göre, dönüm noktası sıcaklığı 30 °F (-1,1 °C) altında veya 120 °F (48,9 °C) üstünde olan herhangi bir hane olarak tanımlanır. Bu sınırın dışında kalan bir dönüm noktası sıcaklığı, eksik elektrik tüketim verilerine işaret ediyor olabilir. Çalışmamızda, aykırı değer olarak sınıflandırılmaları nedeniyle birinci yılda %0,5, ikinci yılda %1,6, üçüncü yılda %1,2 ve dördüncü yılda %0,2'yi analizimizden filtreledik. Çalışmanın dört yılında toplam 6002 hane bulunmaktadır, ancak tüm hanelerin tüm yıllar için eksiksiz verileri yoktur, bu nedenle Tablo'daki toplam hane sayısı 2 azaldı. Eksik verilerin bir nedeni, hanelerin bu kamu hizmeti şirketiyle hizmete yarıda başlaması veya hizmeti yarıda bırakması olabilir.

Enerji eşitliği açığının hesaplanması. Enerji eşitliği açığı, düşük ve yüksek gelirli gruplar arasındaki göreceli enerji tüketim davranışları farklılıklarını dönüm sıcaklıklarını kullanarak niceliksel olarak belirler. Daha düşük gelirli hanelerin, finansal kısıtlamalar ve enerji yüklerini azaltmak için evlerini soğutmayı geciktirme isteği nedeniyle daha yüksek dönüm sıcaklıklarına sahip olma olasılıklarının daha yüksek olduğunu varsaydık (yani, enerji hizmetlerine harcanan gelir yüzdesi). Dönüm sıcaklığını hesapladıktan sonra (T_{inf}) her hane için bir yıl boyunca, haneleri gelire göre gruplandırıyoruz. Yıl için enerji eşitliği açığı, G_{ve} , maksimum medyan dönüm noktasıdır Sıcaklık (maksimum) $D_{Tinf,medyan}$ Şeksi minimum dönüm sıcaklığı (minD $T_{inf,medyan}$) tüm gelir grupları arasında.

$$G_{ve} = \frac{1}{4} \text{maksimum } T_{inf,medyan} - \text{dakika } T_{inf,medyan}$$

Düşük gelirli hanelerin daha yüksek dönüm sıcaklıklarına sahip olma olasılığının daha yüksek olduğunu varsaydık. Hipotezimizi test etmek için, anlamlılık için tek yönlü bir varyans analizine parametrik olmayan bir alternatif olan iki kuyruklu Mood's Median testleri gerçekleştirdik. Bir Mood's Median testinden elde edilen anlamlı bir sonuç, bir örneğin diğerine stokastik olarak baskın olduğunu ve örnek medyanları arasındaki farkların istatistiksel olarak farklı olduğunu gösterir. Ayrıca, Tablo'da gösterilen P değerleriyle etnik köken ve yaş gruplarının medyan dönüm sıcaklıkları üzerinde testler gerçekleştirildi. Haneleri gelire göre gruplandırdığımızda, önemli bir fark görüyoruz. P-dört yılın tümü için değer sonuçları, gelir gruplarının medyan dönüm sıcaklıklarındaki farkın yalnızca rastgele olma olasılığının %0'a yakın olduğunu (yani istatistiksel olarak anlamlı olduklarını) gösterir. Örnek popülasyonu yaşa göre gruplandırdığımızda da benzer sonuçlar görüyoruz, bu da yaşın dönüm sıcaklığının güçlü bir göstergesi olabileceği anlamına gelir. Bu nedenle, yaşın elektrik tüketim alışkanlıklarında bir rol oynayabileceğini (örneğin, yaşlı insanlar klimalarını daha yüksek bir sıcaklıkta açmayı tercih edebilir) ve bu durumun gruplar arasında görülen dönüm sıcaklıklarını etkileyebileceğini göz ardı edemeyiz. Bununla birlikte, bir yaş veya etnik köken grubu içinde hesaplandığında, enerji eşitliği açığı üyelerin kötüleşen yoksulluk yaşadığı zamanları (yani, fark genişliyor) veya grubun üyelerinin sıcaklık değişikliklerine benzer şekilde uyum sağladığı zamanları (yani, fark daralıyor) vurgulayabilir. Etnik köken P-Değerler gelir veya yaş gruplarıyla aynı büyüklük sırasında olmadığından, etnik gruplar arasındaki farklılığın yalnızca şansa bağlı olma olasılığının birinci, ikinci ve dördüncü yıllar için %1'den az, üçüncü yıl için ise %6'dan az olduğunu görüyoruz; bu da yüksek istatistiksel öneme işaret ediyor.

Ayrıca, hanenin dönüm sıcaklığı üzerinde olabilecek konut tipinin (yani, tek ailelik ev, çok ailelik ev, apartman daresi, mobil ev, müstakil ev), ikamet yaşının ve ikamet büyüklüğünün potansiyel etkilerini de göz önünde bulundurduk. Ancak, bu değişkenleri dahil etmenin, gelirle ilişkili oldukları için modele çoklu doğrusallık getireceğini bulduk. Daha fazla ayrıntı için Ek Bilgi Notu 8'e bakın.

Geleneksel enerji yoksulluğu ölçümünün hesaplanması. Geleneksel ekonomiye dayalı enerji yoksulluğu ölçütü olan enerji yükü, bir hanenin enerjisi (örneğin elektrik) talebini karşılamak için harcadığı gelir yüzdesi olarak tanımlanır. Her hanenin her yıl için enerji harcamasının oranını gelir, konut elektrik fiyatı ve enerji tüketimini kullanarak hesaplarız. Her hane için, elektrik şirketi her hanenin düştüğü gelir dilimini sağlar. Her gelir grubunun orta noktasını kullanarak enerji tüketimine harcanan gelir yüzdesini tahmin ederiz. En düşük gelir grubu (<15.000\$) için, 10.000\$ orta nokta olarak alındı; en yüksek gelir grubu (>150.000\$) için, 175.000\$

Tablo 3P-Gelir, etnik köken ve yaş gruplarının medyan dönüm noktalarına ilişkin iki taraflı Mood's Median testlerinden elde edilen değerler.

Gruplama	2015–2016	2016–2017	2017–2018	2018–2019
Gelir	5,36E–23***	6,85E–22***	2,50E–16***	2,05E–13***
Etnik köken	5,94E–03*	6,02E–05***	2,85E–01	1,73E–02.
Yaş	2,30E–29***	1,61E–32***	8,91E–20***	7,36E–17***

Alfa = 0,05.
Önemli kodlar: ***** [0, 0,001] *** [0,01, 0,05] ** [0,05, 0,1] * [0,1, 1].

orta nokta.

$$\frac{\sum E_{BTP}}{S_{ben} \cdot 1/4} \cdot \frac{1}{BEN_{min}}$$

D4Ş

S_{ben} , ben hane halkı geliri üzerinden enerji harcaması nedir Benyl içindeve, E_{BTP} hane halkının günlük elektrik tüketimi nedir Bengün içinde. P_{ben} hane halkının fatura planının ortalama elektrik fiyatıdır ben. ben_{ben} gelirin orta nokta tahminidir ev Ben.

Raporlama özeti. Araştırma tasarımı ilişkin daha fazla bilgi, bu makaleye bağlantısı verilen Nature Araştırma Raporlama Özeti'nde mevcuttur.

Veri kullanılabilirliği

Ham ve işlenmiş elektrik tüketim verileri ve konut enerjisi teknolojisi anket verileri gizlilik anlaşmasıyla sınırlı erişime açıktır, erişim yazarlara makul bir talepte bulunulması ve Salt River Projesi'nin izniyle elde edilebilir. Ortalama günlük dış mekan sıcaklıklarının kayıtları web kazıma yoluyla WeatherForYou.com'dan alındı ve buradan erişilebilir. Şekil için kaynak verileri. 3, Ek Bilgi Şekil S3, S6 ve S9'a buradan erişilebilir.

D3Ş

Kod kullanılabilirliği

Tüm veriler ve modeller Python 3.8.5'te işlenir. Şekiller PowerPoint ve R studio'da üretilir (R 4.0.3'e dayalı). Tüm özel kod 69 GitHub'da şu adreste mevcuttur: <https://github.com/Pa223/The-Energy-Equity-Gap>.

Alındı: 13 Temmuz 2021; Kabul edildi: 13 Nisan 2022;

Published online: 04 May 2022

Referanslar

1. Sovacool, BK İngiltere'de yakıt yoksulluğu, uygun fiyatlılık ve enerji adaleti: Sıcak Cephe Programı'ndan politika öngörüler. *Enerji* 93,361–371 (2015).
2. Primc, K., Slabe-Erker, R. ve Majcen, B. Etkili bir enerji politikası için enerji yoksulluğu profillerinin oluşturulması. *Enerji Politikası* 128,727–734 (2019).
3. ABD'de İklim Değişikliğinin Etkileri: Üçüncü Ulusal İklim Değerlendirmesi. <https://nca2014.globalchange.gov/downloads> <https://doi.org/10.7930/J0Z31WJ2> (2014).
4. Wu, X., Brady, J.E., Rosenberg, H. ve Li, G. Amerika Birleşik Devletleri'nde 2009 ve 2010 yıllarında sıcak çarpması nedeniyle acil servise yapılan başvurular. *Yaralanma Epidemiol.* 1,8 (2014).
5. Sıcak hava dalgası: Chicago'daki felaketin toplumsal otopsis, Klinenberg. <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/H/bo20809880.html> (2015).
6. Canouï-Poitrine, F. ve diğerleri. Ağustos 2003'te Fransa'nın Paris kentinde yaşanan sıcak hava dalgası sırasında aşırı ölümler. *Rev. Epidemiol. Sante Publique* 54,127–135 (2006).
7. Baldwin, J.W., Dessy, J.B., Vecchi, G.A. ve Oppenheimer, M. Zamanla birleşen sıcak hava dalgası olayları ve küresel ısınma: ortaya çıkan bir tehlike. *Dünya Geleceği* 7,411–427 (2019).
8. Dong, W., Liu, Z., Liao, H., Tang, Q. ve Li, X. Sıcaklık riskinden kaynaklanan küresel insan sağlığı zorluklarını değerlendirmek için yeni iklim ve sosyo-ekonomik senaryolar. *İklim. Değişim* 130,505–518 (2015).
9. Bednar, D.J. & Reames, T.G. Amerika Birleşik Devletleri'nde enerji yoksulluğunun tanınması ve buna yanıt verilmesi. *Nat. Enerji* 5,432–439 (2020).
10. Düşük Gelirli Ev Enerji Yardım Programı (LIHEAP) | Çocuklar ve Aileler İdaresi. <https://www.acf.hhs.gov/ocs/low-income-homeenergy-assistance-program-liheap> (2022).
11. Rose, E.M. ve Hawkins, B.A. Düşük Gelirli Enerji Kullanımı ve Hava Durumu Yardım Programının Yükü Hakkında Arka Plan Verileri ve İstatistikleri: 2020 Mali Yılı Güncellemesi. <https://doi.org/10.2172/1761662> (2020).
12. Okushima, S. Enerji yoksulluğunun ölçülmesi: çok boyutlu bir yaklaşım. *Enerji* 137,1159–1166 (2017).
13. Duclos, J.-Y., Sahn, D.E. ve Younger, S.D. Güçlü çok boyutlu yoksulluk karşılaştırmaları*. *Ekonomik J.* 116,943–968 (2006).
14. Pachauri, S. & Spreng, D. Enerji yoksulluğunun ölçülmesi ve izlenmesi. *Enerji Politikası* 39,7497–7504 (2011).
15. Culver, L.C. Enerji yoksulluğu: neyi ölçtüğünüz önemlidir. *Stanford Doğal Gaz Girişimi* (2017).
16. Middlemiss, L. ve diğerleri. Enerji yoksulluğu ve sosyal ilişkiler: bir yetenekler yaklaşımı. *Enerji Ar. Sos. Bil.* 55,227–235 (2019).
17. Memmott, T., Carley, S., Graff, M. ve Konisky, D.M. COVID-19 salgını öncesi ve sırasında düşük gelirli hanelerde enerji güvensizliğindeki sosyodemografik eşitsizlikler. *Nat. Enerji* 6,186–193 (2021).

18. Romero, JC, Linares, P. ve López, X. Enerji yoksulluğu göstergelerinin politik etkilileri. *Enerji Politikası* 115,98–108 (2018).
19. Spiliotis, E., Arsenopoulos, A., Kanellos, E., Psarras, J. ve Kontogiorgos, P. Enerji yoksulu haneleri belirlemede kamu hizmetlerine yardımcı olmak için çok kaynaklı veri tabanlı bir çerçeve: Yunanistan'da bir vaka çalışması. <https://doi.org/10.1080/15567249.2020.1739783> 15,49–71 (2020).
20. Memmott, T., Carley, S., Graff, M. ve Konisky, DM COVID-19 salgını öncesi ve sırasında düşük gelirli hanelerde enerji güvensizliğindeki sosyodemografik eşitsizlikler. *Nat. Enerji* 2021 6:26,186–193 (2021).
21. ABD Tarım Bakanlığı Gelir arttıkça gıdaya harcanan gelir yüzdesi düşüyor. <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2016/september/percent-of-income-spent-on-food-falls-as-income-rises/> (2016).
22. Papada, L. & Kaliampakos, D. Yunanistan'da enerji yoksulluğunun ölçülmesi. *Enerji Politikası* 94,157–165 (2016).
23. Liddell, C., Morris, C., McKenzie, SJP ve Rae, G. Birleşik Krallık'ta yakıt yoksulluğunun ölçülmesi ve izlenmesi: Ulusal ve bölgesel perspektifler. *Enerji Politikası* 49,27–32 (2012).
24. Moore, R. Yakıt yoksulluğunun tanımları: Politika açısından çıkarımlar. *Enerji Politikası* 49,19–26 (2012).
25. Herrero, ST Enerji yoksulluğu göstergeleri: yöntemlerin eleştirel bir incelemesi. *Kapalı Alan Yapılı Çevre* 26,1018–1031 (2017).
26. Dagnachew, AG, Lucas, PL, Hof, AF ve van Vuuren, DP Sahra Altı Afrika'da evrensel elektrik erişimi ile iklim değişikliğinin azaltılması arasındaki uzlaşmalar ve sinerjiler. *Enerji Politikası* 114,355–366 (2018).
27. Batinge, B., Kaviti Musango, J. ve Brent, AC Enerji yoksulluğunun sürdürülmesi: Karşınlanmamış Afrika elektrik piyasalarında evrensel enerji erişimi için yol haritalarının değerlendirilmesi. *Enerji Ar. Sos. Bil.* 55,1–13 (2019).
28. Karplus, VJ & von Hirschhausen, C. Elektrik erişimi: giriş. *Ekonomi Enerji Çevre Politikası* 8,1–18 (2019).
29. Higgins, L. ve Lutzenhiser, L. Törenselle eşitlik: düşük gelirli enerji yardımı ve sosyo-çevresel politikanın başarısızlığı. *Sosyal Sorun* 42,468–492 (1995).
30. MURRAY, AG & MILLS, BF Düşük gelirli evlerin enerji yardım programına katılımının hane halkı enerji güvensizliği üzerindeki etkisi. *Çağdaş Ekonomik Politika* 32,811–825 (2014).
31. Elektrik erişim (% nüfus), Veri. <https://data.worldbank.org/indikatör/EG.ELC.ACCTS.ZS> (2020).
32. Tutulan, JSElektrikli ısıtıcı yangınlarının yaygın nedenleri incelendi. <https://jsheld.com/insights/articles/common-causes-of-electric-space-heater-fires-methodsof-prevention/> (2022).
33. Reames, TG Enerji adaletini hedeflemek: Kentsel konut ısıtma enerjisi verimliliğinde mekansal, ırksal/etnik ve sosyoekonomik eşitsizlikleri araştırmak. *Enerji Politikası* 97,549–558 (2016).
34. Reames, TG Düşük gelirli konutlarda enerji verimliliği katılım engellerine yönelik toplum temelli bir yaklaşım. *Yerel Çevre* 21,1449–1466 (2016).
35. Hernández, D. ve Siegel, E. Enerji güvensizliği ve kötü sağlık etkileri: New York şehrinde enerji-sağlık bağlantısına ilişkin bir toplum perspektifi. *Enerji Ar. Sos. Bil.* 47,78–83 (2019).
36. İlgili Bilim İnsanları Birliği. Enerji yükü: Ne kadar kötü ve nasıl daha az kötü hale getirilebilir? <https://blog.ucsusa.org/joseph-daniel/how-to-make-energyburden-less-bad> (2019).
37. Middlemiss, L. ve Gillard, R. Yakıt yoksulluğunun aşağıdan yukarıya doğru tanımlanması: Yakıt yoksulluğunun yaşanmış deneyimleri üzerinden hanehalkı enerji kırılganlığının tanımlanması. *Enerji Ar. Sos. Bil.* 146–154 (2015).
38. Nemli İç Mekanlar ve Sağlık. Nemli İç Mekanlar ve Sağlık, <https://doi.org/10.17226/11011> (Ulusal Akademiler Yayınları, 2004).
39. Evans, J., Hyndman, S., Stewart-Brown, S., Smith, D. ve Petersen, S. JSTOR'da yetişkin sağlığı ile ilgili nemli konutların göreceli önemine ilişkin bir epidemiyolojik çalışma. *J. Epidemiol. Toplum Sağlığı* 54,677–686 (2000).
40. Yıla göre ısıya bağlı hastalıklar acil servis başvuruları (yatılı hasta kabulü). <https://www.azdhs.gov/documents/preparedness/epidemiology-disease-control/extreme-weather/pubs/heat-related-illnessemergency-department-and-inpatient-admissions-in-arizona-by-year.pdf> (2021).
41. Yıllara göre soğuk algınlığı kaynaklı hastalıklar. <https://www.azdhs.gov/preparedness/epidemiology-disease-control/extreme-weather/index.php#cold-home> (2021).
42. Jenkins, K., McCauley, D., Heffron, R., Stephan, H. ve Rehner, R. Enerji adaleti: kavramsal bir inceleme. *Enerji Ar. Sos. Bil.* 11,174–182 (2016).
43. Sovacool, BK, Burke, M., Baker, L., Kotikalapudi, CK ve Wlokas, H. Enerji adaleti için yeni sınırlar ve kavramsal çerçeveler. *Enerji Politikası* 105, 677–691 (2017).
44. Sovacool, BK & Dworkin, MH Enerji adaleti: kavramsal içgörüler ve pratik uygulamalar. *Uygulama Enerji* 142,435–444 (2015).
45. Chong, H. Binaların eskiliği ve elektrik kullanımı: Eski evler sıcak havalarda daha az elektrik kullanır. *Avrupa Ekonomik Rev.* 56,906–930 (2012).
46. Fazeli, R., Ruth, M. ve Davidsdottir, B. Konut enerji talebi için sıcaklık tepki fonksiyonları - modellerin incelenmesi. *Kentsel İklim* 15,45–59 (2016).
47. Tang, W., Kuehn, TH & Simcik, MF Yüksek havalandırma filtrelerinde mantar büyüme hızı üzerinde sıcaklık, nem ve hava akışının etkileri. *J. İşgal. Çevre. Hijyen* 12,525–537 (2015).
48. Hirsch, DJ, Hirsch, SR ve Kalbfleisch, JH Merkezi klima ve meteorolojik faktörlerin kapalı alan spor sayılarına etkisi. *J. Alerji Kliniği İmmünol.* 62, 22–26 (1978).
49. Kilbourne, EM, Choi, K., Jones, TS ve Thacker, SB Isı çarpması risk faktörleri: bir vaka kontrol çalışması. *JAMA: J. Am. Med. Assoc.* 247,3332–3336 (1982).
50. Lawes, M., Havenith, G. ve Hodder, S. Etnik farklılıklar: Bağlı nemin termal algı üzerindeki etkisi. *CIEHF Yayınları* (2021).
51. Wang, L., Chen, M. ve Yang, J. Kişin erkek üniversite öğrencilerinin termal tercihlerindeki bireyler arası farklılıklar. *İnşa. Çevre* 173,106744 (2020).
52. Aikman, H. Artrit ve hava durumu arasındaki ilişki. *Uluslararası Biyometeorol Dergisi* 40,192–199 (1997).
53. Oudin Åström, D., Bertil, F. ve Joacim, R. Sıcak hava dalgasının yaşlı popülasyonda morbidite ve mortalite üzerindeki etkisi: son çalışmaların bir incelemesi. *Olgunluk çağındakiler* 69, 99–105 (2011).
54. ÇDÖ. Kurumsal ve kamu binaları için enerji ipuçları. <https://doee.dc.gov/service/enerji-ipuçları-kurumsal-ve-hükümet-binaları> (2021).
55. Diaz, J. ve diğerleri. Madrid'deki sıcak hava dalgaları 1986–1997: Yaşlıların sağlığı üzerindeki etkileri. *Uluslararası Mimarlık, İşgal, Çevre, Sağlık* 75,163–170 (2002).
56. Enerji Bakanlığı. Termostatlar. <https://www.energy.gov/energysaver/termostatlar> (2021).
57. Termostat ayarları: Yaz ve kış için ideal ayarlar. <https://valleyservice.net/blogs/termostat-ayarları> (2020).
58. Kış ve yaz için önerilen termostat ayarları. <https://www.centralhtg.com/blog/önerilen-termostat-ayarları> (2018).
59. Faydalar.gov. Düşük Gelirli Ev Enerji Yardım Programı (LIHEAP). <https://www.benefits.gov/benefit/623> (2020).
60. Enerji Bakanlığı. Hava koşullarına dayanıklılık yardımı nasıl başvurulur. <https://www.energy.gov/eere/wap/hava-durum-yardimi-nasil-uygulanir> (2022).
61. Thomson, H., Simcock, N., Bouzarovski, S. ve Petrova, S. Enerji yoksulluğu ve iç mekan soğutması: Avrupa'da göz ardı edilen bir konu. *Enerji İnşası* 196,21–29 (2019).
62. Hsu, A., Sheriff, G., Chakraborty, T. ve Manya, D. ABD'nin büyük şehirlerinde kentsel ısı adası yoğunluğuna orantısız maruz kalma. *Ulusal Topluluk* 12,1–11 (2021).
63. Harlan, SL ve diğerleri. Refahın gölgesinde: Kentsel ısı adasının eşitsiz dağılımı. *Res. Soc. Probl. Kamu Politikası* 15,173–202 (2007).
64. Phoenix Arizona Yerel Hava Tahminleri ve Koşulları - WeatherForYou.com. <https://www.weatherforyou.com/reports/index.php?config=&pass=&dpp=&forecast=zandh&config=&place=phoenix&state=az&pands=phoenix> (2019).
65. Brown, MA, Cox, M., Staver, B. ve Baer, P. ABD binalarının enerji talebindeki iklim kaynaklı değişikliklerin modellenmesi. *İklim Değişikliği* 134,29–44 (2015).
66. Hiruta, Y., Gao, L. ve Ashina, S. Bölgesel ölçekte elektrik talebi için kesin sıcaklık tepkisi fonksiyonları elde etmek için yeni bir yöntem. *Bilim. Toplam Çevre* 819,152893 (2022).
67. ASHRAE Kılavuzu 14-2002 Enerji ve talep tasarruflarının ölçülmesi. ISSN 1049-894X (2002).
68. Kim, YJ, Lee, SJ, Jin, HS, Suh, IA ve Song, SY Konut enerji tüketiminin belirleyicilerinin analizinde doğrusal ve doğrusal olmayan istatistiksel modellerin karşılaştırılması. *Enerji İnşası* 223,110226 (2020).
69. Pa223.Pa223/Enerji Eşitliği Açığı. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6369436> (2022).

Teşekkürler

Bu çalışma Ulusal Bilim Vakfı [hibe numarası 2029511 (YQ, DN); 2017789 (DN); 1757329 (YQ)] tarafından finanse edilmektedir. Başlangıç regresyon analizindeki desteği için lisansüstü araştırma asistanı Ali İftikhar'a ve yüksek performanslı bilgi işlem kümesinin kullanılmasına verdiği destek için Jiehong Lou'ya teşekkür ederiz. Değerli içgörü ve geri bildirim sağladıkları için Alex Davis, Baruch Fischhoff, Granger Morgan ve Carnegie Mellon Üniversitesi Mühendislik ve Kamu Politikası Bölümü'ndeki diğer meslektaşlarımıza teşekkür ederiz. Nock ayrıca, enerji üyesi olduğu Google Katılım Araştırması Ödülü ve Scott Enerji İnovasyonu Enstitüsü'nden aldığı desteği de kabul eder.

Yazar katkıları

DN araştırma fikrini tasarladı ve araştırma sürecini tasarladı ve denetledi. SC analizi tasarladı ve gerçekleştirdi. SC makalenin ilk taslağını yazdı ve revize etti. DN ve YQ makaleyi gözden geçirdi ve revize etti. BX verileri topladı ve temizledi. Yazışmalar ve materyal talepleri DN veya YQ'ya yapılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Ek Bilgiler

Ek bilgiÇevrimiçi versiyon, şu adreste bulunan ek materyalleri içerir:<https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>.

Yazışmalarve materyal talepleri Destenie Nock veya Yueming Lucy Qiu'ya yapılmalıdır.

Akran değerlendirme bilgileriDoğa İletişimleriRob Bailis'e ve diğer anonim değerlendirecilere bu çalışmanın hakem değerlendirmesine yaptıkları katkılardan dolayı teşekkür ederiz. Hakem değerlendirmeci raporları mevcuttur.

Yeniden basım ve izin bilgilerişu adreste mevcuttur:<http://www.nature.com/reprints>

Yayıncının notuSpringer Nature, yayınlanan haritalardaki yargı yetkisi iddiaları ve kurumsal bağlantılar konusunda tarafsızlığını korumaktadır.



Açık ErişimBu makale Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası Lisansı kapsamında lisanslanmıştır ve bu lisans, kullanım, paylaşım ve uyarılama, dağıtım ve herhangi bir ortamda veya biçimde çoğaltma, orijinal yazar(lar)a ve kaynağa uygun atıf verdiğiniz, Creative Commons lisansına bir bağlantı sağladığınız ve değişiklik yapıp yapılmadığını belirttiğiniz sürece. Bu makaledeki resimler veya diğer üçüncü taraf materyalleri, materyale ait bir atıf satırında aksi belirtilmediği sürece makalenin Creative Commons lisansına dahildir. Materyal makalenin Creative Commons lisansına dahil değilse ve amaçladığınız kullanım yasal düzenleme tarafından izin verilmiyorsa veya izin verilen kullanımı aşıyorsa, doğrudan telif hakkı sahibinden izin almanız gerekecektir. Bu lisansın bir kopyasını görüntülemek için şu adresi ziyaret edin:<http://creativecommons.org/lisanslar/tarafindan/4.0/>.

© Yazar(lar) 2022