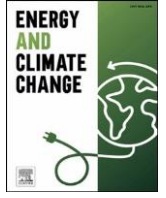


İçindekiler listesine şu adresten ulaşabilirsiniz

Enerji ve İklim Değişikliği

dergi ana sayfası: www.sciencedirect.com/journal/energy-and-climate-change



Net sıfır emisyonun eşitlik üzerindeki etkileri: Ekonomi çapında derin dekarbonizasyon politikaları altında gelir sınıfları arasında enerji harcamalarının çok modelli analizi

John Bistline^{a,*}, Chikara Onda^b, Morgan Browning^c, Johannes Emmerling^d, Gokul Iyer^e, Megan Mahajan^g, Jim McFarland^c, Haewon McJeon^f, Robbie Orvis^g, Francisco Ralston Fonseca^a, Christopher Roney^a, Noah Sandoval^h, Luis Sarmiento^d, John Weyantⁱ, Jared Woollacott^j, Mei Yuan^k

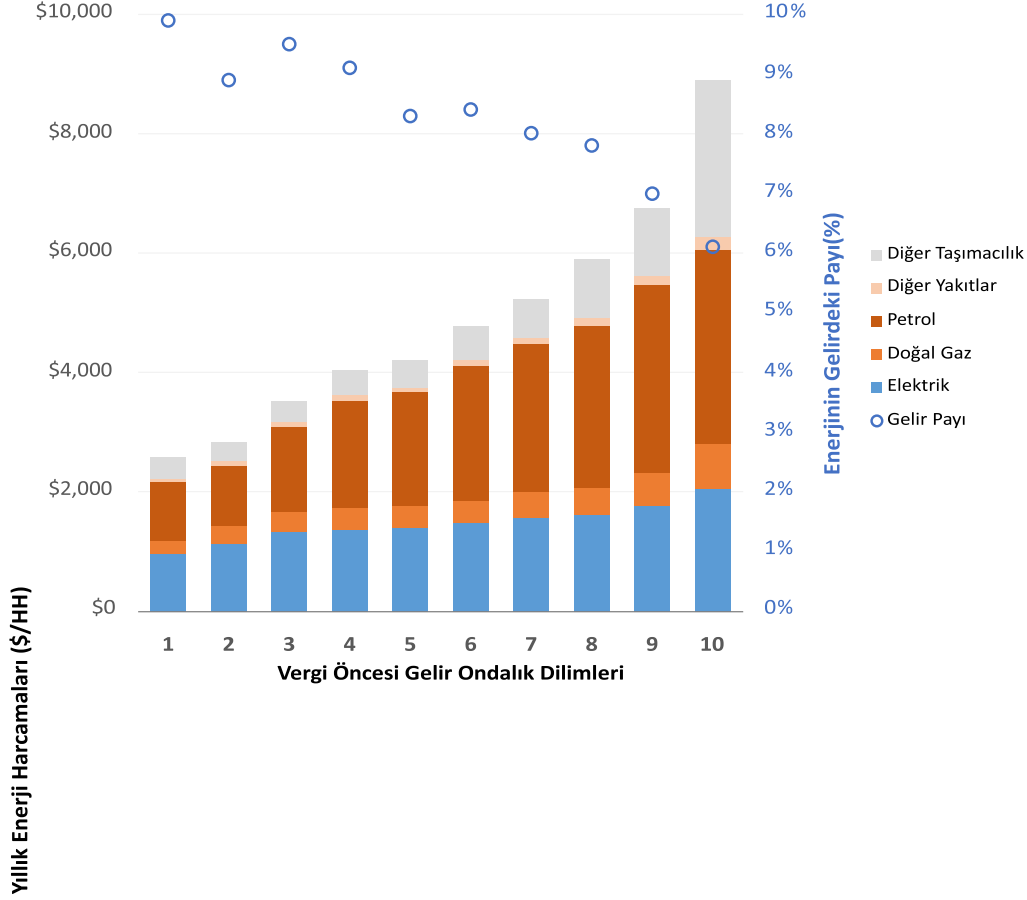
^a Electric Power Research Institute, 3420 Hillview Avenue, Palo Alto, CA 94304, Amerika Birleşik Devletleri^b U.S. Department of Energy, 1000 Independence Avenue SW, Washington, DC 20585, Amerika Birleşik Devletleri^c U.S. Environmental Protection Agency, 1200 Pennsylvania Avenue NW, Washington, DC 20004, Amerika Birleşik Devletleri

^d RFF-CMCC Avrupa Ekonomi ve Çevre Enstitüsü, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Via Bergognone 34, 20144 Milan, İtalya^e Pacific Northwest National Laboratory, 5825 University Research Court, College Park, Maryland 20740, Amerika Birleşik Devletleri^f KAIST Graduate School of Green Growth & Sustainability, Daejeon, 34141, Kore Cumhuriyeti^g Energy Innovation, 98 Battery Street #202, San Francisco, California 94111, Amerika Birleşik Devletleri

^h National Renewable Energy Laboratory, 15013 Denver W Parkway, Golden, Colorado 80401, Amerika Birleşik Devletleriⁱ Stanford University, 475 Via Ortega, Stanford, California 94305, Amerika Birleşik Devletleri^j RTI, 3040 E Cornwallis Road, Durham, North Carolina 27709, Amerika Birleşik Devletleri^k MIT Joint Program on Science and Policy of Global Change, 77 Massachusetts Avenue, E19-411, Cambridge, Massachusetts 02139, Amerika Birleşik Devletleri

OZET

Bu makale, hane halkı gelirleri arasındaki refah etkilerine odaklanarak teknoloji geçişlerinin ve net sıfır politikalarının dağılımsal boyutlarını incelemektedir. Analizde, 2050 yılında Amerika Birleşik Devletleri genelinde ekonomi çapında net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşan uyumlaştırılmış politika senaryoları kullanılarak bir dizi enerji ekonomisi modeli ile model karşılaştırması yapılmaktadır. Net sıfır politikalarının dağılımsal analizini sağlamak için ayrıntılı enerji sistemi modellerinden elde edilen çıktılar gelir sınıfları arasında enerji harcamalarına ilişkin anket mikro verileriyle birleştiren yeni bir bağlantı yaklaşımı kullanıyoruz. Model yapısı ve girdi varsayımlarında farklılıklar olmasına rağmen, gelir grupları arasında politika insidansı ve enerji yüklerindeki niteliksel eğilimlerde geniş bir anlaşma buluyoruz. Modeller genel olarak birçok hane için doğrudan enerji harcamalarının referans ve net sıfır politikaları ile zaman içinde azalacağı konusunda hemfikir. Bununla birlikte, mevcut seviyelere göre değişikliklerin kapsamı, referans seviyelere göre enerji yükleri ve elektrik harcamalarında farklılıklar vardır. Politika tasarımı, özellikle de iklim politikası gelirlerinin nasıl kullanıldığı, dağılımsal sonuçlar üzerinde birinci dereceden etkilere sahiptir. Hem mutlak hem de göreceli olarak net sıfır politika maliyetleri haneler arasında eşit olmayan bir şekilde dağılmaktadır ve enerji harcamalarındaki göreceli artışlar en düşük gelirli haneler için daha yüksektir. Bununla birlikte, iklim politikalarından elde edilen geri dönüştürülmüş gelirlerin, kişi başı bazda iade edildiğinde, daha yüksek enerji yüklerini dengeleyen ve hatta potansiyel olarak net ilerici sonuçlara yol açan telafi edici etkileri olduğunu da buluyoruz. Model sonuçları ayrıca, net sıfır politikalardan elde edilen gelirlerin arttığı, ancak daha sonra iklim politikalarının ilerici etkilerini azaltabilecek daha yüksek sıkılıklarla azaldığı karbon Laffer eğrilerini de göstermektedir. Ayrıca, dağılım analizi için harcama dilimlerinin yerine yıllık gelir dilimlerinin kullanılmasının, en düşük gelirli dilimler üzerindeki gelir etkilerine aşırı ağırlık vererek emisyon politikalarının ilericiliğini nasıl abartabileceğini de gösteriyoruz.



* Sorumlu yazar: Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü, 3420 Hillview Avenue, Palo Alto, CA 94304. E-posta adresi: jbistline@epri.com (J. Bistline).

<https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100118>

Çevrimiçi olarak 14 Ekim 2023'te kullanılabilir
2666-2787/© 2023 Elsevier Ltd. Tüm hakları saklıdır.

Şekil 1.¹ Gelir sınıfları arasında yakıta göre yıllık hanehalkı enerji harcaması (2019 ABD doları cinsinden). Veriler ABD Tüketici Harcamaları Anketi 2019 çapraz anketinden alınmıştır.

tablolaştırılmış veriler.

1. Giriş

Şirketler, eyaletler ve ülkeler yüzyılın ortalarında net sıfır emisyonu hedefledikçe, bu hedeflerin hane halkı refahını nasıl değiştirdiğine dair sorular ortaya çıkmaktadır. Ekonomi genelinde net sıfır emisyonu ulaşmayı hedefleyenler de dahil olmak üzere karbonsuzlaştırma politikaları, gelir ve enerji kullanımı gibi özelliklere bağlı olarak hanehalkları üzerinde farklı

etkilere sahiptir. Politika tasarımı, karbon yoğun malların fiyatındaki ve tüketim davranışındaki değişiklikleri etkilemekte, bu da hanehalkı refahını ve emisyonları etkilemektedir.

Çevresel adalet ve enerji eşitliği üzerine geniş ve büyüyen bir literatür bulunmaktadır (örneğin, [1-5] gibi son çalışmalar ve [3-5] gibi literatür incelemeleri). İklim politikasının ve daha geniş çevre politikasının dağıtımsal etkileri üzerine literatür en fazla yirmi yıla dayanmaktadır [4, 5]. İklim politikaları altında eşitlik sonuçları üzerine

¹ Senaryolar, poliçe gelirlerinin kişi başına eşit dağıldığını varsaymaktadır.

birçok tek modelli çalışma vardır [6,7], ancak bunların çoğu net sıfır emisyon seviyelerine ulaşmamaktadır. İklim politikasının dağılımsal etkilerine ilişkin çoklu model çalışmaları da benzer şekilde net-sıfır emisyonu ulaşmamakta ve genellikle daha az detaylı enerji sistemleri modellemesi ile genel denge modellerine odaklanmaktadır [8]. Eşitlik konularını ve net-sıfır emisyonları inceleyen makaleler genellikle niteliksel [olduğundan](#) [9], gelir sınıfları arasında doğrudan enerji harcamalarındaki değişikliklere odaklanarak net-sıfır emisyon politikalarının dağılımsal etkilerine ilişkin ilk çoklu model çalışmasını sunarak bu literatüre katkıda bulunuyoruz. Çoklu model çalışmaları, farklı girdi varsayımları ve model çerçeveleri arasında içgörülerin sağlanmasını test etmek için değerlidir.

Bu makale, teknoloji geçişlerinin ve net sıfır emisyon politikalarının dağıtımsal boyutlarını, hanehalkı gelirleri üzerindeki refah etkileriyle odaklanarak incelemektedir. Analiz, Amerika Birleşik Devletleri'nde 2050 yılına kadar ekonomi genelinde net sıfır CO₂ emisyonlarına ulaşan senaryoları kapsayan bir dizi enerji-ekonomi modelini içeren bir model karşılaştırma çalışmasını kullanmaktadır. Bazı modeller, gelirle ilgili değişkenleri doğrudan raporlarsa da, daha fazla model katkısı sağlamak amacıyla enerji-ekonomi modellerinin çıktıları, enerji harcamalarıyla ilgili anket verileriyle birleştirilmiştir. Bu çapraz kesitli makale, Kuzey Amerika'da derin karbon salınımı ve yüksek elektrikleşmeyi araştıran daha büyük bir Enerji Modelleme Forumu (EMF) 37 çalışmasının bir parçasıdır [10]. Çalışma, model yapıları ve giriş varsayımlarındaki farklılıkların, modeller arasındaki çıktılardaki farklılıkları nasıl açıklığa kavuşturduğunu belirlemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, enerji harcamaları üzerindeki politika uygulama etkilerini gelir grupları arasında, potansiyel gelir geri dönüşümüyle birlikte ve karbon fiyatlandırmaya dayalı bir politika portföyü ile karşılaştırarak incelemektedir.

Doğrudan enerji harcamaları ve enerji yüklerindeki politika değişiklikleri de dahil olmak üzere, gelire göre farklı hanelerdeki sonuçlara odaklanıyoruz. Net-sıfır politikalarının maliyetleri ve faydaları ile ilgili birçok ek eşitlik ve insidans sorusu olmasına rağmen -sağlık etkileri,² enerji güvensizliği, istihdam, varlık sahipliği, yerel ekonomilere yönelik riskler ve diğerleri- gelir

grupları arasındaki etkiler, politika yapıcılar ve diğer paydaşlar için karşılanabilirliğin odak noktasıdır. Buna ek olarak, bu ek eşitlik ve insidans sorularının çoğu doğrudan gelirle ilgilidir, çünkü sağlık ve ırk gibi dağılımsal adaletsizliklerden etkilenebilecek diğer özellikler için bir vekil olarak hareket edebilir [11,12]. Aşırı enerji yükü, fiziksel ve ruhsal sağlık, konfor, eğitim, iş performansı ve toplumsal kalkınma üzerindeki etkileri nedeniyle önemlidir [13]. Yüksek enerji yüküne sahip hanelerin yoksulluk döngüsüne yakalanma olasılığı daha yüksektir [13] ve haneler enerji faturalarını azaltmak için gerekli enerji kullanımından vazgeçebilir [14]. Örneğin, ABD'deki her beş haneden biri enerji faturalarını ödemek için gıda veya ilaç gibi ihtiyaçlarını azalttığını veya bunlardan vazgeçtiğini bildirmektedir [15]. Farklı gelir seviyelerindeki haneler için ekonomi genelinde net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşmanın dağılımsal etkilerini raporlayarak, bu senaryoların sadece ekonomik değil, aynı zamanda en savunmasız kişilerin fiziksel, zihinsel ve duygusal refahı üzerindeki daha geniş etkileri hakkındaki tartışmaları bilgilendirebiliriz.

² Tamamlayıcı bir EMF 37 çalışmasının hava kirlenici emisyonlarına odaklandığını unutmayın.

Tablo 1

Katılımcı modeller ve temel özellikler. Kapsam ve denge yaklaşımı: PE, kısmi denge; LP, doğrusal program; IAM, entegre değerlendirme modeli.

Analiz kısaltması	Model(ler)	Analiz kurumu	Kapsam ve yaklaşım	Gelir sınıfları mı?	Coğrafi kapsam	Bağlantı
ADAGE	Küresel Ekonominin Uygulamalı Dinamik Analizi	RTI	Ekonomi çapında, hesaplanabilir genel denge	Hayır	8 bölge ile	Bağlantı
EPS	Enerji Politikası Simülatörü (EPS)	Enerji İnovasyonu	Ekonomi: Sistem dinamikleri; logit seçimi	Hayır	küresel Tek bölge ⁸	Bağlantı
GCAM	Küresel Değişim Analiz Modeli	PNNL	Ekonomi: Logit seçimi	Hayır	ABD'nin tamamında tek bölge	Bağlantı
GCAM-USA	ABD için Küresel Değişim Analiz Modeli	UMD-CGS	Ekonomi: Logit seçimi	Hayır	50 ABD eyaleti ve D.C.	Bağlantı
US-REGEN	Bölgesel Ekonomi, Sera Gazı ve Enerji	EPRI	Son enerji kullanımı: Gecikmeli logit seçimi; Güç: En düşük maliyetli LP	Hayır	16 ABD bölgesi	Bağlantı
USREP-ReEDS	ABD Bölgesel Enerji Politikası, Bölgesel Elektrik Dağıtım Sistemi	MIT, NREL, RTI	Ekonomi çapında hesaplanabilir genel denge (USREP) ile kısmi denge bağlantısı (ReEDS)	Evet	12 ABD bölgesi	Bağlantı 1
CADI	Dünya Kaynaklı Teknik Değişim Hibrit	RFF-CMCC EIEE	Genel denge hibrit yukarıdan aşağıya/aşağıdan yukarıya IAM	Evet	17 bölge ile küresel	Bağlantı 2

Modeller enerji sistemlerini ayrıntılı olarak temsil etseler de, geliri, genel denge etkilerini ve enerji verimliliğini açıkça inceleme yetenekleri gibi birçok açıdan farklılık gösterirler. öngörü derecesi.

$$\left(\begin{matrix} \epsilon^t \\ p^t q^t \end{matrix} \right)_0 \quad \epsilon^t_f = \frac{f}{\epsilon^0_f} \quad \cdot \epsilon^0_f = \frac{f}{f} \cdot \epsilon$$

$$p0f \quad q0ffi \quad (1)$$

2. Yöntemler

2.1. Yaklaşım

Analiz iki aşamalı bir yaklaşım kullanmaktadır. [Bölüm 2.2'de](#) ilk olarak enerji sistemi modellerinden elde edilen çıktılar ABD İşgücü İstatistikleri Bürosu tarafından yürütülen Tüketici Harcamaları Anketinden (CEX) elde edilen hanehalkı harcama verileriyle eşleştiriyoruz. Analizimiz Cullenward ve diğerlerinin [\[16\]](#) yaklaşımını değiştirerek her bir konut yakıtı ve tüketim kategorisi için toplam EMF 37 model projeksiyonlarını almakta ve daha sonra bu harcamaları CEX harcama verileriyle ölçeklendirmektedir:

Burada $\mathbb{Q}^t_{fi}$ t döneminde f yakıtı ve i hanehalkı tipi (yani gelir sınıfları) için yapılan harcama, p^t_f t döneminde f fiyatı ve q^t_f t döneminde tüketilen f miktarıdır (0 baz yıldaki değerleri belirtir). $(\mathbb{Q}^t_{fi} / \mathbb{Q}^0_{fi})$ terimi modele özgü yakıt harcamasıdır (temel yıl harcamasına göre normalize edilmiştir) ve $\mathbb{Q}^0_{fi}$ CEX'ten alınan gelir sınıfına göre temel yıl harcamasıdır. Bu yaklaşım, teknolojik değişim (örneğin ulaşım elektrifikasyonu) ve politika (örneğin karbon fiyatlandırmasının yakıt fiyatlarını artırması) nedeniyle değişebilen hane halkı harcamalarının fiyat ve miktarlarında zaman içinde meydana gelen modele özgü değişiklikleri içermektedir. Bu, toplam doğrudan enerji harcamalarındaki değişimin

(yani toplam etkilerin doğrudan bileşeninin) şu şekilde olacağı anlamına gelmektedir:

$$\Delta f_{it} = f_{it} - f_{it}^{ref}$$

$$\Delta f_{it} = f_{it} - f_{it}^{ref}$$

polref

Burada f_{it}^{ref} , s senaryosunda değerlendirilen yakıt f için t dönemindeki harcamadır ("pol" politika senaryosudur ve "ref" politikasız referanstır). Doğrudan yakıt tüketimindeki değişikliklerin toplam maliyetlerin sadece bir alt kümesi olduğunu ve diğer mal ve hizmetlere yapılan harcamalardaki değişiklikleri hesaba katmadığını unutmayın.

CEX verileri, enerji de dahil olmak üzere hanehalkı harcamalarını gelir düzeyleri, coğrafyalar ve diğer demografik değişkenler üzerinden raporlamaktadır. CEX Kamu Kullanımı Mikro Verilerini 2019'dan itibaren kullanıyoruz ve birçok şekil için gelir dilimine göre tüketici birimleri (yani CEX mikro verilerindeki hane halkı düzeyindeki istatistikler) arasında toplulaştırma yapıyoruz. Şekil 1, vergi öncesi gelirin bir payı olarak enerji harcamalarının düşük gelirli haneler için en yüksek olduğunu, ancak mutlak harcamaların gelirle birlikte arttığını göstermektedir.³ Elektrik harcamaları, en düşük ve en yüksek gelirli haneler hariç, gelir sınıfları arasında (1400-1600 \$) nispeten sabittir. Petrol, birçok hane için enerji ile ilgili en büyük harcamadır ve en düşük ve en yüksek gelirli haneler arasında yaklaşık üç kat daha yüksektir.

İkinci yaklaşım, Bölüm 3.3'te özetlenen gelir gruplarını açıkça temsil eden modellerin çıktılarını karşılaştırmaktır. Ancak, bu yapısal sınıflara sahip katılımcı modellerin sayısı sınırlı olduğundan (Bölüm 2.3), analiz, model çıktısının gelire göre ayrıştırılmış anket mikro verileriyle eşleştirilmesi yaklaşımına odaklanmaktadır.

2.2. Senaryolar

Bu analiz iki politika senaryosuna odaklanmaktadır:

- **Referans senaryo:** Karşı olgusal referans senaryosu, 2022'nin başından sonra yeni iklim veya enerji politikaları olmadığını varsayar. Bu senaryo, kitaplarda

yer alan eyalet ve federal politikaları ve teşvikleri içermekte ancak Enflasyon Azaltma Yasasını kapsamamaktadır. 10]'da açıklandığı gibi, mevcut politikaların kapsamı modele göre değişir ve özellikle bazı modeller ABD'yi tek bir bölge olarak temsil ettiğinden bölgesel ayrıma bağlıdır (Tablo 1). Referans veya temel senaryolar, diğer tüm faktörler sabit tutularak önerilen politikaların maliyetler ve emisyon sonuçları üzerindeki potansiyel etkilerini izole etmek için politika analizinde faydalıdır.⁴

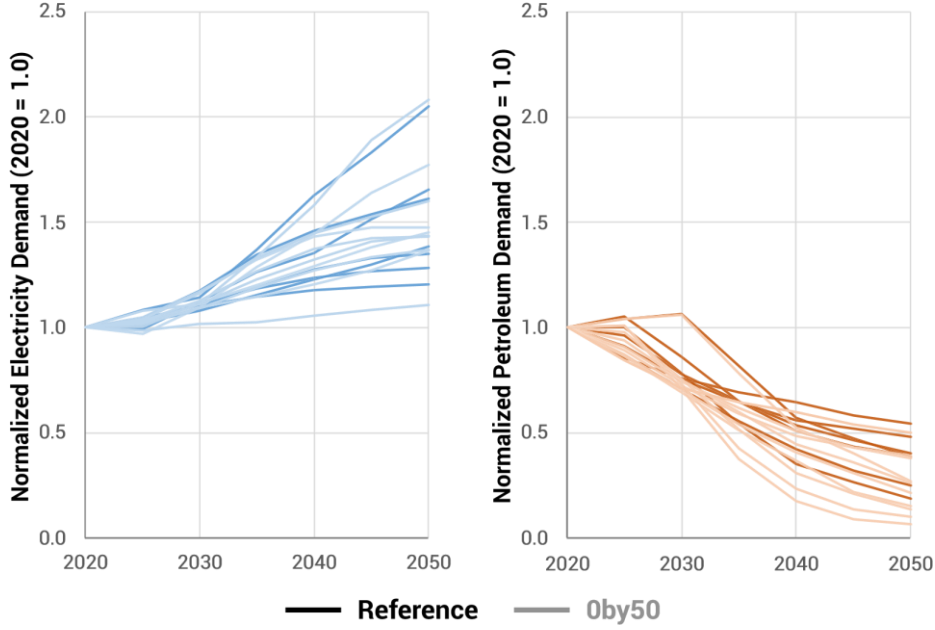
³ "Diğer Ulaşım" kategorisi toplu taşıma, kiralık araç ve uçak bileti harcamalarını içermektedir.

⁴ Gelecekteki politikalar, piyasalar ve teknolojiler hakkındaki belirsizlik, bir analizin birden fazla referans senaryosu benimseyebileceği ve ardından bu tür alternatif temellerin politika analizini nasıl etkileyebileceğini araştırabileceği anlamına gelir [32,33,34]. Ancak, her durumda, politika

değerlendirmesi, etkileri zaman içinde eş zamanlı olarak değişebilecek diğer etkenlerden ziyade politikalara atfetmek için bir karşı-olgusal referansın belirlenmesini gerektirir.

- **Oby50:** Bu senaryo 2050 yılına kadar net sıfır ulusal CO₂ emisyonuna ulaşır ve 2020 ile 2050 yılları arasında doğrusal bir CO₂ azaltımı gerektirir. Hedef, teknolojik

hedeflerine nasıl ulaşılabileceği ve farklı araçların politik ekonomisi hakkındaki belirsizliği yansıtmaktadır.⁸



Şekil 2. Zaman içinde konutlarda elektrik (sol panel) ve petrol (sağ panel) talebi. Çizgiler, referans senaryo (koyu çizgiler) ve Oby50 senaryosu (açık çizgiler) için bireysel model sonuçlarını göstermektedir. Değerler 2020 seviyelerine göre normalize edilmiştir.

karbondioksit giderimi (CDR) ve doğal karbon yönetimi dahil olmak üzere yalnızca CO₂ emisyonları açısından tanımlanmıştır.⁵ Çoğu model bu emisyon kısıtlamalarını, gelirlerin kişi başına toplu bir dağıtımla tüketicilere geri dönüştürüldüğü net CO₂ emisyonları üzerindeki bir üst sınır aracılığıyla temsil etmektedir.⁶⁷ Bu uyumlu gelir geri dönüşümü varsayımı, modeller arasında tutarlılığın korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu emisyon üst sınırı, federal ve eyalet politikaları, teşvikler ve standartların üzerine eklenmiştir. Uygulamada dikkate değer bir istisna, net sıfır hedeflerine ulaşmak için CO₂ kısıtlaması yerine standartlar da dahil olmak üzere bir politika kombinasyonu kullanan Enerji Politikası Simülatörüdür (EPS). Çalışmadaki politika uygulamalarının zıtlığı, hane halkı enerji harcamaları üzerindeki potansiyel etkileri göstermekte ve bu tür derin karbonsuzlaştırma

Senaryo tasarımı ve katılımcı modeller hakkında daha fazla bilgi için EMF 37 genel bakış belgesine bakınız [10]. Politika varsayımları modeller arasında uyumlaştırılmış olsa da, yakıt fiyatları (Şekil 15) dahil olmak üzere diğer varsayımlar uyumlaştırılmamıştır. Senaryolar, potansiyel sonuçların olasılıklarının veya modelleyicilerin teknoloji, piyasa veya politika tercihlerinin yansımaları olarak yorumlanmamalıdır.

Ayrıca çeşitli yan analizler de gerçekleştiriyoruz:

- Sonuçlar genel olarak geri dönüştürülmüş CO₂ gelirleri ile ve bu gelirler olmadan gösterilmiştir, çünkü bu gelirlerin nasıl kullanılabileceği konusunda belirsizlik vardır.
- Dağılımsal etkileri öncelikle yıllık gelir dilimlerine göre gösteriyoruz ki bu verilerin yaygınlığı nedeniyle politika analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak literatür, yıllık harcamaların ve tüketimin yaşam boyu

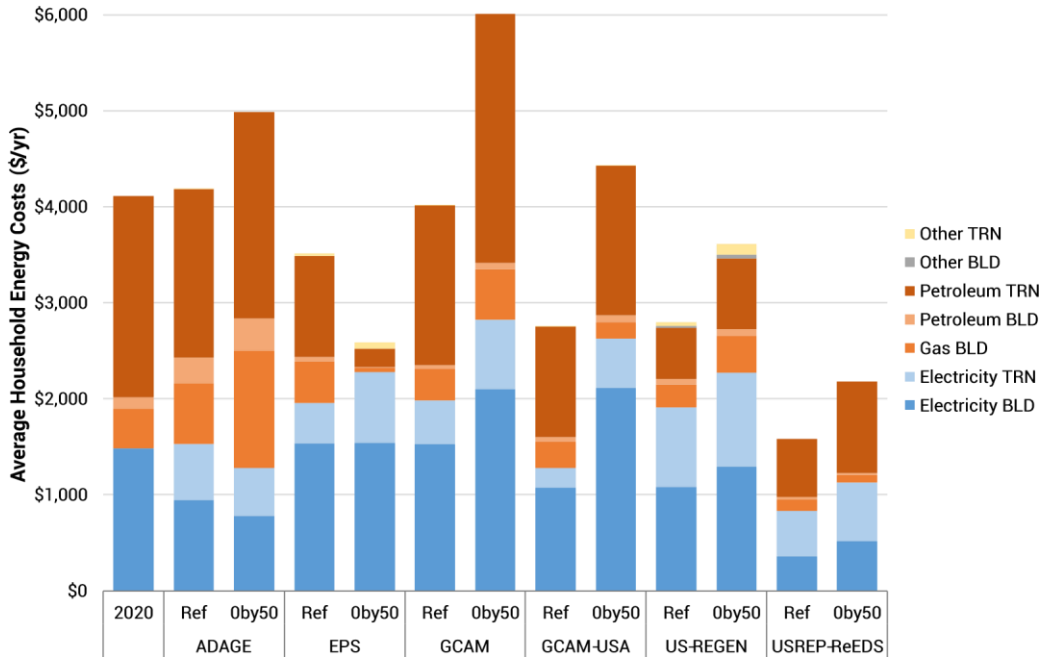
⁵ ABD'nin Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkısının 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı (GHG) emisyonuna ulaşmak olduğunu unutmayın. EMF 37 çalışması net-sıfır sera gazı duyarlılığı içermektedir, ancak bu duyarlılığı sunan model sayısının sınırlı olması nedeniyle bu senaryoyu analizden çıkarıyoruz.

⁶ CDR için yapılan ödemelerin karbon fiyatlandırma gelirlerinden çıkarılacağı varsayılmaktadır (yani, net emisyon gelirleri hanelere dağıtılmaktadır). Ancak, referans senaryodaki arazi yutak emisyonlarının Oby50 senaryosunda ödeme gerektirmediği varsayılmaktadır; bu emisyonlar birçok modelde yaklaşık - 800 Mt-CO₂ /yıl'dır (yaklaşık - 200 Mt-CO₂ /yıl karbon arazi yutağına sahip US-REGEN hariç). Bu varsayımlar, net-sıfır CO₂ değerine ulaşıldığında gelirlerin sıfır

olmayabileceği anlamına gelmektedir. Gelirler, gelire göre değişen ortalama kişi sayısına dayalı olarak kişi başına dağıtılmaktadır.

⁷ EPS için bitişik ABD için ayrı eyalet modelleri mevcuttur.

⁸ ABD'de net sıfır emisyon taahhüdünde bulunan eyaletler ve diğer yargı bölgeleri, bu hedeflere ulaşmak için gerekli politikaları, düzenlemeleri ve diğer itici güçleri büyük ölçüde henüz kabul etmemiştir, bu nedenle gelecekte hangi politika portföylerinin kullanılabileceği konusunda önemli bir tartışma alanı vardır. OECD'deki sera gazı emisyonlarının yaklaşık %40'ı şu anda karbon fiyatlandırmasına tabi olsa da [31], kamuoyu literatürü alternatif politika yaklaşımları karşısında karbon fiyatlandırmasına yönelik desteğin değişiklik gösterdiğini ve bağlama özgü olduğunu ortaya koymaktadır [30].



Şekil 3. 2050'de kategorilere göre ortalama hane halkı enerji harcamalarının modeller arası karşılaştırması. Çubuklar referans senaryo (Ref) ve 2050'ye kadar net sıfır CO₂ (Oby50) altındaki değerleri göstermektedir. Yakıt harcamaları ulaşım (TRN) ve bina (BLD) harcamaları olarak ayrılmıştır.

gelir ve refah etkileri için daha iyi bir vekil olabileceğini öne sürdüğünden, yıllık gelir yerine harcama düşüşlerinin kullanıldığı bir duyarlılık çalışması yürütüyoruz.

- Makaledeki sonuçlar genellikle [Eşitlik \(1\)](#) uyarınca fiyat ve miktarlardaki politika değişiklikleri için model projeksiyonlarını kullanmaktadır. Farklı gelir sınıfları arasında, özellikle de en düşük gelirli haneler için fiyat kaynaklı tepkilerin belirsizliği göz önüne alındığında, enerji tüketiminin en düşük gelirli haneler için tamamen esnek olmadığı ve harcamalardaki değişikliklerin yalnızca fiyatlarla ölçeklendirildiği uç bir durumu araştırıyoruz.

2.3. Modeller

Bu analizdeki modeller, konut fiyatları ve miktarlarıyla ilgili değişkenleri rapor eden EMF 37 modellerinin bir alt kümesidir. Katılımcı modeller geniş bir kapsam, yaklaşım ve yapı yelpazesine yayılmaktadır ([Tablo 1](#)). Bir model (WITCH) gelirle ilgili değişkenleri açıkça raporlamaktadır.

2.4. Uyarılar

Analiz sonuçlarını yorumlarken akılda tutulması gereken bazı uyarılar vardır:

- Analiz, toplam politika maliyetlerinin bir alt kümesi olan doğrudan yakıt tüketimindeki değişikliklere odaklanmaktadır. Literatür, dolaylı maliyetlerin (örneğin, enerji dışı mal ve hizmetlerin fiyatlarında politika kaynaklı artışlar) doğrudan maliyetlerle karşılaştırılabilir olabileceğini öne sürmektedir [\[17\]](#). Yakıt maliyetlerine odaklanılması, elektrikli ve fosil yakıtlar arasında farklılık gösteren son kullanım teknolojilerinin sermaye ve bakım maliyetlerindeki değişiklikleri de göz ardı etmektedir. seçenekler. Bu ihmaller, toplam maliyetlerin çalışmamızda gösterilen doğrudan yakıt maliyetlerinden daha yüksek olacağı anlamına gelmektedir.
- Gelir sınıfları arasında, gelir sınıfına göre uyarlanabilir davranışın (örneğin ikame, enerji verimliliği iyileştirmeleri) heterojenliği de dahil olmak üzere önemli farklılıklar olmasına rağmen, analizimizde "dikey eşitliğe" odaklanıyoruz.⁹ [Bölüm 4'te](#), bireysel hane halkı etkilerinin bir ondalık dilimdeki ortalamadan daha yüksek veya daha düşük

⁹ Örneğin, varlıklı haneler, isteğe bağlı talebi azaltarak enerji fiyat artışlarından kaçınmak veya enerji fiyat düşüşlerinden yararlanmak için daha iyi bir konumda olabilirler.

olabileceğini ö ne süren olası "yatay eşitlik" etkilerini gösteriyoruz.

- **Bölüm 2.1'e göre (Eşitlik (1))**, bu çalışmadaki birçok sonuç, yakıt fiyatlarındaki modele özgü değişiklikleri ve farklı gelir dilimlerindeki harcamalar için anket mikro verileriyle talebi ölçeklendirmektedir. Bununla birlikte, özellikle düşük gelirli haneler için gelir sınıfları arasında ve içinde tepkilerde farklılıklar olabilir (örneğin, düşük gelirli haneler için sınırlı harcanabilir gelir veya finansman kısıtlamaları, daha düşük ömür boyu sahip olma maliyetleri olsa bile daha yüksek verimlilik seçeneklerini satın almayı veya yakıt değiştirmeyi engelleyebilir). Bu hususlar **Bölüm 3.2'nin** sonundaki yan vakayı motive etmektedir.
- Gelecekteki iklim politikalarının gelir geri dönüşüm detayları oldukça belirsizdir. Bu analiz, gelirlerin kişi başı bazında toplu bir dağıtımla tüketicilere geri dönüştürüldüğünü varsaymaktadır. Ancak, bu gelirlerin hane halkları üzerindeki etkilerine ilişkin uç tahminler sağlamak için geri dönüştürülmüş gelirlerin olduğu ve olmadığı gelir sınıfları arasındaki etkileri gösteriyoruz.
- Analiz, projeksiyon dönemi boyunca gelir dağılımlarının değişmediğini varsaymaktadır.
- Refah etkileri, iklim değişikliği dışallığının azaltılmasıyla ilgili politika faydalarını ve EMF 37 yan etkiler belgesinin odak noktası olan gelişmiş hava kalitesi gibi ilgili yan faydaları içermemektedir.
- Sonuçlar teknolojiler, piyasalar ve politikalar hakkındaki varsayımlara bağlıdır. Bu değerlere ilişkin projeksiyonlar hakkındaki belirsizlikler göz önüne alındığında, sonuçlar, özellikle uzun vadeli çıktılar için öngörücü olarak alınmamalıdır; ancak, senaryolar arasındaki göreceli değişikliklere bakarak karşılaştırmalı bilgiler yararlı olabilir.

3. Sonuçlar

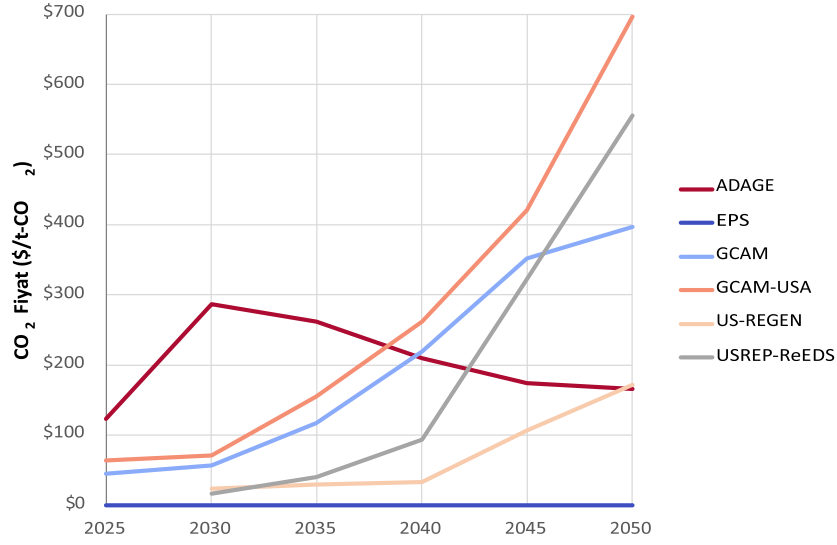
Bu bölüm, hanehalkı tüketiminin ve yakıt harcamalarının bu senaryolarda zaman içinde nasıl değiştiğine dair içgörü sağlamak için tüm modellerdeki toplam ulusal etkilerle başlamaktadır (**Bölüm 3.1**). Daha sonra, gelir sınıfları arasındaki dağılımsal etkileri incelemek için bu çıktıları CEX verileriyle birleştiriyoruz (**Bölüm 3.2**). Son olarak, sonuçları haneleri gelirlerine

göre açıkça tanımlayan modeller arasında karşılaştırıyoruz (**Bölüm 3.3**).

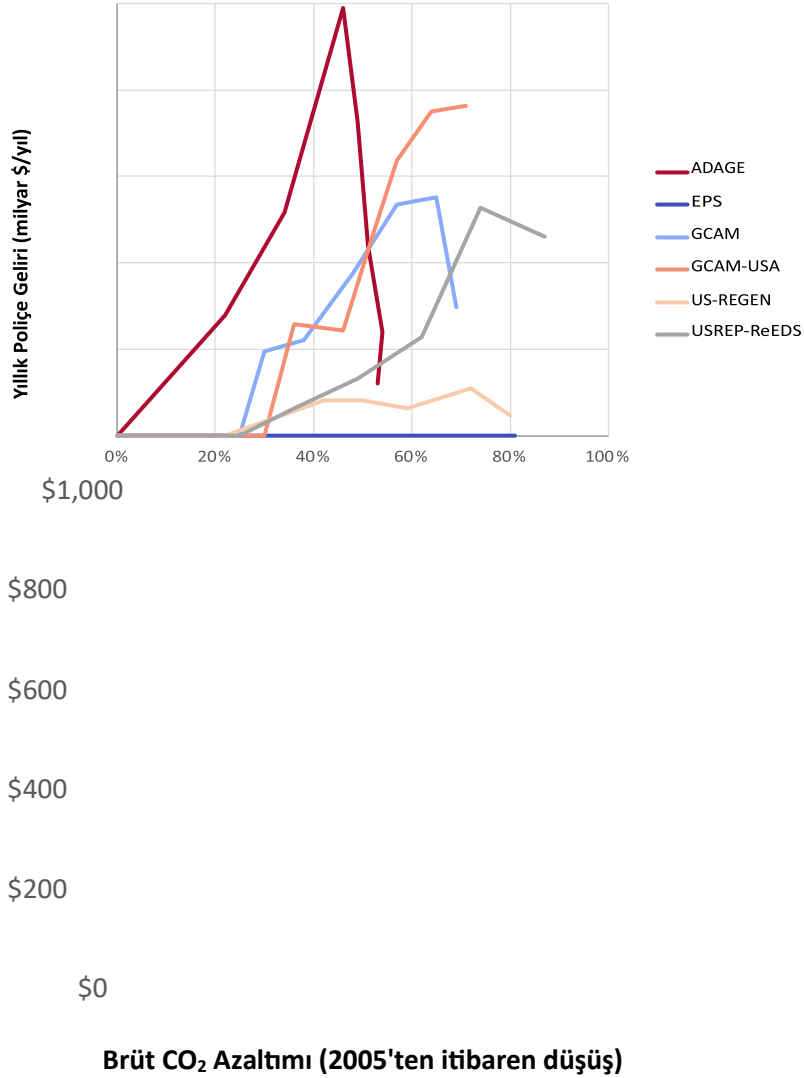
3.1. Zaman içinde modeller arasında ulusal refah etkilerini toplayın

Modelin sonuçları, hane başına elektrik talebinin zaman içinde artmasının beklendiğini göstermektedir (**Şekil 2**). Bu artışların kapsamı, Oby50 senaryosunda referansa kıyasla genel olarak daha yüksek olan talep ile farklılık göstermektedir (referansta 2020 seviyelerinden 2050'ye kadar %21-105 artarken, Oby50 senaryosunda %37-108 artmaktadır). Petrol kullanımı da benzer şekilde, özellikle net-sıfır CO₂ politikaları altında, ulaşım elektrifikasyonundaki artışlar nedeniyle kısmen azalmaktadır.

Yakıt tüketimindeki değişiklikleri konut fiyatlarıyla birleştiren **Şekil 3**, modeller arasında yakıtla göre ortalama hane halkı enerji harcamalarını karşılaştırmaktadır. Modeller genel olarak hanelerin doğrudan enerji harcamalarının 2020 ve 2050 yılları arasında azalacağı konusunda hemfikirdir. Yani, enerji zaman içinde mutlak anlamda daha uygun fiyatlı hale gelmektedir. Gelir arttıkça göreceli düşüşler daha da belirgin hale gelecektir. Birçok model, daha yüksek elektrik fiyatları ve harcamaları olsa bile, referansta elektrifikasyondan kaynaklanan toplam hane halkı enerji hizmeti maliyetlerinde mevcut seviyelere göre düşüşler göstermektedir. Referans, zaman içinde hafif hizmet araçlarının elektrifikasyonuna doğru güçlü bir eğilim göstermektedir (**Şekil 2**). Çoğu modelde net sıfır politikalarının toplam enerji harcamalarını referansa göre artırdığı konusunda genel bir mutabakat vardır. EPS'deki daha düşük hane halkı harcamaları, diğer modellerde kullanılan CO₂ kısıtlamaları veya emisyon yoğun yakıtların fiyatlarını artıran fiyatlar gibi yaklaşımlar yerine standartlar da dahil olmak üzere bir dizi politikayı kullanan Oby50 senaryosunun model uygulamasından kaynaklanmaktadır. Diğer modellerde daha yüksek harcamalar



Şekil 4. 2050'ye kadar net sıfır CO₂ senaryosu için zaman içinde modele göre CO₂ fiyatları. Bu model çıktıları, zaman içinde emisyon üst sınırı kısıtlaması üzerindeki gölge fiyatlardır. EPS'nin net-sıfır hedefini, diğer modellerde birincil etken olan CO₂ kısıtlaması olarak uygulamadığını unutmayın.



Şekil 5. Modele göre net-sıfır CO₂ politikasından elde edilen yıllık gelir. Politika geliri, 2005 seviyelerine göre brüt CO₂ azaltımlarına karşı çizilmiştir.

fosil yakıt fiyat artışlarının (Ek'e göre karbon fiyatlandırması dahil), net sıfır politikası kapsamında elektrifikasyon ve verimlilikten kaynaklanan petrol ve doğal gaz tüketimindeki düşüşlerden daha ağır bastığını yansıtmaktadır.

Karbon fiyatları Şekil 4'te zaman içinde gösterilmiştir; bunlar, emisyon üst sınırı kısıtlamasını karşılamak için azaltılan son CO₂ biriminin maliyetini yansıtan model çıktılarıdır. EMF 37 genel bakış belgesinde [10] tartışıldığı gibi, CO₂ gölge fiyatlarının zaman içindeki aralığı, aşağıdakiler de dahil olmak üzere bir dizi faktörü yansıtmaktadır:

- Model yapısı (örn. uzamsal ve zamansal çözünürlük).
- Teknoloji seçenekleri ve yakıt dönüşüm yollarının kapsamı (örn. örneğin, teknolojik karbon giderimi, düşük karbonlu enerji taşıyıcıları).
- Dışsal ve içsel davranış değişikliklerine ilişkin varsayımlar (örneğin, fiyata duyarlı enerji verimliliği, hizmet talep esneklikleri).
- Teknolojik maliyet ve performansla ilgili girdi varsayımları (örneğin, arz ve talep tarafı seçeneklerinin zaman içindeki sermaye maliyetleri, biyokütle gibi hammadde tedarik eğrileri, teknolojiler için verimlilik varsayımları).

2050'deki en yüksek karbon fiyatları GCAM-USA, USREP- ReEDS ve GCAM modellerindedir (400-700 \$/t-CO₂). Net-sıfır senaryoları, CDR ile ilgili ödemeler hesaba katıldıktan sonra, geri dönüştürülmüş gelirin hane halklarına kişi başı bazında toplu dağıtımını varsaymaktadır. ADAGE, CO'nun₂ daha yüksek olduğu ilk dönemlerde daha yüksek fiyatlara (ve dolayısıyla daha yüksek gelirlere) sahiptir, ancak daha sonra marjinal azaltım teknolojisi olan doğrudan hava yakalama maliyeti, ölçek ekonomileri ve teknolojik ilerlemenin yanı sıra fosil yakıt yakan ekipmanların düşük emisyonlu alternatiflerle değiştirilmesi nedeniyle azalır.

Şekil 5, net-sıfır CO₂ politikalarından elde edilen yıllık

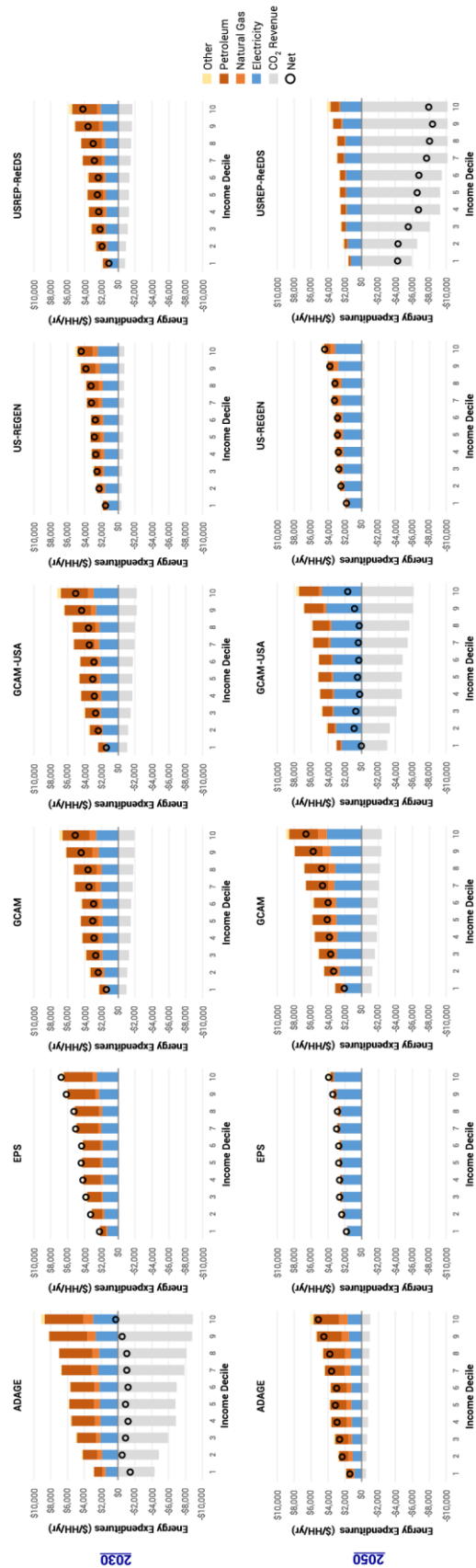


Fig. 6. Annual energy expenditures by fuel under the 0by50 policy scenario across income deciles. Values are shown for 2030 (top row) and 2050 (bottom row) across models (columns).¹ Households are displayed by annual income deciles, sorted from lowest to highest income (1 through 10, respectively). CO₂ revenues are assumed to be recycled to consumers on a per-capita basis, as discussed in Section 2.2. EPS does not report CO₂ revenues given how net-zero CO₂ policy is achieved through a combination of policies, including standards, rather than carbon pricing like the other models.

gelirlerin karbon Laffer eğrilerini nasıl sergilediğini göstermektedir; gelirler başlangıçta politika sıklığında artmakta ve daha sonra daha derin karbonsuzlaştırma (yani, daha yüksek vergi oranları) ile azalmaktadır. Vergi geliri ile karbonsuzlaştırma seviyeleri arasındaki bu doğrusal olmayan ilişki, daha önceki birçok çalışmada gözlemlenmiştir [18,19]. Bu ters U şeklindeki ilişki, daha yüksek politika sıklıklarında daha düşük CO₂ emisyonları ve daha yüksek CDR dağıtımından kaynaklanmaktadır, bu nedenle örtük CO₂ fiyatları artmasına rağmen, bu değişiklikler daha düşük emisyonlar ve daha yüksek CDR harcamaları ile dengelenmektedir. Gelir yolları modele göre değişir ve net hane halkı enerji harcamalarındaki değişikliklerle pozitif ilişkilidir. Toplam gelirin tepe noktaları yılda 110 milyar dolar ile 990 milyar dolar arasında değişmektedir,¹⁰ ve bu maksimum seviyelerin gerçekleştiği karbonsuzlaştırma seviyesi, 2005 seviyelerinin altında %46 ile %74 azaltım arasında değişmektedir. Bu Laffer eğrisi etkileri, emisyonların azaltılmasının daha yüksek CO₂ fiyatlarını fazlasıyla dengelediği daha yüksek politika sıklıklarında gelir geri dönüşümünden sonra iklim politikalarının aşamalı etkilerini azaltabilir. Başka bir deyişle, bu dinamikler gelir düzeyleri arasında eşitlik sonuçlarını iyileştirmek için fonların kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Net politika gelirleri için zaman eğilimleri Şekil 16'da gösterilmektedir.

3.2. Gelir sınıfına göre net-sıfır politikalarının dağılımsal etkileri

Gelire göre enerji harcamaları Şekil 6'da gösterilmektedir. Modeller, elektriğin harcamalardaki payının zaman içinde artarken, toplam enerji harcamalarının azaldığı konusunda büyük ölçüde hemfikirler; bu da büyük ölçüde elektrifikasyon nedeniyle azalan petrol harcamalarından kaynaklanmaktadır (Şekil 3'te öngörülmüştür). Her ikisinin de etkileri modele göre değişmektedir. Modeller ayrıca enerji harcamalarının genel büyüklükleri açısından da farklılık göstermektedir.

Geri dönüştürülmüş CO₂ gelirlerinin/iadelerinin/kâr paylarının büyüklüklerinde önemli farklılıklar vardır. Bu

farklılıklar kısmen CO₂ fiyat yörüngelerindeki (Şekil 4) ve artık CO₂ emisyonlarındaki farklılıkları yansıtmaktadır.¹¹ Gelirlerin geri ödenmesi, politikanın dağıtımsal sonuçlarını hafifletebilir ve bu indirimlerin boyutu, daha fazla sakini olduğu için daha yüksek gelirli haneler için artar.¹² Bu gelirler, daha yoksul haneler için daha yüksek gelir paylarıdır. Karbon fiyatlandırmasından elde edilen gelirin düşük veya sıfır olduğu modeller (örneğin, servet transferi olmayan politikalarla uygulanan net-sıfır CO₂ nedeniyle) daha büyük net politika kaynaklı etkilere sahiptir. Gelirlerin kullanımı, doğrudan harcama yükleri kadar, hatta daha fazla önemlidir ve politika tasarımına bağlı olarak değişebilir [20-23].

Şekil 7, referans ve Oby50 senaryoları arasındaki yıllık enerji harcamalarındaki farkları göstermektedir. Net-sıfır politika senaryosundaki artışlar yatay eksenin üstünde, azalışlar ise altındadır. Net-sıfır politikasıyla birlikte, hem daha yüksek perakende fiyatları hem de politika kaynaklı elektrifikasyonu yansıtacak şekilde, elektrik harcamaları birçok model ve dönemde genel olarak artmaktadır. Modeller, net-sıfır politikasının fosil yakıt harcamalarını artırması veya azaltması bakımından farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar temel olarak net-sıfır hedefinin karbon fiyatlandırması yoluyla uygulanıp uygulanmamasından kaynaklanmaktadır. Altı modelden beşi doğal gaz ve petrol harcamalarında artış göstermektedir (yani, karbon fiyatından kaynaklanan fiyat artışları, net-sıfır politikası kapsamında tüketimdeki düşüşlerden daha ağır basmaktadır). İndirim, birçok model, yıl ve gelir sınıfı için artan doğrudan enerji harcamalarını dengelemek için yeterlidir.

Şekil 8, enerji yükünün bir ölçüsü olan vergi öncesi hane gelirinin bir payı olarak net enerji harcamalarındaki değişiklikleri ve net-sıfır politikalarının gelir eşitsizliği üzerindeki etkilerini göstermektedir. Geri dönüştürülmüş CO₂ gelirleri hesaba katılmadan önce, net sıfır politikaları altı modelin beşinde geriletici¹³ ve gelir sınıfları arasındaki eşitsizliği artırıcıdır. En düşük gelirli gruplar üzerindeki bu orantsız etkiler, bu hanelerin enerjiye harcadıkları gelir payının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (gösterildiği gibi

¹⁰ Karbon fiyatları, teknolojik ilerleme, tamamlayıcı politikalar ve düzenlemeler veya politika sıklığı ile ilgili alternatif varsayımlarla daha yavaş veya daha hızlı olabilir.

¹¹ EPS, net-sıfır CO₂ politikasının diğer modeller gibi karbon fiyatlandırması yerine standartlar da dahil olmak üzere politikaların bir kombinasyonu yoluyla nasıl elde edildiği göz önüne alındığında CO₂ gelirlerini raporlamamaktadır.

¹² Örneğin, ADAGE daha yüksek CO₂ fiyatları nedeniyle 2030'da en yüksek indirimlere sahipken, GCAM-USA ve USREP-ReEDS 2050'de en yüksek indirimlere ve CO₂ fiyatlarına sahiptir.

¹³ USREP-ReEDS'de 2050 yılında en yüksek gelirli hanelerin hane başına yıllık yaklaşık 12.000 \$ CO₂ gelinine sahip olduğunu, ancak tüm panellerde ortak bir dikey eksen tutmak için çubuğun kesildiğini unutmayın.

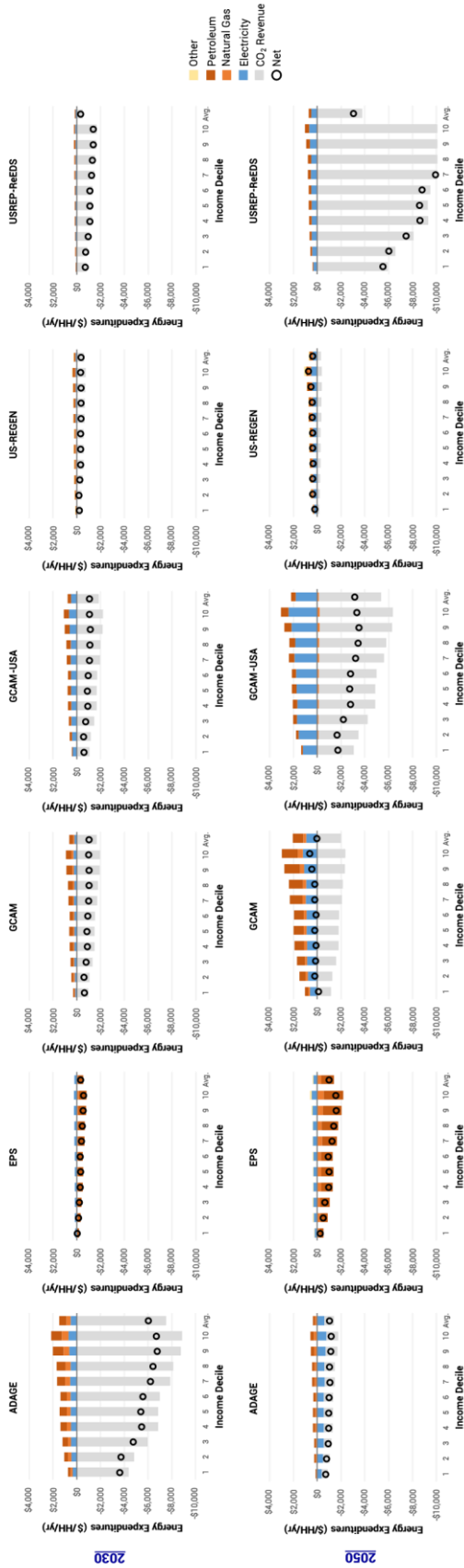


Fig. 7. Change in annual energy expenditures by fuel between the 0by50 and reference scenarios across income deciles (i.e., 0by50 costs minus reference costs). Values are shown for 2030 (top row) and 2050 (bottom row) across models (columns).² Households are displayed by annual income deciles, sorted from lowest to highest income (1 through 10, respectively). CO₂ revenues are assumed to be recycled to consumers on a per-capita basis, as discussed in Section 2.2. EPS does not report CO₂ revenues given how net-zero CO₂ policy is achieved through a combination of policies, including standards, rather than carbon pricing like the other models.

Şekil 1). Başka bir deyişle, net-sıfır politikası hanehalklarına telafi edici transferleri kolaylaştırmazsa, geriletici bir etkiye sahip olabilir.

Ancak, bu regresif etki, varsayılan kişi başı iadeler hesaba katıldığında artan oranlı hale gelmektedir, ancak bu oran Şekil 8'de modele ve yıla göre değişmektedir. Karbon temettü çeki veya vergi kredisi gibi toplu transferler/iadeler, düşük gelirli hane halklarının politikadan net kazançlar görmesi (yani, iadelerinin doğrudan maliyet artışlarını aşması) nedeniyle

artan oranlı olabilir¹⁴ ki bu da gelirin bir payı olarak en yüksektir. Karbon fiyatlandırması, dağılımsal etkilerini azaltmaya (veya diğer politika hedeflerine ulaşmaya) yardımcı olabilecek fonlar yaratabilir; bu durum, gelirden bağımsız temiz elektrik standartları gibi diğer politika tasarımları için geçerli değildir [24]. Bununla birlikte, bazı karbon fiyatlandırma politikaları gelir artırmadığından (örneğin, ödenekleri serbestçe tahsis eden üst sınır ve ticaret sistemleri) ve karbon fiyatlandırma dışı politikalar gelir artırmaya bile (örneğin, gelir uygunluk sınırlarına sahip araç vergi kredileri) dağılımsal etkileri azaltabileceğinden, politika tasarımının özellikleri bunların göreceli oranını belirler. Bu etkilerin zaman içinde değişebileceğini unutmayın. Tüm modellerde 2030'da düşük gelirli haneler için transfer öncesi harcama payları daha büyük ve transfer sonrası daha küçüktür; ancak, iki modelde düşük gelirli haneler için transfer sonrası paylar daha büyük olduğundan, hikaye 2050'de daha karışıktır.

Bu makaledeki önceki sonuçlar, yıllık gelire dayalı dilimler arasındaki dağılımsal etkileri göstermektedir. Ancak, yıllık harcamalar ve tüketim, yaşam boyu gelir ve refah etkileri için daha iyi bir vekil olabilir (yani, emekliler gelire göre sıralamanın önerdiğinden daha yüksek tüketim yaşam tarzlarına sahiptir), ancak bu verilerin yaygınlığı nedeniyle politika analizlerinde genellikle yıllık gelir kullanılmaktadır. Bu olası tutarsızlığı gidermek için, aynı CEX veri setinden alınan harcama verilerini ve Bölüm 2.1'de tartışılan yöntemi kullanıyoruz. Başka bir deyişle, model projeksiyonlarını gelir sınıfları arasında temel yıl verilerine göre ölçeklendirmek yerine, sonuçları harcama sınıfları arasında ölçeklendiriyoruz.

Şekil 9, harcama sınıfları ile 2050 etkilerini Şekil 8'deki gelir sınıfları ile daha önceki sonuçlarla karşılaştırmaktadır; burada dikey eksen, yıllık gelirin veya toplam harcamaların bir payı olarak enerji harcamalarındaki değişiklikleri temsil etmektedir. Harcama dilimlerinin kullanılması, düşük gelirli ancak yüksek harcamalı haneleri (örneğin tasarrufla yaşayan emekliler) kontrol ederek dağılımı düzeltmektedir. Bu karşılaştırma, dağılım analizi için harcamalar yerine yıllık gelir dilimlerinin kullanılmasının, en düşük gelir dilimleri üzerindeki gelir etkilerini olduğundan fazla tahmin ederek emisyon politikalarının ilerciliğini nasıl abartabileceğini göstermektedir.

Ek bir duyarlılık, enerji tüketiminin en düşük gelirli haneler için tamamen esnek olmadığı ve harcamalardaki değişikliklerin yalnızca fiyatlarla ölçeklendirildiği uç durumu araştırmaktadır:

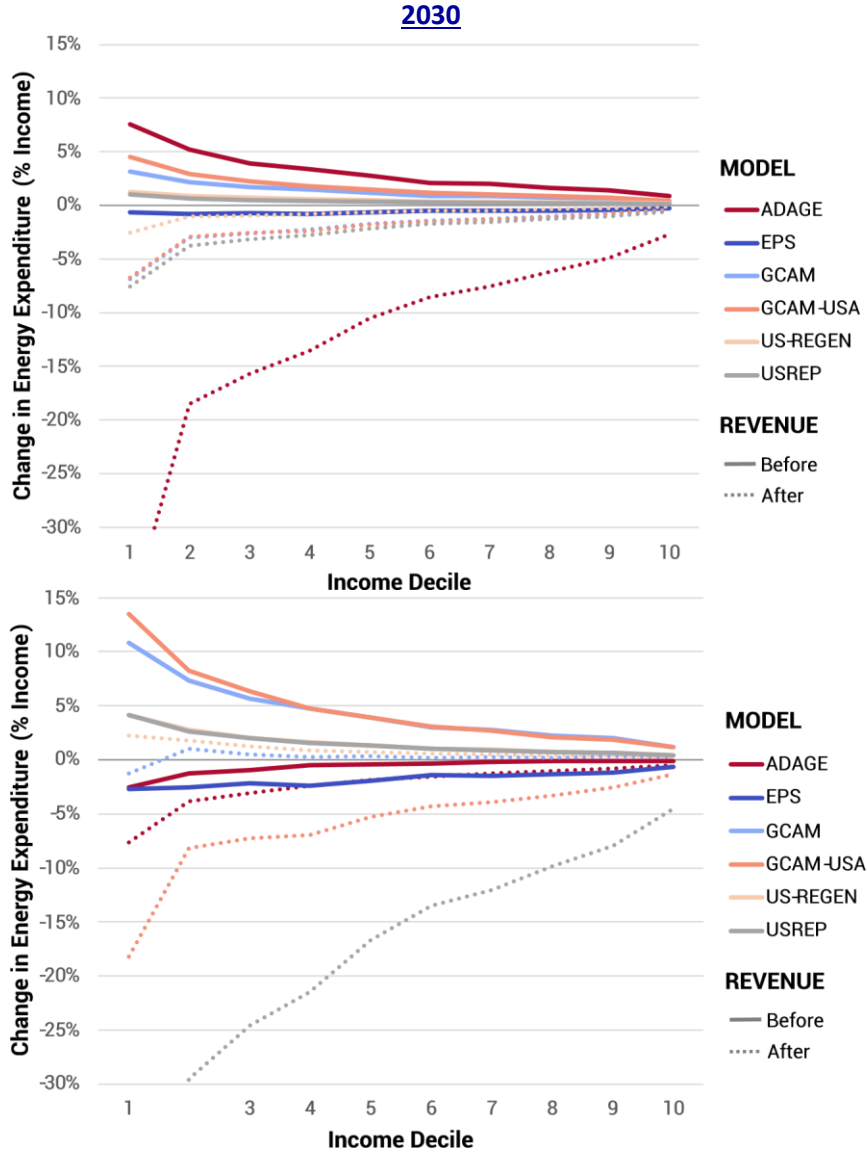
$$\epsilon_{fi}^t = -\frac{f}{0} \cdot \epsilon_{fi} \left(p^t \right)^0 \quad (3)$$

p_f

Burada ϵ_{fi}^t t döneminde f yakıtı için yapılan harcama ve i hane halkı geliridir. Bir yandan, miktar ve fiyat değişikliklerine göre ölçeklendirme, düşük gelirli hanelerin enerji harcamalarının daha az esnek olduğu ölçüde harcamalar üzerindeki etkiyi olduğundan düşük gösterebilir. Öte yandan, sadece fiyata göre ölçeklendirme, fiyat kaynaklı tepki marjlarını ihmal ederek düşük gelirli aileler üzerindeki harcama etkilerini olduğundan fazla tahmin etmektedir.

Şekil 10, talep esnekliklerinin en düşük gelirli haneler için enerji harcamaları üzerindeki etkilerini göstermektedir. İklim politikasına davranışsal bir tepki olmadığı varsayımı, kapsamı ve bileşimi modele göre değişmekle birlikte, daha önemli yakıt harcamalarına yol açmaktadır. Esnek olmayan talep ile harcamalardaki daha yüksek artışlar, referans ve Oby50 senaryoları arasındaki yakıt fiyatlarındaki daha büyük farklılıkları yansıtmaktadır (Şekil 15). Birçok model esnek olmayan taleple birlikte toplam enerji harcamalarını iki katından fazla artırmaktadır ve ADAGE, esnek olmayan talebi nedeniyle yaklaşık üç kat daha yüksektir.

¹⁴ Faydaların ve/veya maliyetlerin gelir sınıfları arasındaki dağılımını incelemek için yapılan insidans analizinde, gelir arttıkça gelirin bir payı olarak maliyetler düşüyorsa politikalar gerileyicidir (ve ilerci için bunun tersi geçerlidir).



Şekil 8. Gelir dilimlerine göre Oby50 ve referans senaryolar arasında yıllık enerji harcamalarındaki değişikliklerin modeller arası karşılaştırması. Değerler, geri dönüştürülmüş CO₂ gelirleri dahil edilmeden önce (düz çizgiler) ve bu transferlerden sonra (noktalı çizgiler) vergi öncesi gelirin bir payı olarak gösterilmektedir. Paneller 2030 (üstte) ve 2030 (altta) yıllarındaki etkileri göstermektedir. 2050 (altta).

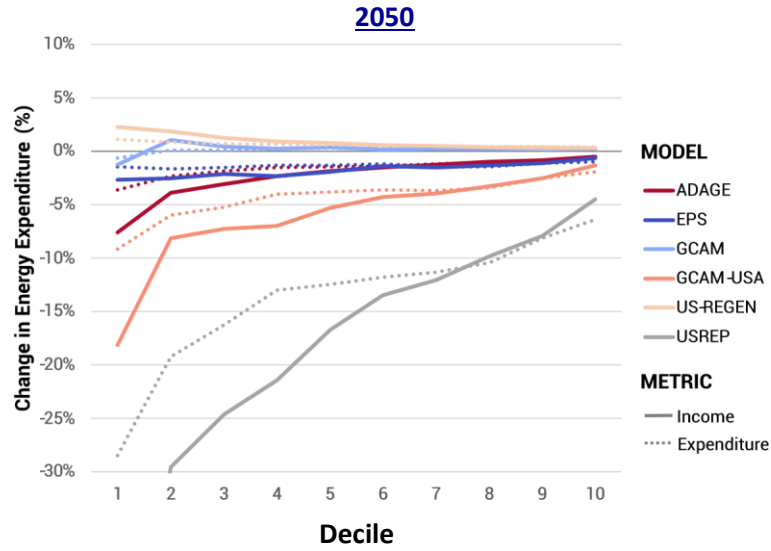
daha yüksek yakın vadeli CO₂ fiyatı (Şekil 4), yakıt talebinin esnek olmadığı durumlarda daha önemli harcama değışikliklerine yol açmaktadır.

3.3. Gelir sınıflarına sahip modeller için etkiler

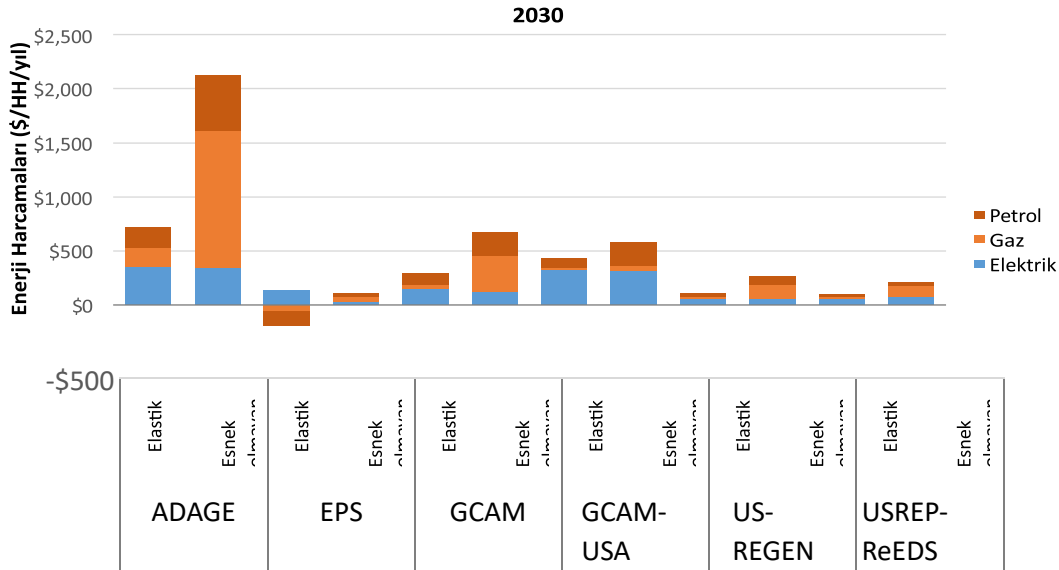
Değışkenleri, ayrıca, gelir dilimlerine göre raporlayan modellerin alt kümesi için çıktıları doğrudan inceleyebiliriz. Bu yaklaşımla, raporlanan enerji ve tüketilen toplam mal miktarları endojen olduğundan, çıktılar yalnızca enerji fiyatlarındaki değışikliklerin mevcut tüketim kalıpları üzerindeki etkisini değıil, aynı zamanda bu yeni fiyatlara yanıt olarak tüketim kalıplarındaki değışikliklerin etkisini de dikkate almaktadır. Ayrıca, mallar, hizmetler ve boş zaman dahil olmak üzere hanehalkı fayda fonksiyonlarına giren tüm unsurları içeren genel refah değışikliklerine de bakabiliriz. Bu bölümde, bu çalışmada gelire göre çıktıları raporlayan tek katılımcı model olan WITCH modelinden elde edilen çıktıları tartışıyoruz.¹⁵

Net-sıfır hedefi, karşılık gelen bir karbon fiyatı ve geliri olan bir karbon üst sınırı olarak modellenmiştir. EMF 37'deki tüm modeller, gelirin kişi başına eşit olarak yeniden dağıtıldığını varsaymaktadır. Ayrıca WITCH modeli, karbon gelirlerinin dağılım açısından nötr bir şekilde yeniden dağıtıldığı bir senaryoyu da uygulamaktadır. Yani, karbon gelirlerinin dağılımı hiç etkilemediğı (dolayısıyla "nötr" olarak etiketlendiğı) zımnen varsayılmaktadır; örneğın, gelirler karbon salımını azaltmak için kullanılıyorsa

¹⁵ Enerji dışı mal ve hizmetlerin fiyatlarından kaynaklanan dolaylı değışiklikler hesaba katıldığında etkinin büyüklüğünün daha az olduğunu unutmayın.



Şekil 9. 2050'de Oby50 ve referans senaryolar arasında yıllık enerji harcamalarındaki değişikliklerin modeller arası karşılaştırması. Değerler, gelir dilimleri (düz çizgiler) ve harcama dilimleri (noktalı çizgiler) için CO₂ gelirleri dahil edildikten sonra vergi öncesi gelirin bir payı olarak gösterilmektedir.



Şekil 10. 2030'da en düşük gelirli haneler için Oby50 ve referans senaryolar arasında yakıt bazında yıllık enerji harcamalarındaki değişim. Değerler gösterilmiştir

elastik talep (önceki sonuçlardan) ve elastik olmayan talep varsayımı.

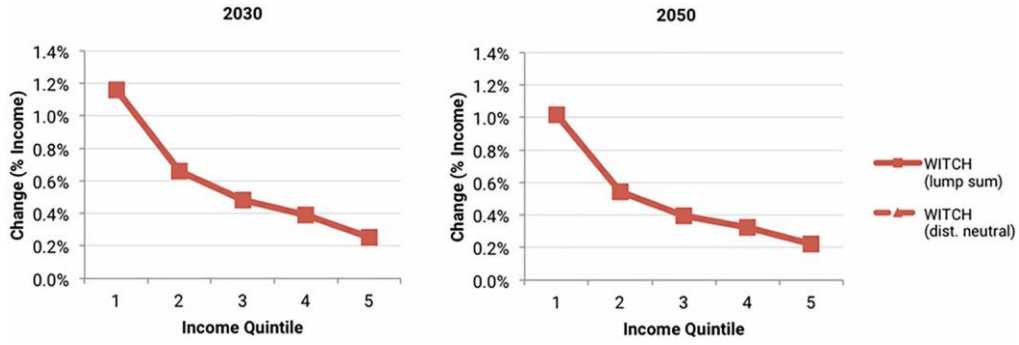
hükümet borç seviyeleri. Bu ek gelirin yeniden kullanımı varsayımının varlığı, modellenen karbon fiyatından elde edilen gelirin yeniden dağıtımına karşı net sıfır hedefinin kendisinin etkisine bakmamızı sağlar. Bununla birlikte,

2050 yılına gelindiğinde etkiler, gelirin yeniden dağıtımının aksine, esas olarak emisyon azaltımlarının sonucudur. WITCH'teki gelir sınıfları, enerji (ulaşım ve konut enerji kullanımı), gıda ve diğer malların tüketimi arasında zamanlararası tüketim tahsisine ilişkin, anket verilerine göre kalibre edilmiş, endojen tüketim, ücretler, tasarruflar ve servet dinamiklerine sahip birleşik bir

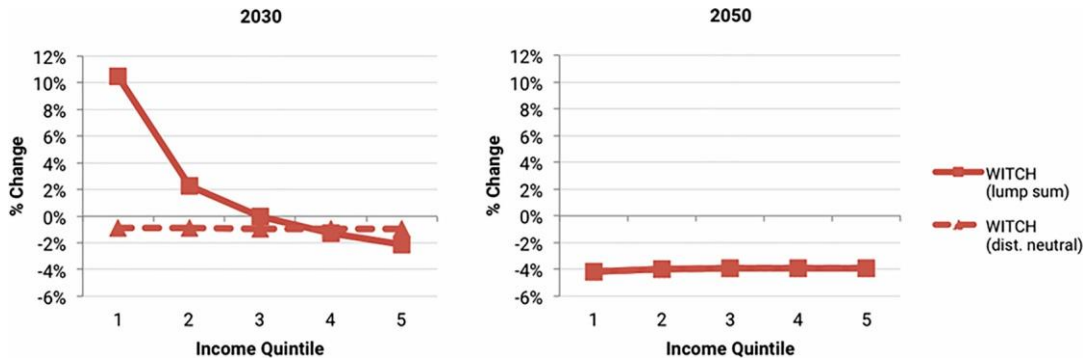
hanehalkı optimizasyon probleminde modellenmiştir [25].

Şekil 11, politikasız duruma göre net sıfır hedefi altında enerji tüketimindeki değişiklikleri göstermektedir. Şekil 8'de olduğu gibi, düşük gelirli haneler, yüksek gelirli emsallerine göre enerji maliyetlerinde en büyük yüzdelik artışla karşı karşıyadır; en düşük gelirli beşte birlik dilim için hane başına yıllık yaklaşık 200 dolarlık maliyet artışı, temel gelirlerinin kabaca %1'ine denk gelmektedir. Bu durum, modellendiği şekliyle net-sıfır politikasının yalnızca enerji yüküne bakıldığında gerileyici olduğunu göstermektedir. WITCH modelinde enerji talebinin makro düzeyde ele alındığını ve dağılım modeliyle etkileşime girmediğini, bunun da gelir grupları arasındaki enerji tüketiminin gelirin yeniden kullanımı varsayımları arasında aynı olmasına yol açtığını unutmayın.

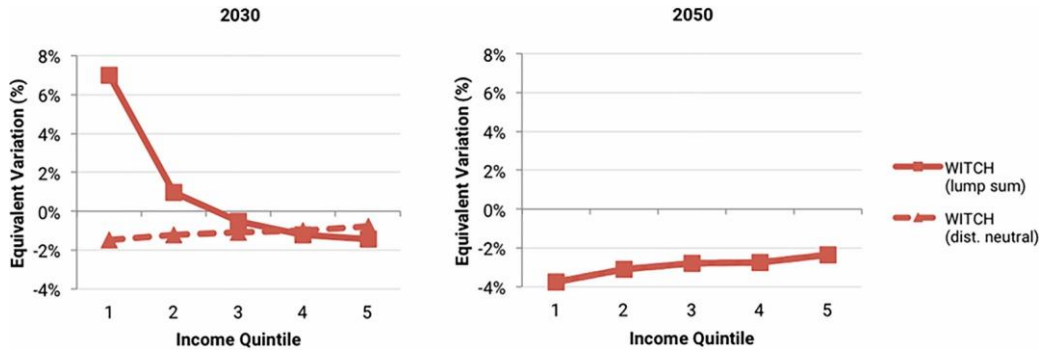
Şekil 12'de gösterildiği gibi, bu modellerin net-sıfır hedeflerinin gelir grupları arasındaki tüm mal ve hizmetlerin genel tüketim seviyelerini nasıl etkileyeceğini de inceleyebiliriz. İlk olarak dağılımsal olarak nötr gelir geri dönüşümü varsayımına baktığımızda, net sıfır politikasının tek başına biraz gerileyici olduğunu ve tüm gelir gruplarında tüketimi 2030'da yaklaşık %1 (sol panel) ve 2050'de %4 (sağ panel) azalttığını görebiliriz. 2030 yılında, kişi başına toplu bir indirim eklenmesi



Şekil 11. Net-sıfır hedefi altında, gelirin yeniden kullanımı varsayımına göre gelir beşte birlik dilimleri arasında politikasız duruma göre enerji tüketimindeki değişim (gelirin %'si). "Götürü miktar", karbon gelirlerinin kişi başı bazında götürü olarak iade edilmesini ifade etmektedir; gelirler, "dağıtım nötr" altında dağıtımı etkilemeyecek şekilde yeniden kullanılmaktadır. Sonuçlar 2030 (solda) ve 2050 (sağda) için gösterilmiştir.



Şekil 12. Gelirin yeniden kullanımı varsayımına göre gelir beşte birlik dilimleri arasında politikasız duruma kıyasla net sıfır hedefi altında toplam tüketimdeki değişim (% değişim). Sonuçlar 2030 (solda) ve 2050 (sağda) için gösterilmiştir. "Götürü miktar", karbon gelirlerinin kişi başı bazında götürü olarak iade edilmesini ifade eder; gelirler "dağıtım" altında dağıtımı etkilemeyecek şekilde yeniden kullanılır. Nötr." "Toplam tüketim" tüm mal ve hizmetleri içermektedir.



Şekil 13. Politikasız duruma göre eşdeğer varyasyonda net-sıfır hedefinin politika maliyeti (harcamaların %'si).

Sonuçlar 2030 (solda) ve 2050 (sağda) için gösterilmiştir. politikayı oldukça artan oranlı hale getirmektedir; en düşük %20'lik dilimin tüketimi, başlangıçtaki gelirlerine kıyasla iade edilen büyük miktardaki karbon gelirleri nedeniyle %10'a kadar artmaktadır. Senaryolar, 2050 yılına gelindiğinde, ekonomi net sıfır emisyonu

ulaştığında sınırlı karbon geliri nedeniyle politikanın biraz gerileyeceği şekilde yakınsamaktadır.

Son olarak, sonuçları gelir dilimlerine göre açıkça raporlayan modeller, sadece hanelerin mal ve hizmet tüketimindeki değişikliklerle ilişkili refah etkilerini değil,

aynı zamanda boş zaman tüketimiyle ilişkili faydayı da dahil ederek, eşdeğer varyasyon açısından toplam politika maliyetine ilişkin politikanın dağılımsal etkisini incelememize olanak tanımaktadır. Toplam tüketimde olduğu gibi, **Şekil 13'**te net sıfır politikasının refah azaltıcı olduğunu ve götürü transfer olmadan hafifçe gerileyici olduğunu, ancak transferle birlikte 2030'da oldukça ilerici hale geldiğini görebiliriz. Yukarıda olduğu gibi, senaryolar sınırlı karbon gelirleri ile 2050'de hafif gerileyici olacak şekilde yakınsamaktadır.

4. Tartışma ve Sonuçlar

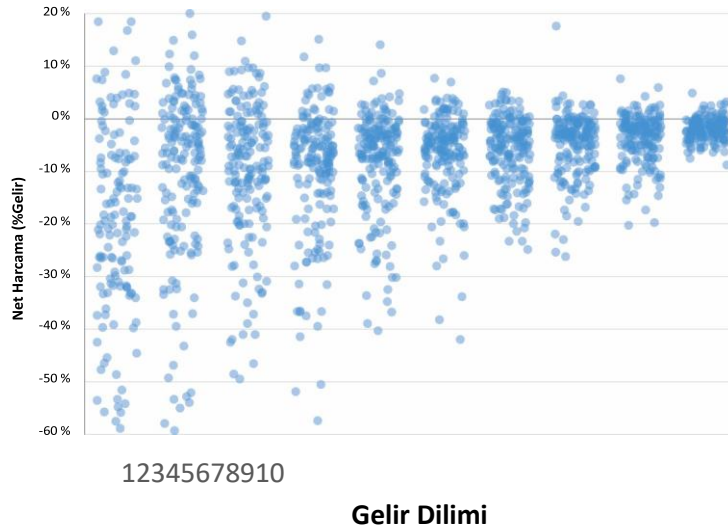
Bu çalışma, enerji sistemi dönüşümlerinin ve önerilen politikaların gelir sınıfları arasındaki dağılımsal etkilerini karakterize etmek için tüketici verileriyle ayrıntılı enerji-ekonomik modellerin yeni bir bağlantısını kullanmaktadır. Çalışmada, 2050 yılında ABD genelinde ekonomi çapında net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşan uyumlaştırılmış senaryolara sahip yedi model kullanılmaktadır.

Analizden çıkarılacak birkaç önemli sonuç var:

- İklim politikası tasarımı, özellikle gelirlerin toplanıp toplanmadığı ve nasıl kullanıldığı, dağılımsal sonuçlar üzerinde birinci dereceden etkilere sahiptir. Geri dönüştürülmüş CO₂ gelirleri hesaba katılmadan önce,

etkisine sahip olmaları bakımından gerileyicidir. Başka bir deyişle, net-sıfır politikası - çoğu katılımcı modelde CO₂ emisyonlarına bir üst sınır getirilerek uygulandığı gibi - telafi edici hane halkı transferlerini kolaylaştırmazsa, gerileyici bir etkiye sahip olabilir. Tasarımlarına bağlı olarak, toplu transferler, özellikle en düşük gelirli haneler için bu etkileri azaltabilir ve net-sıfır politikalarını birçok model ve dönem için ilerici hale getirebilir. Net sıfır politikaları birçok tüketici, model ve dönem için net indirimlere yol açmaktadır. Katılımcı modellerden biri (EPS), net sıfır hedeflerine ulaşmak için CO₂ kısıtlaması yerine standartlar da dahil olmak üzere bir politika kombinasyonu kullanmakta ve ayrıca aşamalı sonuçlar bulmaktadır. Bu çalışmadaki birçok model, karbon fiyatlandırmasının ekonomi çapında net-sıfır CO₂ hedefine ulaşmak için ağır yükün büyük bir kısmını üstlendiğini varsaymaktadır, ancak diğer araçlar bu senaryolarda varsayılandan daha önemli roller oynarsa veya karbon fiyatlandırması daha fazla istisnaya sahipse, bu karşılaştırmaların gösterdiği gibi, devlet gelirleri daha sınırlı olabilir ve bu da muhtemelen politikanın ilericiliğini azaltacaktır.

- Modeller genel olarak hane halkları için doğrudan enerji harcamalarının referans ve net sıfır politikaları



Şekil 14. Net sıfır senaryosunda gelirin payı olarak enerji harcamaları ve geri dönüştürülmüş gelir. Sonuçlar 2050 yılında GCAM-USA modeli için gösterilmiştir. Noktalar CEX mikro verilerinden alınan bireysel tüketici birimlerini temsil etmektedir ancak nüfus ağırlıklarını göstermemektedir.

burada incelenen üst sınıra dayalı net sıfır politikaları, düşük gelirli haneler üzerinde en önemli yüzde maliyet

ile kısmen elektrifikasyon nedeniyle zaman içinde azalacağı konusunda hemfikir; ancak

elektrifikasyonun kapsamı ve referans ile net sıfır politikası arasındaki değişiklikler farklılık göstermektedir.

- Dağılım analizi için harcama dilimlerinin yerine yıllık gelir dilimlerinin kullanılmasının, en düşük gelirli dilimler üzerindeki gelir etkilerine aşırı ağırlık vererek emisyon politikalarının ilericiliğini nasıl abartabileceğini gösteriyoruz. Harcama temelli bir analize geçiş, dağılımsal etkileri daha doğru bir şekilde tahmin edebilir ve gelir sınıfları arasındaki dağılımı düzleştirebilir.

Bu bulgular, gelecekteki çalışmalar için çeşitli alanlar önermektedir. İlk olarak, gelir geri dönüşümünün önemi, farklı gelir geri dönüşüm varsayımları (EMF 32'de [20] yürütülen hassasiyetlere benzer şekilde), tüm sera gazlarında net-sıfır emisyonlar ve alternatif teknoloji varsayımları dahil olmak üzere alternatif politika tasarımları etrafında ek senaryoların gerekli olduğunu göstermektedir. Bu senaryolar ayrıca, büyük emisyon ve enerji sistemi etkilerine ve dolayısıyla dağılımsal sonuçlar üzerinde etkilere sahip olabilen Enflasyon Azaltma Yasası teşviklerinin modeller üzerindeki etkilerini de değerlendirmelidir [26,27]. Ek senaryolar, ekonomi genelinde net sıfır emisyonla ulaşmak için alternatif politika portföylerini incelemek açısından da değerli olacaktır. İkinci olarak, düşük karbonlu geçişlerin genellikle hava kalitesinde iyileşmelere ve insan sağlığı açısından faydalara yol açtığı göz önüne alındığında [28,29], çoklu model ortamı da dahil olmak üzere bu değişikliklerin dağılımsal etkilerini araştırmak için ek çalışmalar yapılmalıdır. Üçüncü olarak, burada incelenen net-sıfır CO₂ politikasından daha katı olan 2050 yılına kadar net-sıfır sera gazı emisyonları ile başka hassasiyetler de yürütülmelidir.

Eşitlikle ilgili etkileri incelemek üzere enerji modellerini iyileştirmek için çeşitli fırsatlar bulunmaktadır:

- Refah etkilerini izlemek için gelirle ilgili açık yapısal sınıfların eklenmesi

- Mevcut teknolojik stok, yakıt fiyatları, iklim ve diğer faktörlerdeki olası bölgesel heterojenlik göz önüne alındığında, eşitlik etkilerindeki yerel farklılıkları anlamak için bölgesel raporlama sağlanması¹⁶
- Gelir sınıfları, farklı bina tipleri, mevcut teknolojiler ve iklim bölgeleri arasında teknolojinin benimsenmesinin önündeki fırsatları ve engelleri anlamak için son kullanım kararlarına heterojenlik eklemek
- Alternatif gelir geri dönüşüm senaryolarını incelemek için ekonomi ve vergi kanunu temsillerinin eklenmesi (örneğin, enerji sistemi modellerini hesaplanabilir genel denge modellerine bağlayarak)
- Hava kalitesi ve diğer yerel etkileri incelemek için enerji sistemi modellerinin daha ayrıntılı araçlarla birleştirilmesi

Gelecekteki bir başka çalışma alanı da net sıfır politikalarının yatay eşitlik boyutlarının araştırılmasıdır [30, Fisher ve Pizer]. Bu analiz gelir sınıfları arasında dikey eşitliğe odaklanmış olsa da, ortalama etkiler nispeten sınırlı olsa bile, hane halkı enerji tüketimindeki heterojenlik nedeniyle gelir sınıfları içinde refah değişikliklerinde önemli farklılıklar vardır. Şekil 14, 2050 yılında GCAM-USA modeli için gelirin bir payı olarak net harcamalardaki değişiklikleri göstermektedir. Bu şekil, gelir sınıfları içindeki hanelerin ortalamasını sunmak yerine (Şekil 8'de gösterildiği gibi), CEX mikro verilerinden elde edilen bireysel tüketici birimleri için değişiklikleri göstermektedir. Karşılaştırma, gelir sınıfları içindeki politika etkilerindeki çeşitliliği göstermektedir (bu makaledeki daha önceki sonuçların ayrıntılı olarak incelediği gibi gelirler arasındaki değişikliklere ek olarak) ve yatay eşitliğin gelecekteki çalışmalar için önemli olduğunu göstermektedir.

References

- [1] M. Thind, C. Tessum, I. Azevedo, J. Marshall, Fine particulate air pollution from electricity generation in the US: health impacts by race, income, and geography, *Environ. Sci. Technol.* 53 (23) (2019) 14010–14019.
- [2] S. Zhu, M. Mac Kinnon, A. Carlos-Carlos, S. Davis, S. Samuelsen, Decarbonization will lead to more equitable air quality in California, *Nat. Commun.* 13 (1) (2022) 5738.
- [3] Equitable decarbonization research roadmap, EPRI (2022).
- [4] R. Brulle, D. Pellow, Environmental justice: human health and environmental inequalities, *Annu. Rev. Public Health* 27 (2006) 103–124.

¹⁶ USREP-ReEDS değişkenleri gelir sınıfına göre açıkça raporlansa da, modeller arasında karşılaştırma yapmak için normalize etmemizi sağlayacak temel gelir ve tüketim değişkenlerini raporlamadığı için bu bölümdeki ilgili tartışmaya dahil etmedik.¹⁸ Modeller bu analiz için bölgesel

düzeyde raporlama yapmamaktadır ve farklı toplama düzeylerine sahiptir (Tablo 1), bu da bu tür bölgesel karşılaştırmaları zorlaştırmaktadır.

- [5] J. Cronin, D. Fullerton, S. Sexton, Vertical and horizontal redistributions from a carbon tax and rebate, *J. Assoc. Environ. Resour. Econ.* 6 (2019) S169–S208.
- [6] J. Woollacott, The economic costs and co-benefits of carbon taxation: a general equilibrium assessment, *Clim. Change Econ.* 9 (2018), 1840006.
- [7] X. García-Muros, J. Morris, S. Paltsev, Toward a just energy transition: a distributional analysis of low-carbon policies in the USA, *Energy Econ.* 105 (2022), 105769.
- [8] J. Caron, J. Cole, R. Goettle, C. Onda, J. McFarland, J. Woollacott, Distributional implications of a national CO₂ tax in the US across income classes and regions: a multi-model overview, *Clim. Change Econ.* 9 (2018), 1840004.
- [9] E. Baker, A. Goldstein, I. Azevedo, A perspective on equity implications of net zero energy systems, *Energy Clim. Change* 2 (2021), 100047.
- [10] M. Browning, J. McFarland, J. Bistline, G. Boyd, M. Muratori, M. Binsted, C. Harris, T. Mai, G. Blanford, J. Edmonds, A. Fawcett, O. Kaplan, J. Weyant, Net-zero CO₂ by 2050 scenarios for the United States in the Energy Modeling Forum 37 Study, *Energy Clim. Change* 4 (2023), 100104.
- [11] D. McLaughlin, C. Stokes, Income inequality and mortality in US counties: does minority racial concentration matter? *Am. J. Public Health* 92 (1) (2002) 99–104.
- [12] D. Massey, N. Denton, American apartheid: segregation and the making of the underclass. *Social Stratification, Class, Race, and Gender in Sociological Perspective*, 2nd Edition, Routledge, 2019, pp. 660–670.
- [13] A. Dreihobl, L. Ross, R. Ayala, How high are household energy burdens? An assessment of national and metropolitan energy burden across the United States, *ACEEE* (2020).
- [14] S. Cong, D. Nock, Y. Qiu, B. Xing, Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap, *Nat. Commun.* 13 (1) (2022) 2456.
- [15] EIA, "One in three U.S. households faces a challenge in meeting energy needs," 2018. [Online]. Available: www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37072.
- [16] D. Cullenward, J. Wilkerson, M. Wara, J. Weyant, Dynamically estimating the distributional impacts of US climate policy with NEMS: a case study of the Climate Protection Act of 2013, *Energy Econ.* 55 (2016) 303–318.
- [17] A. Mathur, A. Morris, Distributional effects of a carbon tax in broader US fiscal reform, *Energy Policy* 66 (2014) 326–334.
- [18] M. Yuan, G. Metcalf, J. Reilly, S. Paltsev, The revenue implications of a carbon tax, MIT (2017).
- [19] M. Budolfson, F. Dennig, F. Erickson, S. Feindt, M. Ferranna, M. Fleurbaey, D. Klenert, U. Kornek, K. Kuruc, A. M'ejan, W. Peng, Climate action with revenue recycling has benefits for poverty, inequality and well-being, *Nat. Clim. Chang.* 11 (12) (2021) 1111–1116.
- [20] A. Barron, A. Fawcett, M. Hafstead, J. McFarland, A. Morris, Policy insights from the EMF 32 study on U.S. carbon tax scenarios, *Clim. Change Econ.* 9 (2018), 1840003.
- [21] G. Metcalf, On the economics of a carbon tax for the United States, *Brookings Pap. Econ. Act.* (2019) 405–484.
- [22] L. Goulder, M. Hafstead, G. Kim, X. Long, Impacts of a carbon tax across US household income groups: what are the equity-efficiency trade-offs? *J. Public Econ.* 175 (2019) 44–64.
- [23] C. Boehringer, S. Peterson, J. Weyant, Introduction to the special issue "EMF 36: carbon pricing after Paris (CarPri)", *Energy Econ.* 112 (2022), 106139.
- [24] S. Borenstein, R. Kellogg, Carbon pricing, clean electricity standards, and clean electricity subsidies on the path to zero emissions, *Environ. Energy Policy Econ.* 4 (1) (2023) 125–176.
- [25] J. Emmerling, D. Malerba, Modelling the Interaction between Climate Mitigation and Income Inequality: The Use of Integrated Assessment Models and the Case of India. *Governing the Interlinkages between the SDGs - Approaches, Opportunities and Challenges*, Routledge, 2022.
- [26] J. Bistline, G. Blanford, M. Brown, D. Burtraw, M. Domeshek, J. Farbes, A. Fawcett, A. Hamilton, J. Jenkins, R. Jones, B. King, H. Kolus, J. Larsen, A. Levin, M. Mahajan, C. Marcy, E. Mayfield, J. McFarland, H. McJenon, R. Orvis, Patank, Emissions and energy impacts of the inflation reduction act, *Science* 380 (6652) (2023) 1324–1327.
- [27] J. Bistline, N. Mehrotra, C. Wolfram, Economic implications of the climate provisions of the inflation reduction act, *Brookings Pap. Econ. Act.* (2023) vol. Forthcoming.
- [28] J. Bistline, G. Blanford, J. Grant, E. Knipping, D. McCollum, U. Nopmongkol, H. Scarth, T. Shah, G. Yarwood, Economy-wide evaluation of CO₂ and air quality impacts of electrification in the United States, *Nat. Commun.* 13 (1) (2022) 6693.
- [29] W. Peng, Y. Ou, Integrating air quality and health considerations into power sector decarbonization strategies, *Environ. Res. Lett.* (2022) 17.
- [30] C. Fischer, W. Pizer, Horizontal equity effects in energy regulation, *J. Assoc. Environ. Resour. Econ.* 6 (S1) (2019) S209–S237.