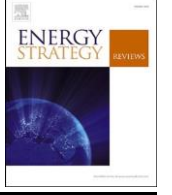




ScienceDirect'te bulunan içerik listeleri

Enerji Stratejisi İncelemeleri

dergi ana sayfası: www.elsevier.com/locate/esr

Daha akıllı ve daha temiz: Enerji dijitalleşmesi karbon verimliliğini nasıl etkiliyor?

Ziyi Shi^{a,*}, Lawrence Loh^b, Hongshuang Wu^c, Dongri Han^c^a Ekonomi ve Yönetim Fakültesi, Harbin Mühendislik Üniversitesi, Heilongjiang, 150001, Çin^b Yönetişim ve Sürdürülebilirlik Merkezi, NUS İşletme Okulu, Singapur Ulusal Üniversitesi, Singapur, 117592, Singapur^c İşletme Fakültesi, Shandong Teknoloji Üniversitesi, Zibo, 255012, Çin

ARTICLE INFO

Sorumlu Editör: Dr. Mark Howells

Anahtar kelimeler:

Enerji dijitalleşmesi

Karbon verimliliği

Doğal dil işleme Mekansal Markov

zinciri

SBM-DDF

ABSTRACT

Dijitalleşme, Çin'in karbon nötrlüğü ve sürdürülebilir kalkınma arayışını katalize eden, devam eden enerji sanayi devrimlerinin arkasındaki itici güçtür. Çin'deki enerji işletmelerinin il verilerinden ve yıllık raporlarından yararlanarak bu çalışma, kıyaslamalı regresyon modelleri, aracı etki modelleri, eşik modelleri ve mekânsal ekonometrik modelleri kapsayan kapsamlı bir analitik çerçeve oluşturmaktadır. Bu modeller, enerji dijitalleşmesinin karbon verimliliği (CP) üzerindeki çok yönlü etkilerini araştırmak için kullanılmaktadır. Amaç, enerji dönüşümünü ilerletmek ve dijital unsurlarla zenginleştirilmiş düşük karbonlu kalkınmayı teşvik etmek için mikro düzeyde kanıt ve politika rehberliği sağlamaktır. Bu araştırma, iki kritik boyutu inceleyerek bir Enerji Dijitalleşme Endeksi hesaplamak için doğal dil işleme ve makine öğrenimi tekniklerini kullanmaktadır: dijital endüstri yatırımı ve dijital dönüşüme yönelik eğilim. Aşağıdaki temel bulgular ortaya çıkmaktadır: ilk olarak, enerji dijitalleşmesi (ED), zamansal ve bölgesel farklılıklarla işaretlenen bir olgu olan bölgesel CP'yi geliştirmek için istatistiksel olarak anlamlı bir yetenek sergilemektedir. İkinci olarak, analiz, Logaritmik Ortalama Bölünme Endeksi (LMDI) ayrıştırma yöntemiyle ortaya konduğu üzere, enerji teknolojisi yeniliği, enerji yapısı ve enerji kullanım verimliliği ile ilişkili aktarım mekanizmalarını doğrulamaktadır. Ayrıca, enerji dijitalleşmesinin düşük karbonlu ekonomiler üzerindeki optimal etkisi, olgun piyasa koşulları, mütevazı çevresel düzenlemeler, gelişmiş dijital altyapı ve azaltılmış kaynak bağımlılığı ile karakterize edilen ortamlarda gerçekleşmektedir. Buna ek olarak, mekânsal Markov zinciri analizi, bölgesel CP'de "kulüp yakınsaması" olarak adlandırılan ve belirgin bir "Matthew etkisi"nin eşlik ettiği dikkat çekici bir mekânsal dağılım modelini ortaya çıkarmaktadır. Mekânsal Durbin modeline göre, enerji dijitalleşmesi, özellikle çevre bölgelerde, daha belirgin bir kısa vadeli etki ile olumlu mekânsal yayılma etkileri yaratmaktadır. Bu görüşlere dayanarak, bu makale ulusal "dijital enerji" stratejisini, bölgesel farklılaşma politikalarını ve işletmeler arasında dijital teknoloji inovasyonunu teşvik etmeye yönelik girişimleri kapsayan ilgili politika önerileri sunmaktadır. Bulgularımız, hükümetleri daha akıllı ve temiz bir enerji ekosistemi oluşturmaları için güçlendiren sağlam ampirik kanıtlar ve yapıcı politika içgörülerini sunmaktadır. Ayrıca bu bulgular, etkili dijital stratejiler uygulamak isteyen diğer gelişmekte olan ülkeler için de değerli bir rehberlik sunmaktadır.

1. Giriş

Günümüz dünyası, ekonomik durgunluk, enerji güvenliği endişeleri ve sürekli baskı altında olan iklim krizini kapsayan sayısız küresel sorunla karşı karşıyadır [1]. Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH'ler) uzun zamandır ulusları erişilebilir, güvenilir ve sürdürülebilir modern enerji kaynakları oluşturmaya çağırırken (SKH7 - Erişilebilir ve Temiz Enerji) aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadele için acil eylem çağrısında bulunmaktadır (SKH13 - İklim Eylemi). Bu çerçevede

bağlamda, düşük karbon ekonomisi sosyoekonomik büyümeyi uyumlaştırmak, enerji güvenliğini sağlamak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için çok önemli bir yaklaşım olarak durmaktadır ve bu yaklaşım dünyanın dört bir yanındaki uluslar tarafından benimsenmiştir [2]. Bu ülkeler arasında, dünyanın en büyük enerji tüketicisi ve karbon yayıcısı olarak kabul edilen Çin, 2060 yılına kadar karbon nötrlüğüne ulaşmayı hedeflemektedir ve bu da kapsamlı ve derin bir ekonomik dönüşüm gerektirmektedir. Karbon emisyonlarına en önemli katkısı yapan ve ulusal ekonominin temel taşlarından biri olan enerji sektörü, Çin'de karbon salınımını azaltmaya yönelik çabaların merkez üssü olarak ortaya çıkmıştır.

* Sorumlu yazar.

E-posta adresi: szy18810294913@163.com (Z. Shi).<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101347>

Alındı 28 Eylül 2023; Gözden geçirilmiş haliyle alındı 31 Ocak 2024; Kabul edildi 19 Şubat 2024

Çevrimiçi kullanılabılır 28 Şubat 2024

2211-467X/© 2024 Yazarlar. Elsevier Ltd. tarafından yayınlanmıştır. Bu makale CC BY-NC lisansı altında açık erişimli bir makaledir (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

düşük karbon ekonomisi [3]. Bununla birlikte, Çin'in enerji endüstrisinde, artan çevresel kaynak kısıtlamaları, enerji yapılarındaki dengesizlikler ve düşük seviyeli enerji teknolojilerinin varlığı da dahil olmak üzere çok sayıda engel devam etmektedir - karbon azaltma çabalarının karmaşıklığını toplu olarak artıran zorluklar [4].

Dijital ekonomi çağında dijitalleşme, endüstriyel yapıların optimizasyonunu teşvik ederek, teknolojik inovasyonu kolaylaştırarak ve enerji yoğunluğunu azaltarak karbon azaltımı için önemli bir potansiyel ortaya koymuştur. Dijitalleşmenin gizli gücü kullanılmaya devam ederken, makro, mezo ve mikro düzeylerde çeşitli aktörler dijitalleşme yolculuğuna çıkmıştır. Özellikle, endüstriyel dijitalleşme, mevcut teknolojik devrim ve endüstriyel reform dalgası içinde amansız bir eğilim olarak ortaya çıkmıştır [5]. Çin'in "Dijital Ekonominin Geliştirilmesi için 14. Beş Yıllık Planı" ve "Modern Enerji Sistemi için 14. Beş Yıllık Planı", dijitalleşmenin enerji sektöründeki önemli rolünün altını çizmekte ve onu "beşinci enerji - enerji tasarrufu"nun ardından "altıncı enerji" olarak konumlandırmaktadır [6]. Enerji dijitalleşmesi, temel üretim faktörü veri, birincil itici gücü dijital teknoloji ve yeni aracı dijital dönüşüm olan derin bir sanayi devrimi olarak müjdelenmektedir [7]. Sürdürülebilir enerji gelişimi perspektifinden bakıldığında, akademisyenler enerji sektöründe dijital teknolojinin uygulanmasının enerji yoksulluğunu azaltabileceğini [8], enerji güvenliğini destekleyebileceğini [9], enerji üçgeni muammasını çözebileceğini [10] ve enerji dönüşümünü teşvik edebileceğini [11] kanıtlamıştır. Diğer taraftan, dijital teknoloji ve enerji sektörünün yakınsamasının ekonomik büyümeyi teşvik etmede, dolayısıyla enerji verimliliğini artırmada [12], teknolojik inovasyonu teşvik etmede [13] ve kurumsal dayanıklılığı güçlendirmede [14] etkili olduğu kanıtlanmıştır. Kuşkusuz, enerji dijitalleşmesi (ED), enerji sektörünü ilerletmek ve endüstriyel tedarik zincirini modernize etmek için vazgeçilmez bir katalizör olma potansiyeline sahiptir. Çin'in "karbon nötrlüğü" planının gerçekleştirilmesinde yeni bir itici gücü temsil etmektedir. Bununla birlikte, mevcut araştırmalar genellikle "dijital" i enerji sektörünün gelişiminde dışsal bir faktör olarak ele almakta ve ağırlıklı olarak dijital teknolojinin veya dijital ekonominin enerji sektörü üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Bu yaklaşım, dijital alanı enerji sektörüne tam anlamıyla entegre edememekte ve enerji dijitalleşmesi kavramının ölçülmesi bir yana, bu kavrama sınırlı bir vurgu yapılmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda, dijital dönüşümün düşük karbonlu etkilerine ilişkin araştırmalar, öncelikle mekanik analizlerle sınırlıdır ve çok boyutlu etki etkilerinin tanımlanmasından yoksundur.

Bu makalede, ekonomik büyüme teorisi ve dijital ekonomi ED ve otomobil üretkenliği (CP) arasındaki karmaşık ilişkiyi açıklığa kavuşturmak için ekonomi teorisi. Veri mevcudiyeti ve Çin'deki bölgesel farklılıkları karşılamak için, ampirik analiz için araştırma örneklemimiz olarak 2012'den 2021'e kadar uzanan Çin iller arası panel verilerini seçtik. İlgili veriler, güvenilirlikleri ve otoriter yapılarıyla tanınan bölgesel istatistik yıllıklarından ve işletme yıllık raporlarından elde edilmiştir. Araştırma metodolojimizde, farklı boyutların etkisini ayırt etmek için hedeflenen ekonometrik modelleri akılcıca kullanıyoruz. İlk olarak, ED'nin bölgesel CP üzerindeki doğrudan etkisini sabit etkili modeller ve araç değişken yöntemleri aracılığıyla inceliyoruz. İkinci olarak, ED'nin CP'yi etkilediği aracı mekanizmaları üç temel konuya odaklanarak araştırıyoruz: enerji teknolojisi inovasyonu, enerji yapısı optimizasyonu ve enerji kullanım verimliliğindeki gelişmeler. Üçüncü olarak, mar- ketleşme, çevresel düzenlemeler, dijital altyapı ve kaynak bağımlılığı gibi dış faktörlere bağlı çoklu eşik etkilerini ortaya çıkarıyoruz. Son olarak, Mekânsal Durbin Modeli'ni (SDM) kullanarak hem kısa vadeli hem de uzun vadeli mekânsal yayılma etkilerini araştırıyoruz.

Bu makale, dört temel açıdan önceki çalışmalara önemli katkılar sağlamaktadır. İlk olarak, enerji endüstrisinin düşük karbonlu kalkınmayı yönlendirmedeki kritik rolünü kesin olarak kabul etmektedir. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışma, Çin bağlamında enerji dijitalleşmesinin CP üzerindeki etkisini araştıran ilk çalışmadır. Ölçümde, doğal dil işleme ve makine öğreniminden kullanan yenilikçi bir yaklaşım benimsiyoruz

ED endeksinin tahmin etmek için iki boyuta odaklanan teknikler: dijital endüstriyatırımı ve dijital dönüşümü benimseme istekliliği. Bu öncü yöntem, bu özel alanda dijitalleşmenin ölçülmesi konusunda yeni bir bakış açısı sağlamaktadır. İkinci olarak, dijitalleşmenin CP üzerindeki etkisinin aktarım mekanizmasını üç farklı yöne ayırarak mevcut bilgi birikimini zenginleştiriyoruz: Logaritmik Ortalama Bölünme Endeksi (LMDI) ayrıştırma yöntemini temel alarak enerji teknolojisi, enerji yapısı ve enerji kullanım verimliliği. Bu yenilikçi yaklaşım, geleneksel yorumların ötesine geçmekte ve "dijital karbon azaltımının" teorik temelini genişletmektedir. Üçüncü olarak, yalnızca ED ve CP arasında doğrusal bir ilişki kurmaya odaklanmak yerine, piyasa dinamiklerini, hükümet politikalarını, altyapı koşullarını ve kaynak bağımlılıklarını kapsayan dış ortamın heterojenliğini titizlikle değerlendiriyoruz. ED ve CP arasındaki potansiyel heterojen korelasyonların bu kapsamlı araştırması, çevresel yeniden yapılandırma için bir plan olarak hizmet edebilir ve böylece ED'nin olumlu etkisini en üst düzeye çıkarabilir. Dördüncü olarak, CP'nin mekânsal-zamansal dinamiklerini aydınlatmak için Mekânsal Markov Zinciri modelini kullanıyoruz. Mekânsal ve zamansal boyutları entegre ederek, ED'nin dış bölgelerdeki CP üzerindeki etkisini etkili bir şekilde yakalıyoruz. Bu yaklaşım, önceki statik araştırmaları hem tamamlamakta hem de genişletmektedir. Sonuç olarak, dijital fırsatlardan yararlanmayı ve ulusal, bölgesel ve işletme düzeylerinde düşük karbonlu kalkınmayı aktif olarak teşvik etmeyi amaçlayan bir dizi politika önerisi sunuyoruz. Aktarım mekanizmalarına ilişkin yeni kavrayışlarımız, politika formülasyonu için yeni bir odak noktası sağlamaktadır. Eşik etkilerinin analizi, bölgesel dış ortamların göreceli dezavantajlarının tanımlanmasına yardımcı olarak, dijital dönüşümün düşük karbonlu etkisini en üst düzeye çıkarmak için dinamik farklılaşma politikalarının uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Dijital karbon azaltımında mekânsal yayılma etkilerinin ortaya çıkarılması bölgesel işbirlikçi girişimleri teşvik etmektedir. Buna ek olarak, kısa vadeli mekânsal etkilerin daha belirgin olduğu yönündeki yeni bulgumuz, bölgesel dijital dönüşüm akran gruplarının hızını artırmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma dijital enerjinin karbon azaltma potansiyeline ilişkin ikna edici kanıtlar sunmakta, Çin'in "çift karbon" stratejisine katkıda bulunmakta ve enerjide dijital dönüşüm girişimlerine başlayan kaynak temelli ve gelişmekte olan ülkeler için değerli içgörüler sunmaktadır.

Bu makalenin geri kalanı aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır: Takip eden Bölümde ED, ekonomik kalkınma ve karbon emisyonlarına ilişkin kapsamlı bir literatür taraması yapılmaktadır. Üçüncü bölümde teorik analiz tanımlanmakta ve araştırma hipotezleri oluşturulmaktadır. Dördüncü bölümde ekonometrik modeller ve temel değişkenler tanımlanmaktadır. Daha sonra, 5. Bölüm ampirik sonuçları ele alırken, sonuç bölümü bulgularımızı ve politika önerilerimizi sunmakta, sınırlamaları tartışmakta ve gelecekteki araştırma yönlerini ana hatlarıyla belirtmektedir.

2. Literatür taraması

2.1. Dijitalleşme ve ekonomik kalkınma üzerine araştırma

Dijitalleşme çağında, akademik ilgi giderek dijital ekonominin makroekonomik gelişiminden çeşitli konuların mikro düzeydeki dijitalleşmesine kaymıştır. Dijitalleşme, iletişim, bilgi teknolojisi ve internet alanındaki ilerlemelerin ileri bir doruk noktasını temsil etmektedir [15]. Akademik söylem içerisinde dijitalleşme, iş modelleri [16], teknolojik dönüşümler [17] ve akıllı üretim [18] gibi hususları kapsayacak şekilde farklı perspektiflerden tanımlanmıştır. Dijitalleşme kavramı akademik çevreler arasında evrensel bir fikir birliğine sahip olmasa da, temel bileşenleri konusunda geniş bir fikir birliği vardır. İlk olarak, dijitalleşme, modern bilgi teknolojilerini uygulayarak mikro işletmelerin operasyonel faaliyetlerini temelden yeniden şekillendirmektedir [19]. İkinci olarak, dijitalleşme, birlikte değer yaratmayı güçlü bir şekilde vurgulamakta, ekonomilerin rekabet avantajlarını güvence altına almasını ve son derece rekabetçi pazarlarda büyümeyi sürdürmesini sağlamaktadır [20]. Üçüncü olarak, kapsayıcı

Dijitalleşmenin amacı, endüstriyel ekonomilerin ekolojik yapısını yükseltmektir [21].

Çağdaş akademik odak, dijitalleşmenin ekonomik sonuçlarına odaklanmakta ve araştırmalar üç farklı kategoriye ayrılmaktadır: ① Mikro Düzeyde Etki: Akademisyenler dijitalleşmenin veri unsurlarını geleneksel üretim sistemlerine dahil ederek, üretim organizasyon yapılarında ve reel ekonominin faktör sistemlerinde "yaratıcı değişimler" başlatmış ve işletme verimliliğine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur [22]. Sabit etkiler modelleri, genelleştirilmiş en küçük kareler tahmin yöntemleri (FGLS) ve Blinder-Oaxaca ayrıştırma gibi nicel yöntemler, Güney Afrika [23], Çin [24] ve İspanya [25] dahil olmak üzere çeşitli bölgelerde dijitalleşmenin verimlilik üzerindeki olumlu etkisini doğrulamak için kullanılmıştır. Ayrıca, akademisyenler dijitalleşmenin üretkenlik üzerindeki mekânsal etkisini ortaya çıkarmış [26] ve dijitalleşmenin

Bu iki faktör arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır [27]. ② Mezo Seviye

Etki: Mezo düzeyde, birçok akademisyen aşağıdaki unsurların önemli rolünün altını çizmektedir

endüstriyel yapısal düzenlemelerin şekillendirilmesinde dijital teknoloji [28]. Dijital sanayileşme ve endüstriyel dijitalleşmenin işbirliğine dayalı gelişiminde, dijital teknoloji sürekli olarak endüstriyel dönüşüm ve iyileştirmeyi teşvik etmektedir [29]. Bu konuda heterojenliğin mevcut olabileceği dikkat çekmektedir [30]. Örneğin, Fu [31] ve Kan ve diğerleri [32] sırasıyla imalat ve hizmet sektörleri üzerine çalışmalar yapmıştır.

Dijitalleşmenin sermaye yoğun sektörleri teknoloji yoğun sektörlerle kıyasla önemli ölçüde daha fazla etkilediğini ortaya koymaktadır. ③ Makro Düzeyde Etki: Makro düzeyde, dijital ekonomi aşağıdakiler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir

ekonomik kalkınma, öncelikle geleneksel ekonominin ölçeğine yaptığı önemli katkı nedeniyle [33]. Cai ve Niu'ya [34] göre, Çin'deki dijital ekonominin katma değeri 1993-2018 yılları arasında yıllık ortalama %17,72'lik bir büyümeye tanık olmuş ve Çin'in ekonomik kalkınmasının temel taşlarından biri haline gelmiştir. Zhang ve diğerleri [35], dijitalleşmenin olumlu ekonomik büyüme etkisinin, endüstriyel yapı yükseltmelerini destekleyerek, toplam istihdamı artırarak ve istihdam yapılarını yeniden şekillendirerek gerçekleştirdiğini göstermiştir.

2.2. Dijitalleşme ve karbon emisyonu üzerine araştırma

Akademik alanda, karbon emisyonlarını etkileyen faktörlere ilişkin tartışmalar kapsamlı olup, genellikle finansal kalkınma [36], ticaret faaliyetleri [37], yabancı yatırım [38], enerji rantı [39] ve enerji yapısı [40] gibi enerji ile ilgili hususların yanı sıra patent desteği [41] ve yeşil inovasyon [42] gibi teknolojik inovasyon hususları da dahil olmak üzere makro-çevresel yönleri kapsamaktadır. Son yıllarda, dijital çağın yaygınlaşmasıyla birlikte, dijitalleşmenin çevresel etkileriyle ilgili artan sayıda araştırma ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalar üç temel perspektife ayrılmıştır: engelleme teorisi, teşvik teorisi ve doğrusal olmayan teori.

① Engelleme Teorisi: Bu bakış açısı dijitalleşmenin Düşük karbonlu inovasyonu teşvik etmek ve kaynak dağılımını optimize etmek

karbon emisyonları üzerinde pozitif ikame etkileri. Bu görüş önde gelen araştırmacılar arasında destek bulmaktadır [43,44]. Ayrıca, mekânsal coğrafyada bu perspektifi doğrulamak için mekânsal ekonometrik modeller de kullanılmıştır [45,46]. Aktarım mekanizması açısından, ilgili çalışmalar öncelikle teknolojik gelişmelerin teşvik edilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması alanlarında nitel tartışmalar ve nicel incelemeler yapmıştır.

yenilik [47], endüstriyel yapıların optimize edilmesi [48] ve kaynak tahsis verimliliğinin artırılması [49]. ② Teşvik Teorisi: Bu bakış açısı, dijitalleşmenin karbon emisyonunu önleyebileceğini savunmaktadır azaltılması için üç temel açıklama sunmaktadır. İlk olarak, dijitalleşme genellikle yaşam döngüleri boyunca daha yüksek enerji talebine sahip olan ve dolayısıyla karbon emisyonlarını artıran çok sayıda elektronik cihaz ve aksesuara dayanmaktadır [50]. İkinci olarak, dijitalleşmenin "maliyet etkisi", BİT'lerin yaygın kullanımının marjinal maliyetlerin azalmasına yol açtığını, ürün ve hizmetlerin maliyetini yükseltirken bilgi maliyetini düşürdüğünü, böylece fonları karbon azaltma çabalarından uzaklaştırdığını ve karbon emisyonlarını hızlandırdığını öne sürmektedir [51]. Üçüncü olarak, dijitalleşmenin "enerji geri tepme etkisi", enerjinin

verimlilik ve üretkenlik iyileştirmeleri sanayiye teşvik eder

sektörün üretimi artırması ve daha fazla enerji tüketmesi, sonuçta daha fazla kirliliğe yol açması. ③ Doğrusal Olmayan Teori: Bu bakış açısına göre, dijitalleşme ve karbon emisyonu arasındaki ilişki

siyonlar sabit değildir. Özellikle, dijital dönüşümün ikinci dereceden terimi eklendiğinde, belirgin bir parabolik model sergilemektedir [52, 53]. Li ve Wang [54] mekânsal faktörleri de dâhil ettikten sonra iki değişken arasındaki ters "U" şeklindeki ilişkiyi teyit ederken Cheng ve diğerleri [55] aksi yönde bir sonuca ulaşmıştır. Dahası, bazı araştırmacılar panel eşik modelleri oluşturarak ikisi arasında daha karmaşık bir bağlantı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Örneğin, dijitalleşme eşik değişkeni olarak kullanıldığında, Hao ve diğerleri [56] dijitalleşmenin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin ters "N-tipi" bir şekil aldığını tespit etmiştir. Tersine, eşik değişkeni enerji verimliliği olduğunda, Zhang ve diğerleri [57] "N-tipi" bir ilişki tespit etmiştir.

2.3. Enerji dijitalleşmesi üzerine araştırma

Enerji dijitalleşmesine ilişkin kapsamlı ve yetkili bir analiz henüz akademi dünyasında netlik kazanmamıştır. Akademisyenler konuyu enerji işletmeleri ve enerji sistemlerinde örgütsel dijitalleşme, yönetim dijitalleşmesi, süreç dijitalleşmesi ve ürün dijitalleşmesi dahil olmak üzere çeşitli perspektiflerden incelemiştir. Semeraro ve arkadaşları [58] enerji depolamadaki mevcut dijitalleşme durumunu değerlendirmek için bir literatür araştırması yöntemi kullanmış ve uygulama ortamı, yaşam döngüsü aşaması, dijital ikiz işlevselliği ve dijital ikiz mimarisi gibi hususları değerlendirmiştir. Polyanska ve diğerleri [59] Ukraynalı enerji şirketlerinin dijitalleşme olgunluğunu ölçmek için bulanık küme teorisine dayanan ve strateji, insan kaynakları, kurum kültürü, teknoloji, yapı ve pazarlama gibi boyutları kapsayan bir model geliştirerek enerjide dijitalleşmenin temellerini atmıştır. Nicel olarak, Park ve diğerleri [60] ED'nin yörüngesini araştırmak için sinyal modeli ile birlikte gayri resmi bir akademik metin analizi kullanmıştır. Wang ve arkadaşları [61] enerji dijitalleşmesi için dört boyutu kapsayan bir değerlendirme endeksi çerçevesi oluşturmuştur: entegrasyon temeli, entegrasyon koşulları, entegrasyon uygulamaları ve entegrasyon performansı. Elde ettikleri bulgular, Çin'in enerji dijitalleşme seviyesinin, kayda değer bölgesel farklılıklar olsa da, giderek arttığını ortaya koymuştur. Teorik araştırmalar, enerji dijitalleşmesinin enerji verimliliğini artırmada [11], teknolojik yeniliği teşvik etmede [62] ve kurumsal dayanıklılığı güçlendirmede [9] oynadığı önemli rolün altını çizmektedir. Özellikle, ekonomik varlıkları Çevresel Kuznets Eğrisi'ni (EKC) aşmaya iten yeni bir katalizör olarak ortaya çıkmaya hazırlanmaktadır [63,64].

Mevcut çalışmalar umut verici bilgiler sunmakla birlikte, bazı kayda değer eksiklikler bulunmaktadır. İlk olarak, çoğu araştırmacı, Çin'in ekonomik büyümesi ve karbon emisyonlarının tamamen ayrışmadığını göz önünde bulundurmadan, öncelikle dijitalleşmenin ekonomik kalkınma ve karbon emisyonları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu sınırlama, dijitalleşme ile düşük karbonlu bir ekonomi geliştirme arasındaki karmaşık ilişkinin yeterince araştırılmamasına neden olmaktadır. İkinci olarak, enerji endüstrisinin Çin'in ulusal ekonomisindeki merkezi rolüne ve karbon emisyonlarına önemli katkısına rağmen, mevcut araştırmalar ağırlıklı olarak imalat sektörünün dijitalleşmesine odaklanmakta ve enerji dijitalleşmesinin kendine özgü nüanslarını göz ardı etmektedir. Üçüncü olarak, dijitalleşmenin etkilerinin daha fazla araştırılması için geniş bir alan bulunmaktadır. Özellikle, etki mekanizmalarının incelenmesi biraz katı olma eğilimindedir ve heterojenlik analizleri genellikle dış çevre ayarlamalarını tam olarak kapsayamaz ve mekansal etkiler genellikle kantsal faktör ayrıştırmasından yoksundur. Son olarak, ED derecesinin hesaplanmasında yeniden düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Halihazırda, dijitalleşme ölçümü ağırlıklı olarak bölgesel bir perspektif benimsemekte ve bu da belirli sektörlerin dijitalleşmesine ilişkin kesin ölçümlerin eksikliğine yol açmaktadır.

Bu makale, yenilikçi yaklaşımlar benimseyerek yukarıda bahsedilen araştırmalardaki boşlukları doldurmayı amaçlamaktadır. Enerji tüketiminin boyutunu değerlendirmek için metin madenciliği teknolojilerinden kelime sıklığı istatistikleri ile yararlanıyoruz.

dijitalleşme. Eş zamanlı olarak, enerji dijitalleşmesinin CP üzerindeki çok yönlü etkilerini araştırmak için hedeflenen ekonometrik modelleri kullanıyoruz. Bu modeller arasında aracı etki modeli, eşik regresyon modeli ve SDM yer almaktadır.

3. Teorik analiz ve araştırma hipotezleri

3.1. ED'nin CP üzerindeki doğrudan etkisi

Enerji Dijitalleşmesinin enerji sektöründe sistematik bir devrimi temsil ettiği ve dijital teknoloji ile enerji endüstrisinin derin entegrasyonu yoluyla yüksek kaliteli enerji gelişiminin ilerlemesini kolaylaştırdığı konusunda fikir birliği vardır. İlgili araştırmalar ışığında, ED'nin temel özüne ilişkin bir analiz gerçekleştiriyoruz. ED'nin özünün bilgi teknolojisi, operasyonel teknoloji ve elektrik teknolojisinin yenilikçi entegrasyonunda yattığını iddia ediyoruz. Bu süreç boyunca, bilgi, enerji ve kaynakların düzenli akışını düzenleyerek, veri ve enerji ile iç içe geçmiş bir üretim faktörü yapısıyla sonuçlanır. Buna paralel olarak ED, geleneksel üretim süreçlerini, yönetim metodolojilerini ve iş modellerini veri merkezli unsurlarla güçlendirerek yeni ağ bağlantılı üretim yöntemlerinin ve platform odaklı endüstriyel organizasyon biçimlerinin ortaya çıkmasını sağlar. Böylece enerji işletmelerinde değer yaratılması ve aktarılmasını yöneten düğümleri ve mantığı yeniden yapılandırır. Nihayetinde bu dönüşüm, tüm enerji endüstrisi zincirinde üretim, işletme ve bakım verimliliğini optimize etmektedir. Bu temel üzerine inşa edilen bu makale, ED'nin üç önemli perspektiften CP'yi doğrudan etkileyebileceğini ileri sürmektedir: faktör yapısı, endüstriyel organizasyon ve teknolojik ilerleme.

Faktör yapısı merceğinden bakıldığında, dijitalleşme bir katalizör görevi görmektedir. Geleneksel faktör yapılarının dönüştürücü bir şekilde yeniden yapılandırılması, enerji endüstrisinin üretim yöntemlerinde köklü değişikliklere yol açmış ve Yeşil Toplam Faktör Verimliliğini yükseltmiştir. Rekabetçi ve münhasır olmayan doğası ile karakterize edilen veri faktörü, dijital ekonomi ortamında bir üretim faktörü olarak inkar edilemez bir şekilde önemli bir rol üstlenmiştir. Bu gelişme, ölçüğe göre artan getiri koşullarını güçlendirmekte ve geleneksel ekonomik büyüme teorisinin ufku genişletmektedir [65]. Dijital teknolojinin doğasında bulunan geçirgenlik, ikame edilebilirlik ve sinerji ile kolaylaştırılan veri unsurları, enerji bileşenleri üzerinde üst üste binme, bir araya gelme ve çarpan etkileri de dahil olmak üzere birden fazla etki yaratabilir. Sonuç olarak, Enerji Dijitalleşmesi geleneksel faktörlerin bileşimini yeniden yapılandırır ve kaynak tahsisini optimize eder, böylece yeni ekonomik, sosyal ve çevresel değerlerin yaratılmasını kolaylaştırır. Dahası, dijitalleşme üretim zincirini yenilemekte ve bu da üretim süreci boyunca operasyonel verimlilikteki önemli artışlarda kendini göstermektedir. Bu, kaynak çıkarma, üretim kararı verme, ekipman operasyonu, ürün işleme ve elektrik taşımacılığını kapsar, sonuç olarak doğal kaynaklara dayanan geleneksel üretim modlarına olan bağımlılığı azaltır ve çevre kirliliğini azaltır [66].

Endüstriyel organizasyon perspektifinden bakıldığında, dijitalleşme endüstriyel sınırları ortadan kaldırma ve geleneksel endüstriyel organizasyon yapılarını yeniden yapılandırma potansiyeline sahiptir ve böylece CP'yi hızlandırır. Xiao ve Qi'nin [67] görüşlerine dayanarak, dijitalleşme endüstriyel değer zincirindeki çeşitli varlıklar arasındaki "bilgi adalarını" ortadan kaldırabilir. Bu, işlem maliyetlerini önemli ölçüde azaltır, endüstriyel sınırları zayıflatır ve endüstriyel organizasyonun yapısını derinleştirerek uyum ile karakterize edilen birbirine bağlı bir ekolojik topluluğu besler. Dijitalleşme, enerji endüstrisinin tüm yönlerini kapsayan merkezi olmayan, ağa bağlı bir endüstriyel ekosistemin ortaya çıkmasını sağlar ve böylece mekansal ve zamansal sınırlamaları ortadan kaldırır. Bu artış, alt bölümlere ayrılmış endüstrilerin sinerjik etkisini güçlendirir, enerji sistemlerinin operasyonel verimliliğini yükseltir ve ilerici, modern ve düşük karbonlu enerji endüstrisi gelişiminin önünü açar [68].

Teknolojik ilerleme açısından bakıldığında, dijitalleşme

hem ekonominin hem de toplumun dijitalleşmeye, entelektüelleşmeye ve en son dijital teknolojiler tarafından kolaylaştırılan düşük karbonlu hale geçişinin temelini oluşturmaktadır. Bir yandan dijital, operasyonel ve elektrik teknolojilerinin yakınsaması, kapsamlı akıllı enerji hizmetleri ve sanal enerji santralleri gibi yeni enerji geliştirme modellerini ve iş paradigmalarını ortaya çıkarmaktadır. Watt akışı ve bit akışının birleşmesi, geleneksel doğrusal üretim zinciri modelinden ağa bağlı işbirlikçi paralel moda geçişi teşvik etmektedir [69]. Bu geçiş, kaynak tahsisini optimize etmek ve CP'yi geliştirmek için enerji sektörünü güçlendirmektedir. Öte yandan, dijital teknolojiler üretim, iletim, dağıtım, depolama ve kullanımı kapsayan enerji üretim döngüsüyle karmaşık bir şekilde iç içe geçmiştir. Karbon ayak izi izleme, karbon veri analizi ve karbon-nötr çıkarımlar gibi mekanizmalar sayesinde dijitalleşme, üretim, tüketim ve son kullanıcı yönetişiminin yeşil dönüşümünü desteklemek için önemli avantajlar sunmaktadır [70]. Bu da ekonomik çıktıdan ödün vermeden karbon emisyonlarını azaltmaktadır. Sonuç olarak, bu makale **Hipotez 1'i** ortaya koymaktadır.

Hipotez 1. ED, CP'yi doğrudan teşvik edebilir.

3.2. ED'nin CP üzerindeki dolaylı etkisi

Enerji içsel ekonomik büyüme modeline dahil edildiğinde, nihai üretim sektörü için Cobb-Douglas üretim fonksiyonu $Y = A - K^a - L^b - E^c$ şeklinde ifade edilebilir. Burada, A teknolojik progress, K, L ve E sermaye, işgücü ve enerjiyi ifade eder ve a, b ve c sırasıyla her bir faktörün payını göstermektedir. Bu arada, emisyon karbondioksit C, karbon emisyon katsayısı τ ile fosil enerji tüketimi E'nin çarpımı olarak tanımlanabilir: $C = \tau - E_f$ [71]. Uyum-LMDI modeline göre CP üç parçaya ayrılır: $Y = Y^E \times E^f \times E^C$ $eff \times estru \times etech$. Burada^V karbon verimliliğini, eff enerji kullanımı verimliliğini, $estru$ enerji yapısını, $E^f = \tau^{-1}$ enerji teknolojisi ilerlemesini ($etech$) ifade etmektedir. Yukarıdakilere dayanarak ayrıştırma, bu makale ED'nin etki mekanizmalarını analiz edecektir. enerji teknolojisi, enerji yapısı ve enerji kullanımı verimliliği yoluyla CP'yi etkilemektedir.

3.2.1. Enerji teknolojisi inovasyonunun aracı rolü

Li ve diğerleri [72], enerji teknolojisi inovasyonunun yeni enerji kaynakları geliştirmeyi amaçlarken aynı zamanda fosil enerjinin korunmasını ve saflaştırılmasını da teşvik ettiğini belirtmiştir. Çok sayıda çalışma, enerji teknolojisi inovasyonunun kirliliğin azaltılması ve CP'nin geliştirilmesindeki rolünün altını çizmiştir [73,74]. Bu çalışmada, platform ekosistemi içinde dijitalleşmenin benzersiz avantajlarının enerji teknolojisi inovasyonu için elverişli bir ekolojik ortamı teşvik edebileceğini iddia ediyoruz. Sağlam bir inovasyon odaklı işlevle donatılan dijitalleşme, enerji teknolojisi inovasyonunun kalibresini sürekli olarak yükselterek CP'yi hızlandırır. Öncelikle, bilgi toplama, eşleştirme ve analizde dijitalleşmenin avantajları, bilgi ve bilgi gibi maddi olmayan kaynak unsurlarının yayılmasındaki zamansal ve mekansal sınırlamaları aşabilir. Bilgi izleme maliyetlerinin azaltılması ve bilgi asimetrisinin hafifletilmesi, enerji teknolojisi inovasyonu için temel ön koşulları sağlamaktadır [75]. İkinci olarak, dijitalleşme enerji girişimleri için rekabetçi piyasa dinamiklerini güçlendirmektedir. Sinyal teorisinden hareketle, zorlayıcı dış ortam "yeşil ve akıllı enerji" için çabalayan enerji firmaları arasındaki rekabeti teşvik etmektedir. Bu rekabet, enerji teknolojisi inovasyonunun çıktısı için bir uyarıcı görevi görür [44] ve yeşil teknolojinin benimsenmesini teşvik eder, böylece CP'yi bir dereceye kadar yönlendirir. Son olarak, dijitalleşmenin doğasında bulunan ağ platformu özellikleri, enerji endüstrisi, araştırma kurumları ve üniversiteler arasında bir inovasyon işbirliği ağının kurulmasını kolaylaştırmakta ve üretim, tüketim ve devlet sektörlerini kapsayan bir inovasyon ekosistemi geliştirmektedir. İnovasyon çıktısı ve uygulaması arasındaki bu bağlantı, inovasyonun

enerji teknolojisi inovasyonunun sürdürülebilirliği ve uygunluğu.

3.2.2. Enerji yapısının aracı rolü

Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu olmaları ve düşük karbon ayak izleri ile tanınmaktadır. Yenilenebilir kaynakların hakim olduğu daha temiz bir enerji yapısına doğru geçiş, fosil yakıtlarla ilişkili olumsuz çevresel dışsallıkları azaltma ve önemli pozitif dışsallıklar yaratma potansiyeline sahiptir. Bu geçiş karbon yoğunluğunu azaltır ve CP'yi teşvik eder [76]. Dijitalleşme ile ilişkili geniş teknolojik ilerlemeler ve yenilikler, yeni enerji endüstrisindeki engellerin ortadan kaldırılmasında çok önemli bir rol oynamakta, böylece daha temiz bir enerji yapısına geçişi hızlandırmakta ve CP'yi geliştirmektedir [77]. Arz tarafında, dijital teknolojinin yeni enerji teknolojileriyle entegre edilmesi, inşaat, işletme ve bakım, enerji üretimi ve enerji depolama dahil olmak üzere yeni enerji sektörünün çeşitli yönlerini optimize etmektedir. Bu optimizasyon, yeni enerji üretiminin sürdürülebilirliğine, istikrarına ve öngörülebilirliğine katkıda bulunmakta [78] ve böylece yeni enerjinin büyümesini teşvik etmektedir. Örneğin, dijital teknolojiler rüzgar ve fotovoltaik enerji gibi dağıtılmış enerji kaynaklarının sanal enerji santrallerinde toplanmasını sağlayarak çoklu enerji tamamlamıcılığı ve esnek dağıtımı kolaylaştırmaktadır. Talep tarafında, dijital teknolojinin Yeni Enerji Araçlarına (NEV'ler) entegre edilmesi akıllı sürüş, ağ oluşturma ve paylaşım gibi çok sayıda işlevin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu işlevler kullanıcı rahatlığını, verimliliği ve güvenliği artırarak tüketici talebinin artmasına ve yeni enerji kaynaklarının uygulama ölçeğinin genişlemesine neden olmaktadır. Arz ve talebin uyumlaştırılmasıyla ilgili olarak, yapay zeka teknolojisi ve algoritmik modellerin birleşimi, enerji arzının üretimden talebe verimli bir şekilde yönetilmesini ve hassas bir şekilde eşleştirilmesini sağlar. Bu, yenilenebilir enerjiyle ilişkili tüketim ve depolama zorluklarını ele alır ve böylece geleneksel enerji üretiminden yeni enerji üretimine geçişi hızlandırır [79].

3.2.3. Enerji kullanım verimliliğinin aracı rolü

Enerji kullanım verimliliği, maksimum ekonomik fayda ve minimum enerji tüketimi ile CP elde etmek için çok önemlidir [80]. Dijitalleşme, enerji üretiminden elektrik tüketimine kadar tüm spektrumda enerji verimliliğini optimize eden, platformlar tarafından desteklenen ve zeka tarafından yönlendirilen bir enerji ara bağlantı paradigmasına yol açmaktadır. Bir yandan, Enerji Dijitalleşmesi elektrik teknolojisini dijital teknolojiyle birleştirerek terawatt düzeyinde enerji yönetiminde yeni bir çağ başlatıyor. Bu atılım, "enerji üretimi - iletimi - dağıtımı - depolanması - kullanımı" sürecindeki her bir düğüm arasındaki boşluğu doldurarak tüm enerji zincirinin dijitalleşmesini ve entelektüelleşmesini sağlıyor. Sonuç olarak, bu durum enerji üretimi, işletimi, bakımı ve kullanımının verimliliğini artırmaktadır.

Öte yandan ED, arz odaklı büyük ölçekli üretimden kullanıcı odaklı özelleştirilmiş üretime geçiş yapar. Bu geçiş, arz-talep eşleşmesinin verimliliğini önemli ölçüde artırarak enerji tasarrufu etkilerine [81] ve enerji kullanım verimliliğinde kayda değer bir iyileşmeye yol açar. Bu değerlendirmeler ışığında, aşağıdaki varsayımı ortaya koyuyoruz.

3.3. ED'nin CP üzerindeki eşik etkisi

Metcalf Yasası, Enerji Dijitalleşmesi ile bölgesel CP arasında doğrusal olmayan potansiyel bir ilişki olduğunu öne sürmektedir [82]. Esasen, dijitalleşmenin etkisi, özellikle Çin'in kalkınmadaki belirgin bölgesel farklılıkları göz önüne alındığında, iller arasında farklılıklar gösterebilir. Bu perspektifi göz önünde bulundurarak, piyasa, hükümet ve dijital altyapı tarafından oynanan düzenleyici rolleri de kapsayacak şekilde dijitalleşmeyi şekillendiren dış faktörleri kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlıyoruz.

3.3.1. Piyasa uyumunun düzenleyici rolü

Piyasalaştırma önemli bir dış kurumsal faktör olarak kabul edilmektedir

Enerji Dijitalleşmesinin düşük karbon ekonomisi etkisi için bir "katalizör" görevi görmektedir [83]. Bu etki çok yönlüdür. İlk olarak, daha olgun bir faktör piyasası, veri faktörlerinin geleneksel faktörlerle sorunsuz entegrasyonunu, sinerjisini ve evrimini kolaylaştırır. Bu, verilerden yararlanma sürecini hızlandırır ve veri faktörlerinin temettüllerinin kilidini açar [65]. Sonuç olarak, enerji sektörü dijital ekonomi ile iç içe geçerek ED'nin düşük karbon ekonomisi etkisini güçlendirmektedir. İkinci olarak, ürün pazarlamasına yapılan yüksek vurgu, genellikle daha rekabetçi bir dış iş ortamıyla bir arada bulunur. Bu rekabetçi baskı, işletmeleri yalnızca teknolojik yeniliklere katılmaya zorlamakla kalmamakta, aynı zamanda kâr güdüsüyle kaynakların verimli bir şekilde tahsis edilmesini de teşvik etmektedir. Sonuç olarak, dijitalleşme süreci hızlanmakta ve yeşil verimliliği artırmaktadır. Ancak, daha az piyasa temelli sistemlere sahip ekonomilerde piyasa mekanizmalarının yetersiz kalabileceğini de kabul etmek gerekir. Devlet düzenlemeleri ve piyasa düzenlemeleri arasındaki bu dengesizlik, üretim malzemelerinin akışını engelleyebilir, dijital teknolojilerin benimsenmesini engelleyebilir ve piyasa rekabetini bozabilir [84]. Sonuç olarak, bu sınırlama ED'nin CP üzerindeki faydalı etkisini azaltabilir.

3.3.2. Çevresel düzenlemenin düzenleyici rolü

Zayıf Porter hipotezi kavramı, ılımlı çevresel düzenlemelerin inovasyon devrimlerini teşvik edebileceğini öne sürmektedir. Bölgesel çevresel düzenlemenin uygun bir denge kurduğu durumlarda, "inovasyon telafi etkisi" olarak bilinen bir etki ortaya çıkabilir [85]. Bu etki, düşük karbonlu ve dijital teknolojilerde inovasyonu teşvik ederek enerji endüstrisinde dijitalleşmeyi ve düşük karbonlu dönüşümü desteklemekte ve sonuç olarak CP'yi olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, aşırı katı çevresel düzenlemeler "inovasyon ekstrezyon etkisi" olarak adlandırılan duruma yol açabilir [86]. Bu tür düzenlemeler kirlenici emisyonların maliyetini artırarak dijitalleşme üzerindeki mali kısıtlamaları sıkılaştırmaktadır. Bu engel, enerji sektöründe dijital teknolojilerin benimsenmesini ve yaygınlaştırılmasını engelleyerek Enerji Dijitalleşmesinin CP'yi geliştirme potansiyelini sınırlamaktadır.

3.3.3. Dijital altyapının düzenleyici rolü

Dijital altyapı, dijitalleşme için verimli bir "toprağa" benzetilebilir [11]. En son Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin (ICT) geleneksel altyapı ile yakınsamasını temsil ederek işletmeler ve devlet operasyonları için çeşitli dijital platformların ortaya çıkmasını sağlar. Bu sentez, geleneksel altyapının kamu hizmeti niteliklerini dijitalleşme, istihbarat ve ağ oluşturma veri odaklı nitelikleriyle birleştirir. 5G ağları, bulut bilişim platformları ve yapay zeka gibi teknolojiler de dahil olmak üzere gelişmiş dijital altyapıya sahip bölgeler, sağlam bir dizi akıllı araç ve teknolojik kaynağa sahiptir. Bu durum, bu bölgelerdeki bilgi ve kaynakların verimli bir şekilde akışını teşvik ederek dijital teknolojinin enerji sektörüne derinlemesine nüfuz etmesini sağlar. Sonuç olarak, ED bu bölgelerde CP üzerinde daha belirgin bir etki yaratmaktadır. Buna karşılık, yeterli dijital altyapıdan yoksun bölgeler dijitalleşme için elverişli bir teknik ortam sağlayamaz [87]. Bu sınırlama, ED'nin bu bölgelerdeki CP üzerindeki etkisini azaltmaktadır.

3.3.4. Kaynak bağımlılığının düzenleyici rolü

Kaynak laneti hipotezine uygun olarak, yüksek kaynak bağımlılığına sahip bölgeler, yüksek enerji tüketimi ve kirlilik ile karakterize edilen kaynak sömürüsü ve üretim endüstrileri tarafından domine edilme eğilimindedir [88]. Zaman içinde bu bölgeler genellikle katı ve geniş kapsamlı bir ekonomik model geliştirerek gelişmiş bir CP'ye geçişi zorlaştırır. Dahası, kaynak temelli bölgelerde doğal kaynakların kalıcılığı, teknoloji ve insan sermayesi gibi üst düzey faktörleri dışarıda bırakarak [89] bölgesel yıkıcı inovasyon ve dijital dönüşüm çabalarını engelleyebilir ve böylece dijital dönüşümün karbon azaltma etkisini göstermeyi zorlaştırabilir. Tersine, kaynak bağımlılığı düşük olan bölgeler, kaynak donanımlarıyla ilgili daha önemli kısıtlamalar yaşamaktadır.

ekonomik kalkınma modelleri. Bu, faktörlerin akışında ve endüstriyel yapıdaki değişikliklerde daha fazla esneklik anlamına gelmekte ve sonuçta dijital dönüşümün CP üzerinde daha olumlu bir etki yaratmasını kolaylaştırmaktadır. Sonuç olarak, **Hipotez 3'ü** öneriyoruz.

Hipotez 3. ED'nin CP üzerindeki etkisi piyasa, hükümet, dijital altyapı ve kaynak bağımlılığı tarafından düzenlenmektedir. Pozitif etki, daha yüksek piyasalaşma derecesi, ılımlı çevresel düzenleme düzeyi, gelişmiş dijital teknoloji olanakları ve daha zayıf kaynak bağımlılığı altında daha dikkat çekicidir.

3.4. ED'nin CP üzerindeki mekansal etkisi

Dijital teknolojinin paylaşımı ve geçirgenliğinin bir sonucu olarak, teknoloji ve bilgi gibi kritik kaynaklar coğrafi kısıtlamalardan ve sektöre özgü engellerden kurtulmuş, bu da "mobil alan" ve "mobil endüstri"nin üst üste binme etkisine yol açmıştır. Sonuç olarak, ED'nin düşük karbon ekonomisi üzerindeki olumlu etkilerinin tek tek bölgelerin ötesine geçmesi beklenmektedir. Araştırmacılar daha önce dijitalleşmenin hem karbon emisyonları hem de ekonomik sonuçlar üzerindeki mekansal etkilerini ayrı ayrı incelemişlerdir [54,90]. Bu çalışma, ED'nin iki mekanizma aracılığıyla komşu bölgelerdeki CP'ye fayda sağlayabileceğini öne sürmektedir: bölgeler arası düşük karbonlu teknoloji yayılımı ve dijital dönüşümün stratejik koordinasyonu. Bir yandan, Marshall'ın dışsallıklar teorisi ve Romer'in bilgi yayımlı büyüme modelini [91] takiben, teknolojinin dışsallıklara sahip olduğu ve komşu bölgelere yayılabileceği anlaşılmaktadır. Dijital teknoloji aracılığıyla ED, inovasyon faktörlerinin zaman içindeki akışını hızlandırarak coğrafi olarak komşu bölgelerde düşük karbonlu teknoloji inovasyonunu potansiyel olarak güçlendirebilir ve böylece işbirliğine dayalı CP iyileştirmesi için teknik zemin hazırlayabilir.

Öte yandan, bir bölgedeki enerji şirketleri ED uygulamalarını giderek daha fazla benimsedikçe, çevresel ve ekonomik performansla ilgili olumlu geri bildirimlerden esinlenerek komşu bölgelerdeki enerji şirketleri için bir gösteri ve akran etkisi kaynağı olabilirler [92]. Bilginin yayılması, rekabetçi öykünme ve değer in içselleştirilmesinden hareketle, yakın bölgelerdeki enerji işletmelerinin dijital stratejilerini uygulamaları ve nihayetinde dijitalleşmenin düşük karbonlu ekonomik faydalarını vurgulamaları muhtemeldir. Sonuç olarak, son hipotezi ortaya koyuyoruz.

Hipotez 4. ED, dış bölgelerde CP üzerinde faydalı bir etki yaratabilir.

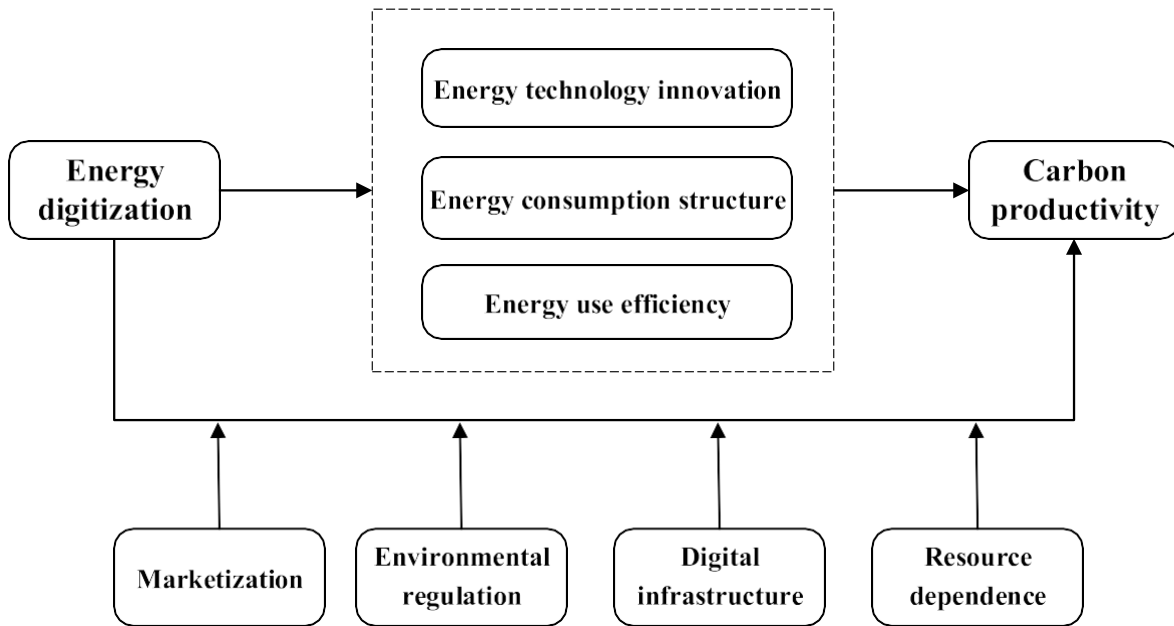
Özetlemek gerekirse, **Şekil 1** teorik modelin şemasını ve **Şekil 2** bu makaledeki teorik çerçevenin şemasını göstermektedir.

4. Metodoloji

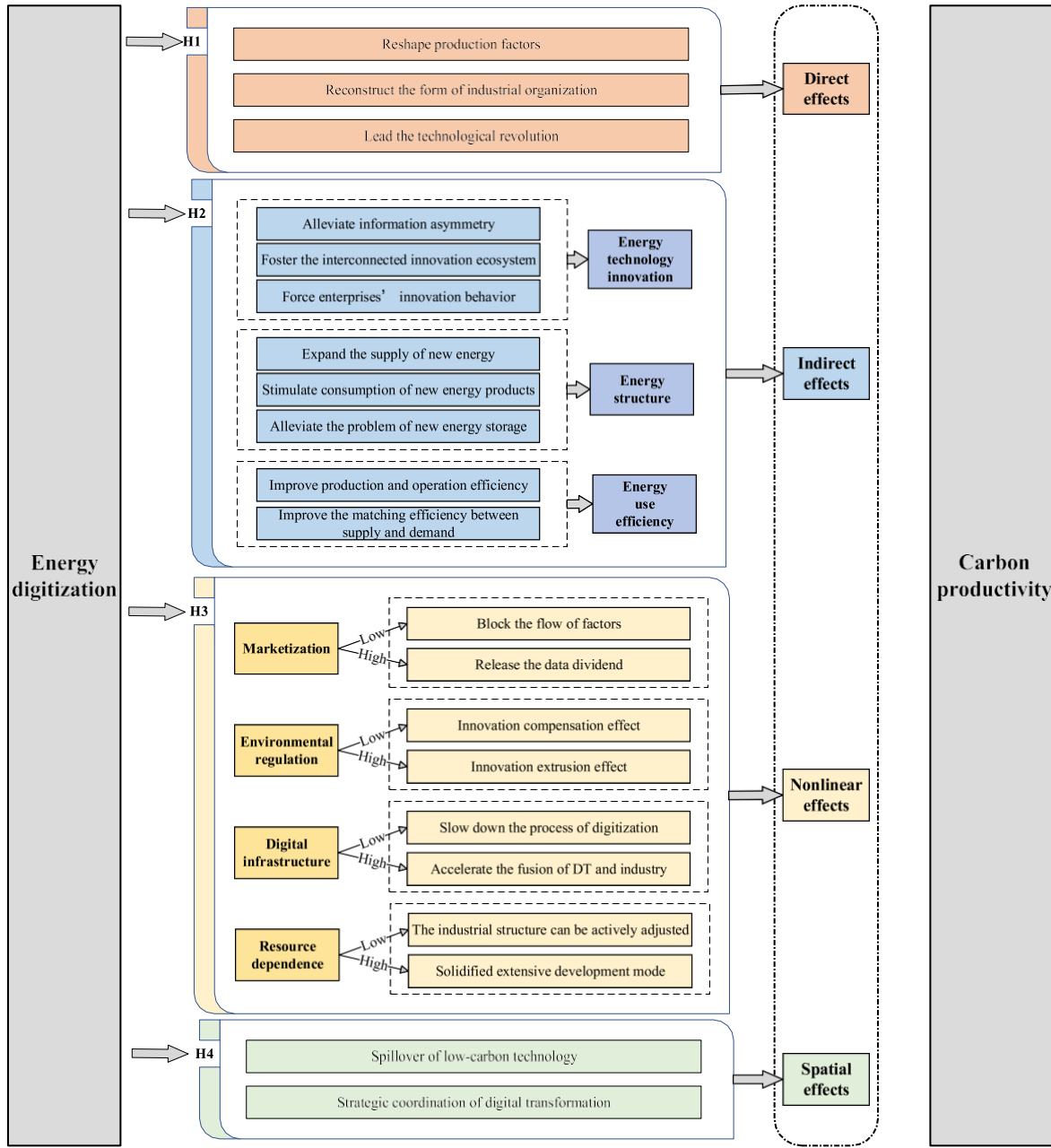
4.1. Model yapımı

Uygun modellerin oluşturulması, daha önce özetlenen dört hipotezin ampirik olarak test edilmesi için çok önemlidir. İlgili literatüre dayanarak, enerjinin dijitalleşmesinin CP üzerindeki çok boyutlu etkisini incelemek için belirli modeller seçtik. Model seçimimizin literatüre dayalı gerekçesi **Tablo 1**'de özetlenmiştir. Dijitalleşme, düşük karbon ekonomisi ve yeşil kalkınma üzerine yapılan araştırmalarda, akademisyenlerin doğrudan etkiler, dolaylı etkiler, doğrusal olmayan etkiler ve mekansal etkiler gibi çeşitli yönleri odaklandığını gözlemliyoruz. Doğrudan etkilerle ilgili olarak, iki yönlü sabit etkiler modelinin uygulanması baskındır ve bazı akademisyenler içsellik endişelerini gidermek için IV-2SLS ve GMM kullanmaktadır. Buna göre, bu makale H1'de önerilen doğrudan etkiyi test etmek için araç değişken yöntemiyle birleştirilmiş bir sabit etki modeli oluşturmaktadır.

Dolaylı etkilerle ilgili olarak, mevcut araştırmalar iki aşamalı veya üç aşamalı regresyon yöntemlerine dayanan aracı etki modellerini kullanmaktadır. Bu aracı değişkenler endüstriyel yapı, teknolojik yenilik ve enerji yoğunluğunu kapsamaktadır. Bu nedenle, H2'de ortaya konan ve matematiksel kanıtlarla desteklenen dolaylı etkiyi titizlikle değerlendirmek için üç aşamalı kademeli regresyona dayalı bir aracı etki modeli benimsiyoruz. Ayrıca, önceki araştırmaların doğrusal olmayan etkileri araştırmak için öncelikle eşik panel modellerini kullandığı açıktır. Bu modeller, belirli bir ekonomik parametre belirli bir eşiğe ulaştığında, başka bir ekonomik parametrenin yapısal bir kırılmaya uğradığı fikrine dayanmaktadır. Bu geçiş için kritik değer eşik değer olarak adlandırılır. Bu nedenle, H3'te varsayılan doğrusal olmayan etkiyi incelemek için bir eşik regresyon modeli kullanıyoruz. H4'te özetlenen mekansal etkileri değerlendirmek için, alandaki çoğu akademisyen tarafından yaygın olarak uygulanan bir mekansal ekonometrik model kuruyoruz. Bu model, coğrafi alan içindeki değişkenlerin esneklik katsayılarını belirlememize olanak tanıyan bir mekansal ağırlık matrisi ve mekansal korelasyon katsayısı sunmaktadır.



Şekil 1. Teorik modelin şeması.



Şekil 2 Teorik çerçevenin şeması.

4.1.1. Benchmark modeli

Bu makale, hipotez 1'i test etmek için enerji dijitalleşmesini CP'nin araştırma çerçevesine entegre etmekte ve havuzlanmış sıradan en küçük kareler (POLS), rastgele etkiler (RE) ve sabit etkiler (FE) kullanarak temel modeller oluşturmaktadır. Denklem aşağıdaki gibidir:

$$cp = \alpha_0 + \alpha_1 enerdig + \alpha_2 fdi_{boyutu} + \alpha_3 şehir + \alpha_4 ins + \alpha_5 trans + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Burada, cp_{it} açıklanan değişken olarak kabul edilir ve t dönemi boyunca i bölgesinin karbon verimliliğini sunar, $enerdig_{it}$ enerji dijitalleşmesinin derecesini ifade eder. Kontrol değişkenleri doğrudan yabancı yatırım fdi_{it} , endüstriyel işletme büyüklüğü ölçeği ins_{it} , şehirleşme düzeyi $şehir_{it}$, endüstriyel yapı ins_{it} ve ulaştırma altyapısı $trans_{it}$ düzeyini kapsamaktadır. Ayrıca, α_0 kesişim terimini, α_n tahmin edilecek parametreyi, λ_i bilinmeyen bireysel etkiyi ifade etmektedir.

ve ε_{it} rastgele hatayı göstermektedir.

4.1.2. Aracılık etkisi modeli

Hipotez 2'yi incelemek için aracılık etkisi modelleri daha da yapılandırılmıştır. Wen ve Ye [99] tarafından özetlenen yaklaşımı takiben, bir karşılaştırma ölçütü olarak üç aşamalı regresyon modeli geliştirilmiştir.

$$aracılık_{it} = \beta_0 + \beta_1 enerdig_{it} + \beta X_{nit} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$cp_{it} = \omega_0 + \omega_1 enerdig_{it} + \omega_2 aracılık_{it} + \omega X_{nit} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

Burada, $aracılık_{it}$ enerji teknolojisi yeniliği ($enerinno$), enerji yapısı optimizasyonu ($enerstru$), enerji kullanım verimliliği ($enereffi$) olarak seçilmiştir; β_0 ve ω_0 kesişim terimleridir; β_1 ve ω_1 tahmin edilecek parametreleri göstermektedir; β_n ve ω_n tahmin edilecek parametre vektörlerini ifade etmektedir. X_{it} Formül (1)'deki bir dizi kontrol değişkeninin oluşturduğu bir değişken grubunu içerir. Diğer parametreler yukarıdaki ile aynıdır.

Tablo 1

Model oluşturma için literatür temeli.

Konu	Efekt Türü	Örnek	Model	Değişkenler
Dijitalleşme ve karbon emisyonları [52]	Doğrudan etki Dolaylı etki	Çin'deki 30 eyalet 2006'dan 2019	Sabit etki modeli + IV-2SLS Aracı etki modeli	Ara değişken : Enerji yapısı, Endüstri yapısı, teknoloji inovasyonu
Dijital ekonomi ve karbon emisyonu [54]	Dolaylı etki Mekânsal etki	274 valilik düzeyi ve üzeri şehir 2011'den 2018'e kadar Çin'de	Mekânsal Durbin modeli Aracı etki modeli	Ara değişken : Enerji kullanımı, yeşil teknoloji ilerlemesi, endüstriyel yapısal yükseltme
Dijital ekonomi ve karbon emisyonu [93]	Doğrudan etki Dolaylı etki	2008'den 2019'a kadar 60 ülke	Çift sabit etkiler model + GMM Aracılık eden etkiler model	Ara değişken : Ekonomik büyüme, endüstriyel yapı, finansal GELİŞİM
Dijitalleşme ve toplam faktör karbon performans [94]	Doğrudan etki Dolaylı etki	274 valilik düzeyi ve üzeri şehir 2003'ten 2019'a kadar Çin'de	Çift sabit etkiler model Tek adımlı regresyon	Ara değişken : Endüstriyel yapı, yeşil teknolojik inovasyon, enerji verimliliği
Dijitalleşme ve karbon emisyonları [95]	Doğrudan etki	1996'dan 2019'a 55 ülke	Sabit etkiler modeli + OLS	-
dijital finans ve yeşil kalkınma [96]	Doğrudan etki Dolaylı etki Eşik etki	Çin'de 238 vilayet düzeyinde şehir 2012'den 2021'e kadar	Sabit etki modeli Aracılık etkisi modeli Eşik regresyonu model	Ara değişken : yeşil teknoloji YENİLİK Eşik değişkeni : dijital finans
Dijitalleşme ve yeşil kalkınma [47]	Doğrudan etki Dolaylı etki Mekânsal etki Eşik etki	2011'den 2019'a Çin'de 278 şehir	Sabit etki modeli Aracı etki modeli Mekânsal Durbin modeli Eşik panel modeli	Ara değişken : ekonomik açıklık, endüstriyel yapı, pazar potansiyeli Eşik değişkeni : ekonomik açıklık, endüstriyel yapı, pazar potansiyeli
Dijital ekonomi ve sürdürülebilir gelişim [97]	Doğrudan etki Dolaylı etki Eşik etki	2011'den 2019'a Çin'de 286 şehir	Sabit etki modeli + IV-2SLS Aracı etki modeli Eşik panel modeli	Ara değişken : yeşil teknolojik inovasyon, insan sermayesi Eşik değişkeni : çevresel düzenleme
Dijital dönüşüm ve toplam faktör karbon üretkenliği [62]	Doğrudan etki Eşik etki	2009'dan itibaren Çin'de 30 il 2019	Sabit etki modeli Eşik regresyonu model	Eşik değişkeni: Teknolojik yenilik
Ticari fdi ve CO2 emisyonları [98]	Mekânsal etki Eşik	18 Latin Amerika ülkesinden 1970'den 2019'a	Mekânsal Durbin modeli,	-

4.1.3. Eşik regresif model

Hipotez 3'e kanıt sağlamak için Hansen [100] tarafından önerilen eşik regresyon modelini kuruyoruz. Modelde, piyasalaşma (*market*), çevresel düzenleme (*regulation*), dijital altyapı (*diginfra*) ve kaynak bağımlılığı (*ependence*) heterojen değişkenler olarak alınmıştır. Ekonometrik model aşağıdaki şekilde kurulmuştur:

$$cp_{it} = \theta_0 + \theta_1 enerdig_{it} \times I(eşik_{it} \leq \eta)$$

$$+ \theta_2 enerdig_{it} \times I(eşik_{it} > \eta) + \theta_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

Burada θ_0 kesişim terimini; θ_1 ve θ_2 tahmin edilecek parametreleri; θ_n tahmin edilecek parametre vektörlerini; $eşik_{it}$ bu çalışmada belirlenen eşik değişkenini; η tek eşik değerini ifade etmektedir. $I(-)$ gösterge fonksiyonunu temsil etmektedir. Diğer parametreler yukarıdaki ile aynıdır.

4.1.4. Mekânsal ekonometrik model

Hipotez 4 ile ilgili olarak, SDM'yi tanıtlıyoruz ve formülasyon aşağıdaki gibidir [101]:

$$cp_{it} = \gamma_0 + \rho W \times lcd_{it} + \gamma_1 enerdig_{it} + \zeta_1 W \times enerdig_{it} + \gamma X_{nit} + \zeta_n W \times X_{it} + \mu_{it} \quad (5)$$

Burada γ_0 kesişim terimini, ρ mekânsal otoregresif katsayıyı, γ_1 ve ζ_1 tahmin edilecek parametreleri; γ_n ve ζ_n ise tahmin edilecek parametre vektörlerini ifade etmektedir. W mekânsal ağırlık matrisini temsil etmektedir. Ne coğrafi mesafe ne de ekonomik uzaklık tek başına mekânsal birimlerin gerçek bağımlılık ilişkisini tam olarak tasvir edemediğinden, bu makale ekonomik mesafenin mekânsal ağırlık matrisini benimsemektedir.

Yang ve diğerleri [102] ile ilgili coğrafi mesafe. $W \times lcd_{it}$ ve $W \times enerdig_{it}$ Uzamsal metrolojide iki farklı etkileşim etkisi temsil edilir: endojen etkileşim etkisi ve eksojen etkileşim etkisi. Diğer parametreler daha önce açıklandığı gibidir.

4.2. Değişken seçimi

4.2.1. Bağımlı değişken

Karbon üretkenliği (cp). Bazı akademisyenler karbon emisyonunu endeksinin düşük karbonlu kalkınma için bir vekil değişken olarak kullanırken, diğerleri

ölçmek için karmaşık endeks sistemleri oluşturmak. Ancak ilk yaklaşım, mevcut teknolojik düzeyde karbon emisyonları ile ekonomik faydalar arasındaki ayrışmayan ilişkiyi göz ardı etmekte, ikincisi ise endeks seçiminin çeşitliliği ve karmaşıklığı nedeniyle çelişkili sonuçlara yol açabilmektedir. Özüde, düşük karbonlu bir ekonominin geliştirilmesi, CP'nin iyileştirilmesi etrafında dönmektedir [103]. Bu nedenle, bu makale bölgesel CP'yi verimlilik perspektifinden ölçmek için çok boyutlu bir girdi-çıkı endeks sistemi oluşturmayı amaçlamaktadır. Girdi unsurlarının "gevşekliliğini" veya "kalabalıklaşmasını" ele almak için bu makale, çevre kirliliğiyle ilgili beklenmedik çıktıları ölçebilen Super-SBM-DDF modelini kullanmaktadır. MAX DEA Pro yazılımını kullanarak, ölçeğe göre sabit getiri varsayımıyla çıktı odaklı bir Malmquist-Luenberger verimlilik endeksi oluşturuyoruz. Aşağıdaki girdi ve çıktı göstergeleri, Tablo 2'de gösterildiği gibi Han ve diğerlerinin [62] uygulamaları temel alınarak seçilmiştir.

4.2.2. Anahtar bağımsız değişken

Enerji dijitalleşmesi (*enerdig*). Bazıları bu çalışmanın önemli yönleridir. Çeşitli akademisyenler, endüstrilerdeki ve bölgelerdeki dijitalleşme seviyelerini ölçmek için farklı yaklaşımlar benimsemiştir. Bazıları dijitalleşme girdisini, uygulamasını ve dijitalleşmeyi dikkate alan çok boyutlu endeksler oluşturmuştur.

Tablo 2

Giriş ve çıkış göstergeleri.

Değişken	Gösterge	Hesaplama
Giriş	İnsan sermayesi	İstihdam miktarı
	Fiziksel sermaye	Sabit varlık yatırımı
	Enerji girdisi	Toplam enerji tüketimi
İstenen çıktı	Ekonomik fayda	Reel GSYİH
İstenmeyen çıktı	Karbondioksit emisyonu	CEAD'ler

değerleri ise internet gelişimi ve dijital teknoloji göstergelerine dayalı olarak bölgesel dijitalleşmeyi ölçmeye odaklanmıştır. Ayrıca bazı araştırmacılar, mikro düzeydeki kuruluşlar arasındaki dijital dönüşüm seviyesini tahmin etmek için kurumsal yıllık raporların metin analizini kullanmıştır. Ancak bu ölçüm yöntemlerinin kendi sınırlamaları vardır. İlk olarak, dijital teknolojinin güçlü geçirgenliği, belirli bir sektördeki dijitalleşme derecesinin doğru bir şekilde değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. İkinci olarak, dijitalleşme seviyesi sadece dijital teknolojilerin geliştirilmesinin ötesine uzanmaktadır [104]. Ayrıca, metin kelime sıklığı analizine dayanan yöntemler, yalnızca işletmelerin dijital dönüşüm çabalarındaki niyet ve eylemlerini temsil edebilir ve bir endüstrinin genel dijital ölçeğini yakalayamaz.

Enerji dijitalleşmesinin, enerji endüstrisinin dijitalleşmesinin veya bir bölgede dijital teknolojinin yaygın kullanımının ötesine geçtiğine inanıyoruz. Enerji sektöründe dijitalleşmenin ve dijital sanayileşmenin eşgüdümlü olarak geliştirilmesi yoluyla yeşil ve verimli bir enerji sistemi yaratmayı içerir. Bu hedefe ulaşmak için sektörden önemli miktarda dijital yatırım desteği ve işletmelerden proaktif dijital strateji rehberliği alınması gerekmektedir. Bu anlayıştan hareketle, Enerji Sektörü Dijital Dönüşüm Endeksini (ED) aşağıdaki şekilde oluşturmak için "dijital sektör yatırım desteği - dijital dönüşüm stratejik rehberliği" yaklaşımını benimsiyoruz:

$$enerdig_{it} = diginput_{it} \times digstrategy_{it} \quad (6)$$

Burada $diginput_{it}$ enerji endüstrisindeki dijital girdiyi ifade eder ve il 42 Departman girdi-çıkıtı tablolarında gösterildiği gibi enerji endüstrisindeki dijital girdinin görelî tüketim katsayısı ile temsil edilir [105]. Doğrudan tüketim katsayısı ile karşılaştırıldığında, görelî tüketim katsayısı hedef ara girdinin belirli bir sektörün üretim sürecindeki önemini daha iyi yansıtmaktadır. Hesaplama formülü aşağıdadır.

$$a_{jk} = \frac{x_{jk}}{x_j} \quad (7)$$

$$a_{jd} = \frac{x_{jd}}{x_j}, d \in k \quad (8)$$

$$b_{jd} = \frac{a_{jd}}{\sum_{k=1} a_{jk}} \quad (9)$$

Burada a_{jk} enerji endüstrisi j 'nin ara sektör k 'ya doğrudan tüketim katsayısını, x_{jk} enerji endüstrisinin üretim sürecinde ara sektör k 'nın gerçek tüketimini ve x_j enerji endüstrisinin toplam çıktısını göstermektedir. "Dijital Ekonomi ve Temel Endüstrilerinin İstatistiki Sınıflandırması (2022) "na göre, dijital endüstriler elektrikli makine ve ekipmanlar, iletişim ekipmanları, bilgisayarlar ve diğer elektronik ekipmanların yanı sıra bilgi iletimi, yazılım ve bilgi teknolojisi hizmetlerini içermektedir. Hedef değer olarak bir_{jd} 'un tüm sektörlerin doğrudan tüketim katsayılarının toplamına oranı elde edilir.

Ayrıca, (6) numaralı formülde yer alan $digstrategy_{it}$ mikro düzeydeki kuruluşların dijital dönüşüme yönelik eğilimini temsil etmektedir. Bu çalışma, Zhang ve diğerleri [13] tarafından kullanılan metodolojiden yararlanarak

Enerji işletmelerinin yıllık raporlarında "dijitalleşme" ile ilgili kelime frekanslarının nicel analizi. Veri işleme, farklı illerdeki enerji dijitalleşmesinin boyutunu tespit etmek için menkul kıymet kodu, kelime sıklığı, il ve yılı kapsayan dört boyutlu bir yaklaşım içermektedir. Özel prosedür şöyledir

beş adımda tanımlanmıştır: ① Enerji İşletmelerinin Taranması: Farklı İmalat ve finans gibi sektörlerden farklı olarak, enerji endüstrisi

Çin'deki enerji işletmelerine ilişkin kesin tanımlama ve istatistiksel veriler dağılmıştır. Sonuç olarak, önceki araştırmalardan [61,106] yola çıkarak, hem ulusal ekonomik çerçeve hem de Wind Financial Terminal veri tabanındaki endüstri sınıflandırmalarına dayalı olarak halka açık enerji işletmelerini belirlemek için kapsamlı bir yaklaşım benimsiyoruz. Bu yaklaşım, yukarı akış enerji çıkarma, orta akış enerji kimyasalları ve aşağı akış ticari tüketimini kapsayan tüm enerji endüstrisi spektrumunun dahil edilmesini sağlamakta ve böylece

enerji dijitalleşmesi. ② İşletme Faaliyet Raporlarının Madenciligi:

Bu çalışma, makine öğrenimi tekniklerinden yararlanarak metin içeriğini çıkarır enerji şirketlerinin 2012'den 2021'e kadar olan yıllık raporlarından elde edilmiştir. Çıkarma işlemi Python programlama kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

③ "Enerji Dijitalleşmesi" Sözlüğünün Oluşturulması: Üzerine İnşa Etmek önceki araştırma çabaları [92,107], bu çalışma bir sözlük oluşturmaktadır enerji dijitalleşmesi ile ilgilidir. Sözlük iki ana boyuttan oluşmaktadır: teknoloji tabanı ve uygulama pratiği katmanları. Teknoloji temel katmanı yapay zeka teknolojisi, büyük veri teknolojisi, bulut bilişim teknolojisi ve blok zinciri teknolojisi gibi ifadeleri kapsamaktadır. Buna karşılık, uygulama pratiği katmanı akıllı enerji, sanal elektrik şebekesi, enerji verimliliği gibi kurumsal ifadeleri içermektedir.

İnternet, akıllı elektrik şebekesi ve dağıtılmış enerji. ④ Eşleştirme

Yıllık Rapor Metinleri ile Sözlük: Enerji derecesini ölçmek için Yıllık raporlardaki dijitalleşme, metin içeriği önceden tanımlanmış sözlükle titizlikle eşleştirilir. Bu eşleştirme işlemi Python programlama dilindeki Jieba sözlüğü kullanılarak kolaylaştırılmış ve böylece enerji dijitalleşmesi ile ilgili kelime sıklığı sayıları üretilmiştir.

tion. ⑤ Bölgesel ED Derecesinin Hesaplanması: Menkul kıymetleri dahil ederek kodu, kelime sıklığı, il ve yıl kritik değişkenler olarak belirlenmiştir. kelime frekanslarının ve her bir coğrafi bölgedeki toplam enerji işletmesi sayısının toplu özetlerini üretmektedir. Daha sonra, bölgesel ED derecesi, birim işletme başına kelime frekansına logaritmik bir dönüşüm uygulanarak hesaplanır.

4.2.3. Mekanizma değişkenleri

① Enerji teknolojisi yeniliği (*enerinno*). Bu kategori, hem fosil enerjinin artırılması hem de enerji verimliliğinin artırılması ile ilgili yenilikleri kapsamaktadır.

önceki araştırmalarda gözlemlendiği gibi yenilenebilir enerji gelişimi [108, 109]. Li ve diğerleri [72] tarafından kullanılan metodolojiyi temel alan bu çalışma

enerinno için kapsamlı bir vekil olarak her iki enerji teknolojisi türü için patent başvurularının sayısını kullanır.

② Enerji yapısı optimizasyonu (*enerstru*). 14. Beş Yıllık Plan Modern Enerji için Çin için iddialı bir hedef belirledi.

2025'e kadar elektrik üretiminde fosil olmayan enerji katkısının yaklaşık %39'a ulaşması. Temiz enerji tüketiminin ve elektrik üretiminin artırılması, bu enerji yapısı optimizasyonu hedefine ulaşmada temel bir rol oynamaktadır [110]. Çin'de temiz enerji tüketimine ilişkin güvenilir veriler bulunmamakla birlikte, bu çalışma, Destek ve Aslan [111] tarafından benimsenen yaklaşım doğrultusunda, enerji yapısı optimizasyonunu karakterize etmek için fosil olmayan enerji üretim oranını bir gösterge olarak kullanmaktadır.

③ Enerji kullanım verimliliği (*enereffi*). Ekonomik verimliliğin ölçülmesi Her bir enerji tüketim biriminin faydaları, enerji kullanım verimliliği genellikle birim enerji tüketimi başına GSYİH ile temsil edilir [43, 112].

4.2.4. Eşik değişkenleri

① Piyasalaşma (*piyasa*). Bölgesel dış kurumsal ortam, geliştirilen piyasalaşma göstergesi kullanılarak karakterize edilir

Fan ve diğerleri [113] tarafından geliştirilmiştir. Bu gösterge beş temel boyutu kapsamaktadır: devlet mülkiyetinde olmayan bir ekonominin gelişimi, hükümet-piyasa ilişkisi, ürün piyasası koşulları, aracı kuruluşlar ve faktör piyasası özellikleri. Ayrıca, 2012'den 2021'e kadar olan dönemde verilerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak için piyasalaşma endeksinde gerekli ayarlamalar yapılmıştır [114].

② Çevresel düzenleme (*regülasyon*). Düzenleyici çabalar endüstriyel kirliliğe yönelik tamamlanmış yatırımların oranı ile ölçülür Zhang ve diğerleri [103] tarafından önerilen yaklaşımı izleyerek ikincil sanayinin katma değerini kontrol eder.

③ Dijital altyapı (*diginfra*). Dijital altyapı şudur kapsamlı bir gösterge sistemine dayalı olarak değerlendirilir. Pan ve diğerleri [115] ve Chen [92] tarafından benimsendiği üzere, İnternet penetrasyonu (yerleşik nüfus içindeki İnternet kullanıcılarının oranı), telefon penetrasyonu (toplam tele-telefon sayısı / İdari alanın toplam nüfusu $\times 100$), uzun mesafe kablo hatlarının uzunluğu, İnternet alan adlarının sayısı ve geniş bant erişim IoT bağlantı noktaları gibi unsurlar. Dijital altyapı endeksi nihai olarak entropi yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Entropi yönteminin adımları aşağıdaki gibidir:

a Göstergelerin standartlaştırılması Z_{im}

$$Z_{im}^+ = \frac{z_{im} - \min(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{30m})}{\max(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{30m}) - \min(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{30m})} \quad (10)$$

$$Z_{im}^- = \frac{\max(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{30m}) - z_{im}}{\max(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{30m}) - \min(z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{30m})} \quad (11)$$

Endeks değerlerindeki aşırı farklılığın neden olduğu dengesiz dağılımdan kaçınmak için veriler standartlaştırılır. Yukarıdaki formüle,

Z_{im}^+ ve Z_{im}^- sırasıyla standartlaştırılmış işlemden sonra pozitif ve negatif göstergeleri, Z_{im} ise i ilinin m göstergesinin orijinal değerini ifade etmektedir. m , dijital altyapının beş ikincil göstergesini temsil etmektedir.

b Bilgi entropisinin ölçüsü E_m

$$E_m = -\ln \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z_{im}}{\sum_{i=1}^n Z_{im}} - \ln \frac{Z_{im}}{\sum_{i=1}^n Z_{im}} \quad (12)$$

Bilgi entropisi, aynı endeksin farklı bilgi içeriğini yansıtır ve bu da ağırlık ayarında öznel faktörlerin etkisini etkili bir şekilde önleyebilir.

c Gösterge ağırlıklarının hesaplanması P_m

$$P_m = \frac{(1 - E_m)}{\sum_{j=1}^5 (1 - E_m)} \quad (13)$$

Her bir endeksin bilgi entropisine göre ağırlığı şöyledir hesaplandı.

d Bileşik endeks *diginfra*'nın hesaplanması.

$$diginfra = \sum_{m=1}^5 P_m \cdot Z_{im} \quad (14)$$

Her bir göstergenin standartlaştırılmış değeri Z_{im} ve her bir göstergenin ağırlığı P_m temel alınarak, 2012'den 2021'e kadar il düzeyinde dijital altyapı düzeyini (*diginfra*) hesaplamak için çok amaçlı doğrusal ağırlıklandırma fonksiyonu yöntemi kullanılır.

④ Kaynak bağımlılığı (*bağımlılık*). Kaynak bağımlılığı Bölgesel maden çıkarma sektöründeki istihdamın, maden çıkarma sektöründeki istihdama oranı ile ölçülür. imalat sanayinde.

4.2.5. Kontrol değişkenleri

Enerji dijitalleşmesine ek olarak, çeşitli iç ve dış faktörler CP'yi etkileyebilir. Mevcut araştırmalara [116-118] dayanarak, bu faktörleri hesaba katmak için bir dizi kontrol değişkeni dahil ediyoruz.

Bu değişkenler arasında ① Doğrudan yabancı yatırım (*fdi*) yer almaktadır. *fdi* şunları etkileyebilir

Kirlilik geçişi ve bilgi yayılımı etkileri yoluyla CP. Biz

doğrudan yabancı yatırımların GSYİH'ye oranını kullanarak ölçmektedir;

② Endüstriyel işletme büyüklüğü (*boyutu*). Sanayi işletmelerinin büyüklüğü, potansiyel olarak işletme ve üretim verimlilikleriyle yakından bağlantılıdır.

CP'yi etkilemektedir. Bölgesel işletmelerin sayısına göre endüstriyel çıktı değerinin payı olarak hesaplanır; ③ Şehirleşme (*şehir*). Kentleşme süreci genellikle nüfus göçünü, faktör

yığılma ve kentsel altyapı gelişimini etkileyebilir.

ekonomik büyüme ve çevre kirliliği. Kentleşmeyi ölçmek için kentsel kalıcı nüfusun yüzdesini kullanıyoruz; ④ Endüstriyel yapı (*ins*). Endüstriyel düzen ve yapı, kentleşmede çok önemlidir.

ekonomik büyüme modunu belirler ve CP'yi etkileyebilir. Bunu, üçüncül sanayi çıktısının ikincil sanayi çıktısına oranı olarak ölçüyoruz;

⑤ Ulaşım altyapısı (*trans*). *Trans*'ın CP üzerinde ikili bir etkisi vardır.

Bir yandan bölgesel ulaşım koşullarını iyileştirebilir, kaynak akışının kolaylaştırılması ve düşük karbonlu inovasyon ve üretim verimliliğinin artırılması. Öte yandan, otomotiv sektörünü artırabilir. sahra egzoz emisyonları ve fosil enerji tüketimi. Bunu tahmin ediyoruz

değişkenini, toplam karayolu kilometresinin toplam nüfusa oranını

kullanarak hesaplamıştır. Özetle, ilgili ölçüm ve gösterge kaynakları

Bu makaledeki değişkenler Tablo 3'te gösterilmiştir.

4.3. Veri kaynağı ve tanımlayıcı istatistikler

Çalışmamızın konusu olarak 30 anakara Çin eyaletini seçtik ve 2012'den 2021'e kadar uzanan panel verilerini topladık. Veri kaynaklarımız, 47 ekonomik sektörü, 17 fosil yakıtın yanmasını ve çimentoyu kapsayan enerji yanması ve üretim süreçlerinden kaynaklanan emisyonları hesaba katarak bölgesel karbon emisyonlarının daha kapsamlı bir görünümünü sağlayan CEAD'lerden (Karbon Emisyon Hesapları ve Veri Setleri) elde edilen bölgesel CO₂ emisyon verilerini kapsamaktadır. üretimi [119]. Ayrıca enerji teknolojisi hakkında da veri topladık Şangay Fikri Mülkiyet (Patent) Kamu'dan yenilik

Hizmet Platformu, Li ve diğerlerinde belirtildiği gibi [72]. Fosil olmayan enerji üretim verileri, Çin Elektrik Enerjisi İstatistik Kurumu'ndan temin edilmiştir.

Yıllığı, enerji tüketimi verileri ise Çin Enerji İstatistik Yıllığı temel alınarak derlenmiştir. Piyasalaşma endeksi verileri, Çin'in İllere Göre Piyasalaşma Endeksi Raporu (2021) kullanılarak hesaplanmış ve karşılaştırılabilir şekilde düzeltilmiştir [120]. Ayrıca, öncelikle Çin Bölgesel Ekonomik Veritabanı ve EPS küresel istatistiklerinden elde edilen diğer verileri de dahil ettik. Ayrıca, çoklu doğrusal bağlantı olmadığını teyit ettik.

ve spesifik tanımlayıcı bilgiler değişkenler arasında Tablo 4'te yer almaktadır.

Şekil 3, düşük karbon ekonomisi gelişimi ve enerji dijitalleşmesinin ortalama bölgesel değerlerini gösteren coğrafi ısı haritalarını sunmaktadır örneklem dönemi boyunca. Daha koyu renkler daha yüksek değerleri göstermektedir. Bölgesel düşük karbon ekonomisi gelişiminin dağılımı, tek tip bir modelden ziyade belirgin bir mekânsal kümelenme sergilemektedir. Pekin, Guangdong, Jiangsu, Fujian, Zhejiang ve Sichuan gibi iller nispeten olumlu düşük karbonlu ekonomik gelişme gösterirken, Sincan, Qinghay, Gansu, Ningxia ve İç Moğolistan daha düşük değerler. Pekin'in düşük karbonlu ekonomik kalkınma konusundaki övgüye değer performansı dikkat çekicidir. Son yıllarda Pekin, politika ve teknolojik ilerlemeler yoluyla karbon yönetişimini tutarlı bir şekilde vurgulamış, etkileyici sonuçlar elde etmiş ve Çin'in düşük karbonlu ekonomik kalkınmasında lider bir eyalet olarak kendini kanıtlamıştır. Bölgesel enerji dijitalleşmesi ile ilgili olarak, doğu Çin yüksek düzeyde dijitalleşmeye işaret eden en koyu renkleri gösterirken, orta Çin daha açık renkler sergilemektedir. Doğu bölgesinin hızlı dijital sanayi büyümesi, sağlam dijital teknoloji temeli ve gelişmiş dijital altyapısı, daha yüksek dijitalleşme seviyesine katkıda bulunmaktadır. Buna karşılık,

Tablo 3
Değişken bildirimi.

Tip	Değişken	Ölçüm	Kaynak
Bağımlı değişken	Karbon üretkenliği (<i>cp</i>)	Malmquist-Luenberger verimlilik endeksi	Çin Bölgesel İstatistik Yıllığı Çin Enerji İstatistik Yıllığı CEADS
Anahtar bağımsız değişken	Enerji dijitalleşmesi (<i>enerdig</i>)	$enerdigit = diginputit \times digstrategyit$	Departman girdi-çıktı tablosu Kurumsal faaliyet raporu
	Enerji sektöründe dijital girdi (<i>diginput</i>)	Göreceli tüketim katsayısı	İl 42 departman girdi-çıktı tablosu (Ulusal İstatistik Bürosunda yayınlanmıştır)
	Mikro kuruluşların dijital dönüşüm için istekliliği (<i>digstrategy</i>)	Doğal dil işlemeyle dayalı kelime sıklığı istatistikleri	Borsada işlem gören enerji şirketlerinin yıllık raporlarındaki birleşme ve satın alma metinleri (Python'dan Reptile tekniği) Şangay Fikri Mülkiyet (patent) kamu hizmeti platformu
Mekanizma değişkenleri	Enerji teknolojisi inovasyonu (<i>enerinno</i>)	"Fosil olmayan enerji" ve "enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı" için yapılan patent başvurularının sayısı	
	Enerji yapısı optimizasyonu (<i>enerstru</i>) kullanım verimliliği (<i>enereffi</i>)	Yenilenebilir enerji üretiminin oranı GSYİH/Enerji tüketimi	Çin Elektrik Enerjisi İstatistik Yıllığı Enerji Çin Bölgesel İstatistik Yıllığı Çin Enerji İstatistik Yıllığı
Eşik değişkenler	Piyasalaştırma (<i>pazar</i>)	Piyasalaştırma endeksi	Fan ve diğerleri [113]
	Çevre düzenlemesi (<i>düzenleme</i>)	Endüstriyel kirlilik kontrolünde tamamlanan yatırım/ikincil sanayi katma değeri	Çin Bölgesel İstatistik Yıllığı
	Dijital altyapı (<i>diginfra</i>)	Entropi yöntemi	Çin Elektronik Bilgi Endüstrisi İstatistik Yıllığı EPS küresel istatistikleri EPS küresel istatistikleri
	Kaynak bağımlılığı (<i>dependence</i>)	Maden çıkarma endüstrilerinde istihdam/sanayide istihdam	
Kontrol değişkenleri	Doğrudan yabancı yatırım (<i>fdi</i>)	doğrudan yabancı yatırım/GSYİH	EPS küresel istatistikleri
	Endüstriyel işletme büyüklüğü (<i>boyut</i>)	endüstriyel çıktı değeri/bölgesel işletme sayısı	Çin Bölgesel Ekonomik Veritabanı Kentleşme (<i>şehir</i>)
	Endüstriyel yapı (<i>ins</i>)	kentsel daimi nüfus/toplam nüfus	Çin Bölgesel Ekonomik Veritabanı
		üçüncül sanayi çıktısı/ikincil sanayi çıktısı	Çin Bölgesel Ekonomik Veritabanı Ulaşım altyapısı (<i>trans</i>)
		toplam karayolu kilometresi/toplam nüfus	Çin Bölgesel Ekonomik Veritabanı

Tablo 4
Değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri.

Değişken	Gözlem	Ortalama	Std. Dev.	Min	Maksimum
<i>cp</i>	300	0.853	0.235	0.578	2.549
<i>enerdig</i>	300	2.692	0.816	0.251	4.382
<i>fdi</i>	300	1.638	1.473	0.039	9.147
<i>boyut</i>	300	0.990	0.343	0.411	2.118
<i>ŞEHİR</i>	300	0.582	0.121	0.350	0.896
<i>ins</i>	300	1.218	0.691	0.518	5.169
<i>trans</i>	300	0.027	0.020	0.003	0.104

Batı bölgeleri, teknolojik açıdan ileri düzeyde olmamalarına rağmen, yeni enerji dağıtımı ve enerji üretimi konusunda önemli bir baskıyla karşı karşıyadır. Bu baskı, dijital teknoloji ve yeni teknolojilerin kapsamlı entegrasyonunu teşvik etmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3. *acp* (ortalama CP değeri) (a) ve *aenerdig* (ortalama enerji sayısallaştırma değeri) (b) dağılım haritaları.

enerji üretimi, dijitalleşme seviyelerini bir dereceye kadar iyileştirmektedir. Özellikle, kömür kaynakları bakımından zengin bir eyalet olan Shanxi'nin dijitalleşme düzeyinin düşük olması dikkat çekicidir. Bu gözlem, Türkiye'nin enerji üretiminde karşılaştığı sorunlar

teknolojik ilerleme ve ekonomik kalkınma ile ilgili kısıtlamalar dikkatli bir değerlendirme gerektirir.

5. Ampirik sonuçlar ve tartışma

5.1. Doğrudan etkilerin sonuçları

5.1.1. Temel regresyon analizi

Tablo 5'te gösterildiği gibi, bu çalışmada ED'nin düşük karbon ekonomisi etkilerini tahmin etmek için POLS, RE ve FE yöntemleri kullanılmıştır. Bunlar arasında,

(1), (3) ve (5) numaralı sütunlar sadece temel açıklayıcı değişken ED'yi içerirken (2), (4) ve (6) numaralı sütunlar tüm kontrol değişkenlerini içermektedir. Tüm sonuçlar çekirdek değişkenler arasında pozitif etki katsayıları göstermekte ve **hipotez 1'**i doğrulamaktadır; yani ED, CP'yi doğrudan teşvik edebilir. Buna ek olarak, kontrol değişkenleri dahil edildiğinde, modelin uyum iyiliği önemli ölçüde artmakta ve değişken taramasının rasyonelliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Hausman testine göre, (6) numaralı sütuna odaklanacağız. Her ED birim artışı için bölgesel CP 0.112 birim artacaktır. Mikro perspektiften bakıldığında, ED geleneksel üretim faktörlerinin ve üretim bağlantılarının yapısını veri unsurlarıyla yeniden yapılandırmak ve üretim modunun yoğun dönüşümünü tetikleyerek yeşil verimliliği artırmaktadır. Mezo perspektiften bakıldığında, ED ağa bağlı platform aracılığıyla endüstriyel organizasyon biçimlerini yeniden şekillendirir ve geniş çapta birbirine bağlı ekolojik bir topluluk oluşturur, böylece enerji endüstrisinin temiz gelişimini teşvik eder. Makro bir perspektiften bakıldığında ED, dijital teknoloji, işletme teknolojisi ve elektrik teknolojisini entegre ederek enerji değeri zincirinin tüm halkalarının karbon takibini ve geri bildirimini gerçekleştirmekte, böylece ekonominin ve toplumun akıllı ve yeşil gelişimini artırmaktadır. Ayrıca, değişkenler açısından bakıldığında, sanayi işletmelerinin büyüklüğündeki her birim artış için, bölgesel düşük karbonlu ekonomik kalkınma 0,768 birim artacaktır. Schum- peter'in inovasyon teorisi [121] firma büyüklüğünün inovasyonla orantılı olduğunu vurgulamıştır. Büyük ölçekli işletmelerin büyük ölçekli üretim nedeniyle daha fazla kirlilik üretecek olmalarına rağmen, emisyon azaltımında ileri teknolojik yeniliklerle desteklenen düşük karbonlu ekonomik katkı açısından daha büyük bir avantaja sahip olduklarından şüpheleniyoruz. Sanayi yapısı, %5 düzeyinde anlamlı olan 0,654'lük bir katsayı ile CP'yi teşvik edebilir. Zhao ve diğerlerinin bulgularına [122] benzer şekilde, endüstriyel yapının gelişmiş gelişimi, enerji yoğun endüstrilerin ortadan kaldırılmasına, enerji tüketim yapısının optimize edilmesine ve yeşil teknoloji inovasyonunun teşvik edilmesine katkıda bulunmakta ve böylece CP'yi teşvik etmektedir.

5.1.2. Endojen analiz

Önceki çalışmalar, düşük karbonlu kalkınmanın dijitalleşmeyi teşvik edebileceğini öne sürmüştür [92]. Bu nedenle, ED ve CP arasında ters nedensellik olasılığını göz önünde bulundurmak önemlidir. Ayrıca, CP'yi etkileyen çok sayıda faktör göz önüne alındığında, eksik değişkenler olabilir ve ampirik sonuçlar gözlemlenemeyen faktörlere tabi olabilir. Bu endişeleri gidermek için, model tahmini için araç değişken yöntemini kullanıyoruz.

Analize, modelin içselliklerini incelemek için robust Durbin-Wu-Hausman (DWH) testini yapıyoruz. Test sonuçları 32.798'lik bir istatistik değeri ve buna karşılık gelen P-değeri vermektedir

0.000'dir ve bu da ED'de bir içsellik sorununun varlığına işaret etmektedir. Araç değişkenler için iki kritik koşul ışığında iki araç değişken seçiyoruz - içsel değişkenlerle korelasyon var ancak

rastgele bozucu terimlerle korelasyon. ① Topoğrafya derecesi grafik kabartma iv1 [43]: Bölgesel topoğrafik rahatlama

dijital ekipmanların kurulumu ve dijital bilgi aktarımı, ancak CP'yi doğrudan etkilememektedir. ② 1984 yılında bir milyon kişi başına düşen postane sayısı ile gecikme arasındaki etkileşim terimi

endüstriyel robot kurulum yoğunluğu iv2 terimi [123]: Postanelerin sayısı tarihsel olarak internet penetrasyon oranları ve iletişim teknolojilerinin gelişimiyle bağlantılıdır. Ancak teknolojik ilerlemelerle birlikte postanelerin modern toplumdaki rolü azalmıştır. Bu değişkeni endüstriyel robot kurulum yoğunluğuyla çarparak dijitalleşmeyle olan ilgisini artırıyoruz. Endüstriyel robot kurulum yoğunluğunun gecikme teriminin mevcut CP ile zayıf bir korelasyona sahip olduğunu belirtmek önemlidir. **Tablo 6'**daki ilk iki sütun, iki aşamalı en küçük kareler (2SLS) yönteminin tahmin sonuçlarını sunmaktadır. Birinci aşama sonuçlarına göre, hem iv1 hem de iv2 ED düzeyini önemli ölçüde artırarak içsel değişkenle güçlü ilişkilerini teyit etmektedir. İkinci aşama regresyonunda, *enerdig* katsayısı önemli ölçüde pozitif ve **hipotez 1** için ikna edici kanıtlar sağlamaktadır. Ayrıca, Cragg-Donald Wald istatistiği 30.851 değerini vererek %10 kritik değer olan 19.930'u aşmış ve araç değişken seçiminin etkinliğini teyit etmiştir.

CP'nin seri korelasyonlarını göz önünde bulundurarak, potansiyel gözlemlenemeyen faktörleri hesaba katmak ve model tahmin yanlılığını en aza indirmek için gecikme terimi *L. cp*'yi tanımlıyoruz ve GMM uyguluyoruz. **Tablo 6'**daki son iki sütun sistem GMM modelinin ve diferansiyel GMM'nin sonuçlarını sunmaktadır. Hem AR hem de Hansen test sonuçları GMM'nin uygunluğunu doğrulamaktadır. İçsellik sorunu ele alındıktan sonra bile, ED'nin CP üzerinde önemli bir pozitif etki sergilemeye devam etmesi ve **hipotez 1** için bulgularımızın sağlamlığını güçlendirmesi dikkat çekicidir.

5.1.3. Heterojenlik analizi

(1) Bölgesel heterojenliğin analizi

Çin'deki coğrafi bölgelerin ayırıcılığına dayanan bu çalışma, Çin'in dört büyük bölgesi üzerinde bir alt örneklem heterojenlik testi gerçekleştirmiştir. **Tablo 7'**de sunulan sonuçlar, ED'nin yalnızca doğu ve kuzeydoğu bölgelerinde CP'yi önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Özellikle, ED'nin düşük karbonlu ekonomik etkisinin en belirgin olduğu bölge doğu bölgesidir ve bu da Yi ve diğerlerinin [123] bulgularıyla uyumludur. Bu sonuç, doğu bölgesinin daha gelişmiş dijital teknolojilere sahip olmasına bağlanabilir

Tablo 5
Temel regresyon sonuçları.

Değişken	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	POLS	POLS	RE	RE	FE	FE
<i>enerdig</i>	0.407*** (0.052)	0.106*** (0.020)	0.320*** (0.081)	0.104*** (0.039)	0.317*** (0.081)	0.112** (0.051)
<i>fdi</i>		0.138*** (0.042)		0.057 (0.050)		0.010 (0.041)
<i>boyut</i>		-0.275*** (0.033)		0.571** (0.258)		0.768** (0.282)
<i>ŞEHİR</i>		0.407** (0.161)		0.616 (1.429)		1.086 (1.460)
<i>ins</i>		0.698*** (0.069)		0.607** (0.290)		0.654** (0.295)
<i>trans</i>		-0.134 (0.594)		-2.975 (6.282)		-14.160 (11.070)
<i>sabit</i>	-0.242 (0.134)	-0.470*** (0.117)	-0.001 (0.136)	-1.102*** (0.386)	-0.000 (0.219)	-1.265** (0.489)
<i>N</i>	300	300	300	300	300	300
<i>R²</i>	0.204	0.666	0.349	0.612	0.349	0.630

Not: 0.10, 0.05 ve 0.01 anlamlılık düzeyleri sırasıyla *, ** ve *** ile gösterilmiştir. Parantez içindeki istatistikler standart hataları ifade etmektedir. Aşağıdaki ile aynıdır.

Tablo 6

Araç değişken regresyonu ve GMM regresyonu sonuçları.

Değişken	(1)	(2)	(3)	(4)
	2SLS'n i n ilk aşaması	2SLS'nin ikinci aşaması	Sistem- GMM	Diferansiyel- GMM
<i>enerdig</i>		0.630*** (0.111)	0.015* (0.008)	0.097*** (0.035)
<i>iv1</i>	0.258** (0.054)			
<i>iv2</i>	0.173*** (0.036)			
<i>L. CP</i>			1.107*** (0.011)	0.736*** (0.063)
<i>sabit</i>	-0.787* (0.426)	-1.483*** (0.291)	-0.044** (0.018)	
Kontrol değişkenleri	Evet	Evet	Evet	Evet
Zaman sabitli etki	kontrol	kontrol	kontrol	kontrol
Bireysel-sabit etki	kontrol	kontrol	kontrol	kontrol
DWH'nin p değeri		0.000		
Cragg-ın F değeri		30.851		
Donald Wald				
P değeri		0.100	0.879	0.515
Hansen testi				
AR'nin p değeri (1)			0.009	0.003
test				
AR'nin p değeri (2)			0.734	0.265
test				
N	300	300	270	240

ve ED'nin düşük karbonlu ekonomik etkisinin gösterilmesini kolaylaştıran üstün dijital altyapı koşulları. Buna karşılık, kömür yakma nedeniyle daha yüksek karbon emisyon seviyesine sahip olmasına rağmen, kuzeydoğu bölgesi, orta ve batı bölgelerine kıyasla ED'nin karbon azaltımı üzerindeki etkisini daha belirgin bir şekilde deneyimlemektedir. Mevcut ekonomik kalkınma ve dijital teknoloji seviyeleri göz önüne alındığında, bu durum yüksek enerji tüketim alanlarının karbon zirvesi ve karbon nötrlüğü çabalarına katkıda bulunma potansiyelini ortaya koymaktadır.

(2) Zaman heterojenliğinin analizi

Çin'deki coğrafi bölgelerin ayırımına dayanan bu çalışma, Çin'in dört büyük bölgesi üzerinde bir alt örneklem heterojenlik testi gerçekleştirmiştir. Tablo 8'de sunulan sonuçlar, ED'nin yalnızca doğu ve kuzeydoğu bölgelerinde CP'yi önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Özellikle, ED'nin düşük karbonlu ekonomik etkisinin en belirgin olduğu bölge doğu bölgesidir ve bu da Yi ve diğerlerinin [123] bulgularıyla uyumludur. Bu sonuç, doğu bölgesinin daha gelişmiş dijital teknolojilere sahip olmasına bağlanabilir.

Tablo 7

Bölgesel heterojenlik testinin sonuçları.

Değişken	(1)	(2)	(3)	(4)
	doğu	merkezi	Batı	kuzeydoğu
<i>enerdig</i>	0.261*** (0.062)	0.043 (0.062)	-0.038 (0.027)	0.034** (0.014)
<i>fdi</i>	-0.004 (0.033)	0.122 (0.084)	0.368*** (0.075)	-0.141*** (0.042)
<i>boyut</i>	0.942*** (0.208)	0.532*** (0.183)	0.246*** (0.093)	-0.008 (0.034)
<i>ŞEHİR</i>	-1.918 (1.209)	5.146*** (1.739)	0.343 (0.856)	3.737*** (0.991)
<i>ins</i>	0.849*** (0.114)	0.356 (0.215)	0.443*** (0.100)	-0.061** (0.023)
<i>trans</i>	-17.600** (7.620)	-35.850*** (10.080)	7.306 (11.690)	-0.373 (3.401)
<i>sabit</i>	0.432 (0.649)	-2.029*** (0.512)	-0.684** (0.330)	-1.738*** (0.562)
<i>N</i>	100	60	110	30
<i>R²</i>	0,812	0,838	0,709	0,932

ve ED'nin düşük karbonlu ekonomik etkisinin gösterilmesini kolaylaştıran üstün dijital altyapı koşulları. Buna karşılık, kömür yakılması nedeniyle daha yüksek bir karbon emisyon seviyesine sahip olmasına rağmen, kuzeydoğu bölgesi, orta ve batı bölgelerine kıyasla ED'nin karbon azaltımı üzerindeki etkisini daha belirgin bir şekilde deneyimlemektedir. Bu durum, mevcut ekonomik kalkınma ve dijital teknoloji seviyeleri göz önüne alındığında, yüksek enerji tüketim alanlarının karbon zirvesi ve karbon nötrlüğü çabalarına katkıda bulunma potansiyelini altını çizmektedir.

5.2. Dolaylı etkilerin sonuçları

Tablo 9, ED'nin CP'yi etkilediği aracı mekanizmaları sunmaktadır. Özellikle, ilk iki sütunda enerji teknolojisi inovasyonunun (*enerinno*) aracı değişken olarak kullanıldığı üç aşamalı bir regresyon kullanılmıştır. Sonuçlar, ED'nin enerji teknolojisi inovasyonu üzerindeki etki katsayısının 0,137 olduğunu ortaya koymaktadır ki bu sadece 0,99 p-değeri ile anlamlılık testini geçmekle kalmayıp aynı zamanda istatistiksel anlamlılığı da göstermektedir. Ayrıca, enerji teknolojisi inovasyonunun CP üzerindeki esneklik katsayısı 0.263'tür. Sonuç olarak, ED'nin CP üzerindeki doğrudan etkisinin 0.036 (0.137×0.263) olduğunu ve toplam etkinin %32.171'ini temsil ettiğini hesaplayabiliriz. Ortadaki iki sütuna geçerek, enerji yapısı optimizasyonu (*enerstru*) ara değişken olarak kullanıldığında elde edilen sonuçları inceliyoruz. Aşamalı regresyondaki kritik katsayıların anlamlı olmamasına rağmen, Wen ve Ye [99] tarafından vurgulandığı gibi, bir aracı etkinin potansiyel varlığını kabul etmek hayati önem taşımaktadır. Bunu doğrulamak için, temiz enerji yapısı geçişinin kısmi aracılık etkisine işaret eden 0.000 p-değeri veren Sobel ve Bootstrap testleri gerçekleştirdik. Bu etki toplam etkinin %4,557'sine denk gelmektedir. Son sütun setinde (5) ve (6), enerji kullanım verimliliğinin (*enereff*) aracı değişken olarak kullanıldığı üç aşamalı bir regresyonun sonuçlarını sunuyoruz. Bu bulgular ED'nin enerji teknolojisi, enerji yapısı ve enerji kullanım verimliliği yoluyla CP'yi dolaylı olarak etkileyebileceğini göstermektedir. Özetle, analizimiz ED'nin ikili bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir: CP üzerinde doğrudan bir etki ve önemli ekonomik göstergelerin aracılık ettiği çoklu dolaylı etkiler. Bu bulgular, ED ve CP arasındaki ilişkinin karmaşık yapısının altını çizmektedir.

5.3. Eşik etkilerinin sonuçları

Tablo 10 eşik etkisi analizinden elde edilen bulguları ortaya koymaktadır. P-değerleri incelendiğinde, dört eşik değişkeninin de çifte eşik durumuyla karşılaşmaksızın tek bir eşik etkisi sergilediği ortaya çıkmaktadır. Bu gözlem, bu çalışmadaki *hipotez 3*'ün ilk kısmını daha da doğrulamaktadır. Daha net bir bakış açısı için, piyasa-laşma düzeyi, çevresel düzenleme yoğunluğu, dijital altyapı

Tablo 8

Zaman heterojenliği testinin sonuçları.

Değişken	(1)	(2)
	2012-2015	2016-2021
<i>enerdig</i>	0.049** (0.023)	0.078** (0.038)
<i>fdi</i>	0.002 (0.017)	0.168*** (0.063)
<i>boyut</i>	0.385** (0.165)	0.613*** (0.104)
<i>ŞEHİR</i>	1.363 (0.936)	-1.175 (0.933)
<i>ins</i>	0.711*** (0.214)	0.743*** (0.081)
<i>trans</i>	8.846 (7.428)	-7.529 (6.924)
<i>sabit</i>	-1.491*** (0.430)	-0.225 (0.396)
<i>N</i>	120	180
<i>R²</i>	0.510	0.580

Tablo 9

Ara mekanizma sonuçları.

Değişken	(1) enerinno	(2) CP	(3) enerstru	(4) CP	(5) enereffi	(6) CP
<i>enerdig</i>	0.137*** (0.028)	0.076** (0.030)	0.022** (0.010)	0.107*** (0.030)	0.124*** (0.039)	0.043** (0.020)
<i>fdi</i>	-0.122*** (0.026)	0.042 (0.027)	0.005 (0.009)	0.009 (0.027)	-0.024 (0.036)	0.023 (0.018)
<i>boyut</i>	0.079 (0.083)	0.748*** (0.083)	-0.062** (0.028)	0.783*** (0.086)	0.919*** (0.113)	0.258*** (0.065)
<i>ŞEHİR</i>	13.150*** (0.588)	-2.368** (1.001)	-0.771*** (0.197)	1.265** (0.624)	5.178*** (0.803)	-1.793*** (0.444)
<i>ins</i>	0.810*** (0.061)	0.442*** (0.079)	-0.058*** (0.021)	0.668*** (0.064)	0.455*** (0.084)	0.402*** (0.045)
<i>trans</i>	19.150*** (4.924)	-19.190*** (5.063)	-1.342 (1.652)	-13.850*** (5.084)	-1.723 (6.717)	-13.200*** (3.454)
<i>enerinno</i>		0.263*** (0.062)				
<i>enerstru</i>				0.232 (0.189)		
<i>enereffi</i>						0.556*** (0.032)
<i>sabit</i>	2.687*** (0.269)	-1.971*** (0.315)	1.281*** (0.090)	-1.562*** (0.368)	-3.020*** (0.367)	0.414* (0.211)
<i>Sobel testi</i>	Z = 3.600 P = 0.000		Z = 3.341 P = 0.001		Z = 5.562 P = 0.000	
<i>Bootstrap testi1</i>	Z = 3.490 P = 0.000		Z = 3.600 P = 0.000		Z = 4.84 P = 0.000	
<i>N</i>	300	300	300	300	300	300
<i>R²</i>	0.941	0.654	0.252	0.632	0.657	0.830

koşulu ve kaynak bağımlılığı sırasıyla 9.2225, 0.0006, 0.4377 ve 0.0556'ya ulaştığında, Şekil 4'te gösterildiği gibi istatistiksel testin olasırlık oranı (LR) değeri sıfır olur.

Tablo 11 eşik regresyon analizinin sonuçlarını sunmaktadır. Özellikle, ① Sütun (1), ayarlayıcı değişken olarak piyasalaşmaya (*piyasa*) dayalı eşik etkisi sonuçlarını rapor etmektedir. Piyasa-seviyesi 9,2225'i aştığında, etki katsayısı %1 düzeyinde istatistiksel anlamlılıkla 0,083'ten 1,181'e değişmektedir. Bu durum, Liang ve diğerlerinin [124] dijitalleşmenin daha yüksek düzeyde piyasalaşma olan bölgelerde daha olumlu bir etkiye sahip olduğunu öne süren bulgularıyla uyumludur. Chen

[79] ayrıca olgun piyasaların, yenilenebilir enerji gelişimini teşvik etmede dijitalleşmenin rolünü artırabileceğini ve düşük CP'ye olumlu katkıda bulunabileceğini belirtmiştir. Olgun bir piyasa sistemi, dijitalleşme getirileri için kurumsal destek sağlayarak kaynak tahsisine ve düşük karbonlu inovasyona yardımcı olur ve sonuçta daha önemli bir düşük karbonlu eko-

nomik etki. ② Sütun (2), çevre etkisi ile regresyon sonuçlarını sunmaktadır.

ronmental düzenleme (*regülasyon*) eşik değişkeni olarak belirlenmiştir. Ne zaman

çevresel düzenlemeler daha sıkı hale geldiğinde, temel açıklayıcı değişkenin katsayısı %55,072 oranında azalmaktadır. Bu durum Yang ve Liang'ın [125] bakış açısından farklıdır ve çevresel düzenlemelerin "uyum maliyeti teorisini" desteklemektedir. Aşırı komuta temelli çevresel düzenlemeler işletmelere inovasyon maliyetleri yükleyebilir [126] ve dijitalleşme sürecini engelleyerek ED'nin düşük karbonlu ekonomik kalkınmaya katkısını sınırlayabilir. Bu nedenle hükümet, piyasa odaklı ve devlet koordinasyonunda bir çevre düzenlemesini benimsemeyi düşünmelidir.

Tablo 10

Eşik etkisi testinin sonuçları.

Eşik değişkeni (Eşik değeri)	Eşik testi	F değeri	P değeri	BS zamanları	Kritik değer		
					10%	5%	1%
<i>Pazar</i> (9.2225)	Tek eşik	36.440	0.047	300	29.197	36.310	60.478
	Çift eşik	20.790	0.243	300	31.443	38.932	56.379
<i>DÜZENLEME</i> (0.0006)	Tek eşik	26.820	0.023	300	19.225	23.293	30.974
	Çift eşik	4.200	0.740	300	19.797	25.767	33.617
<i>diginfra</i> (0.4377)	Tek eşik	69.820	0.000	300	24.355	31.430	52.964
	Çift eşik	11.960	0.343	300	23.523	34.887	54.510
<i>BAĞIMLILIK</i>	Tek eşik	109.680	0.003	300	40.142	51.981	98.846

kirlilik kontrol yatırımı ile dijitalleşmenin teşvikini dengeleme yaklaşımı. ③ Sütun (3), dijital altyapı (*diginfra*) için ayarlama yapıldığında doğrusal olmayan ilişkiyi rapor etmektedir. Sonuç göstermektedir ki

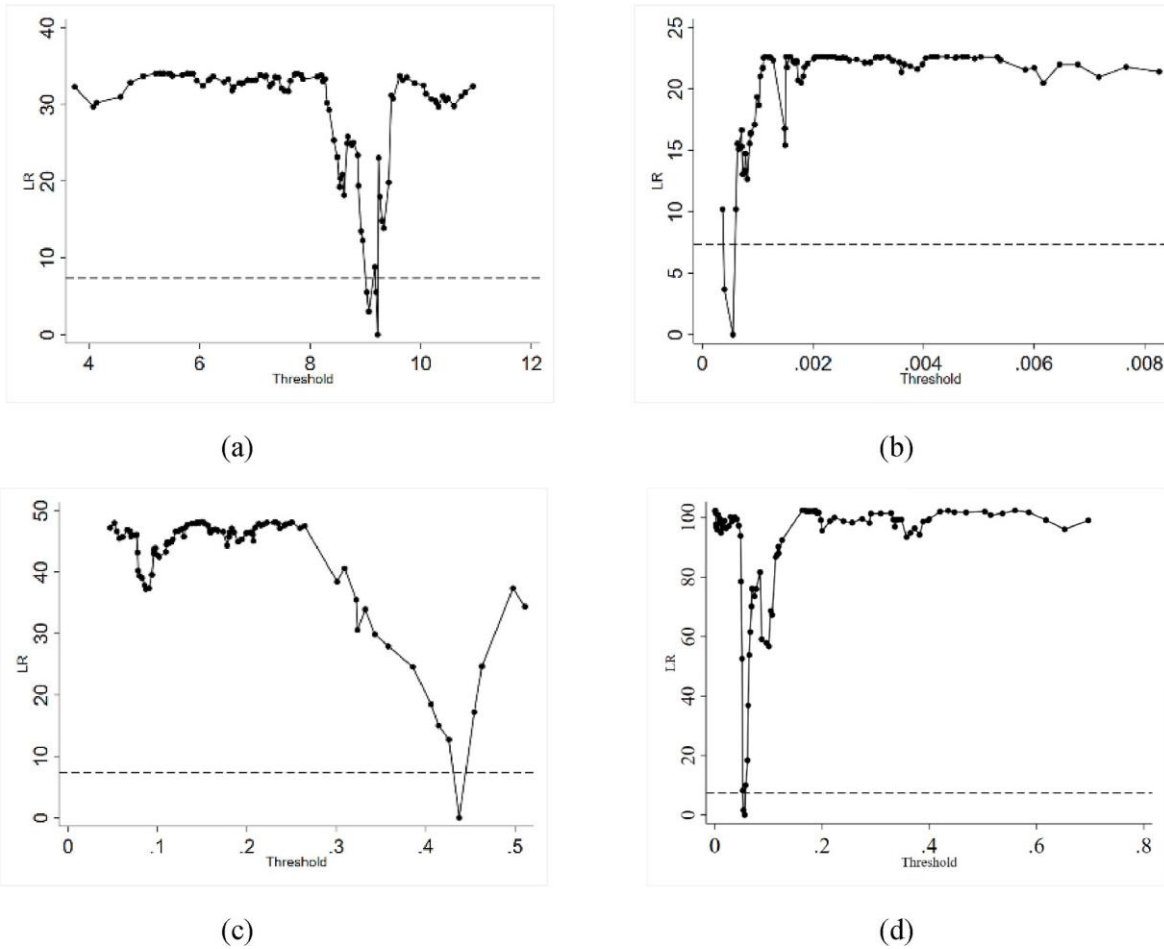
diginfra 0,4377'yi aştığında, ED'deki %1'lik bir artış CP'de %0,205'lik bir artışa yol açmaktadır. Bu bulgu, Chen'in [92] gelişmiş dijital altyapının dijitalleşmenin temel taşı olduğu ve düşük karbonlu teknolojilerin tamamen serbest bırakılması için sağlam teknik destek sağladığı gözlemiyle tutarlıdır.

ekonomik etki. ④ Sütun (4) regresyon sonuçlarını şu şekilde sunmaktadır eşik değişkeni olarak kaynak bağımlılığı (*bağımlılık*). Ne zaman kaynak *bağımlılığı* 0,0556'dan az olduğunda, ED'nin CP üzerindeki etki katsayısı 0,176'dır ve 0,01 düzeyinde anlamlıdır. Ancak, bağımlılık eşik değerini aştığında etki katsayısı artık istatistiksel olarak anlamlı değildir. Çalışma, yüksek kaynak bağımlılığına sahip bölgelerin katı ve kapsamlı bir kalkınma yaklaşımı benimseme eğiliminde olduğunu, teknoloji ve insan sermayesi gibi üst düzey faktörleri sıkıştırdığını öne sürmektedir. Bu durum, ED'nin bu bölgelerdeki karbon azaltma etkisini sınırlamaktadır.

5.4. Mekânsal etkilerin sonuçları

5.4.1. Mekânsal korelasyon analizi

Bu çalışma, mekânsal korelasyon testi yapmak için Moran endeksini kullanmaktadır. Tablo 12, ekonomik coğrafi mesafe ağırlık matrisine dayalı küresel Moran endeksini göstermektedir. Hem düşük karbonlu ekonomik kalkınma hem de ED önemli bir pozitif mekânsal korelasyon sergilemektedir. Bununla birlikte, Moran endeksinin değişkenlik gösterdiğini belirtmek gerekir.



Şekil 4. Eşik değişkenlerinin olabilirlik oranı fonksiyonu grafiği: piyasa (a), düzenleme (b), diginfra (c) ve bağımlılık (d).

Mekânsal dağılım örüntüleri her iki değişkeni de önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 5, çoğu veri noktasının birinci ve üçüncü çeyreklerde kümелendiğini göstermekte ve her iki değişken için de "yüksek-yüksek" yığılma modeline ve "düşük-düşük" yığılmaya işaret etmektedir.

Ayrıca, bölgesel CP'nin uzamsal-zamansal korelasyonunu araştırmak için uzamsal Markov zinciri modelini uyguladık. Bu analiz CP'yi üç türe ayırmıştır: 1, 2 ve 3, sırasıyla düşük, orta ve yüksek CP'yi temsil etmektedir. Tablo 13 hem geleneksel hem de mekânsal Markov modelleri için geçiş olasılığı matrisini sunmaktadır. Altında

geleneksel Markov analizi ile aşağıdaki gözlemler yapılabilir: ① Diyagonal olasılık, diyagonal olmayan değerlerden daha büyüktür, 75'i aşarak, çalışma dönemi boyunca bölgesel karbon performansında güçlü bir istikrara işaret etmektedir. Buna karşılık, diyagonal olmayan olasılık değerleri daha küçüktür ve en yüksek değer %15,493'tür. Bu da şunu göstermektedir

karbon performansının mekânsal transferi, teknoloji ve politika açısından koordineli çabalar gerektiren kademeli bir süreçtir. ② İki köşegendeki olasılık değerleri %94,203 ve

98,361 ile orta sıralardaki %84,507'den önemli ölçüde yüksektir.

matrisi. Bu örüntü, birbirini takip eden yıllarda CP dağılımında bir "Matta etkisi" olduğunu göstermektedir. ③ Köşegen olmayan olasılıkların ortalamaları karşılaştırıldığında, aşağı yönlü transfer olasılığının bölgeler arası CP (%1,639), yukarı yönlü transfer olasılığından (%10,645) önemli ölçüde daha düşüktür. Bu, Çin'in düşük karbonlu dönüşümünde olumlu bir eğilime işaret etmektedir.

Mekânsal Markov zinciri geleneksel Markov zinciri ile karşılaştırıldığında olasılık değerlerinde kayda değer değişiklikler gözlenmekte, bu da CP'de komşu durumların kritik rolünün altını çizmektedir. İstatistiksel test $df = 3 \times (3 - 1)^2 = 12$, $\alpha = 0.005$, $Q_0 = 33.562 > \chi^2(12) = 28.300$. Bu sonuç, bölgesel CP türlerinin farklı olduğu yönündeki sıfır hipotezini reddetmektedir.

bağımsızdır. Bu nedenle, bölgesel CP türlerinin komşu eyaletlerle önemli mekânsal korelasyon sergilediği sonucuna varıyoruz. ① Komşuluk Durumu Analizi: Komşuluk durumu tip 3 olarak kategorize edildiğinde

Bölgesel karbon performansı transferi olasılığı, mahalle tip 1 olarak sınıflandırıldığında en yüksek (%11,111) ve en düşüktür (%4,061). Bu durum, bölgesel CP'nin mekânsal korelasyon sergilediğini, düşük karbonlu mahallelerin bölge içinde "karbon gelişimine" katkıda bulunma olasılığının daha yüksek olduğunu, yüksek karbonlu mahallelerin ise

"karbon kilitleme" etkisine sahip olması. ② İlk Durum Analizi: Başlangıç için 1., 2. ve 3. durumlarda, bölgelerin kendi durumlarını korumalarının ortalama olasılığı

orijinal karbon performans tipi sırasıyla %88,437, %86,917 ve %98,889'dur. Geleneksel Markov analizi ile karşılaştırıldığında, başlangıç durumu tip 1 olan bölgeler %5,766'lık gözle görülür bir düşüş yaşamaktadır. Bu durum, yüksek CP'ye sahip bölgelerin düşük CP'de daha az dalgalanma sergilediğini göstermektedir.

diğer bölgelere göre karbon gelişimi. ③ Geçiş Olasılığı

Analiz: Bir yandan, komşuluk durumu 1'den 3'e geçerken, bölgesel durumların yukarı doğru transfer olasılığı kademeli olarak artarken, aşağı doğru transfer olasılığı kademeli olarak azalarak bir "kulüp yakınsaması" olgusu sergilemektedir. Öte yandan, komşuluk tipi 1 olduğunda, başlangıç bölgesinin aynı CP tipini sürdürme olasılığı %96,907'dir ve komşuluk tipi 3 olduğunda olasılık 1'dir. Bu değerler geleneksel Markov analizinde gözlemlenen değerlerden (%94,203 ve %98,361) daha yüksektir. Bu da şu sonucu güçlendirmektedir

"Matthew etkisi." ④ Bölge Sayısı Analizi: Ne zaman komşuluk durumu 3 iken, 24 bölge (yaklaşık %50) düşük karbonlu t dönemi boyunca özellikler. Tersine, komşuluk durumu 1 olduğunda, yüksek karbonlu bölgeler %84,348'i oluşturmaktadır. Her iki durumda da, aynı CP türüne sahip bölgelerin sayısı %50'yi aşmaktadır, bu da bölgesel CP seviyelerinde işbirlikçi bir modele işaret etmektedir.

Tablo 11

Eşik modelinin sonucu.

Değişken	(1)	(2)	(3)	(4)
	Pazar	düzenleme	diginfra	BAĞIMLILIK
<i>enerdig</i> (pazar ≤ 9.2225)	0.083*** (0.028)			
<i>enerdig</i> (pazar > 9.2225)	0.181*** (0.030)			
<i>enerdig</i> (düzenleme ≤ 0.0006)		0.207*** (0.034)		
<i>enerdig</i> (düzenleme > 0.0006)		0.093*** (0.028)		
<i>enerdig</i> (diginfra ≤ 0.4377)			0.079*** (0.027)	
<i>enerdig</i> (diginfra > 0.4377)			0.205*** (0.029)	
<i>bağımsızlık</i> ≤ 0.0556)				0.026**
<i>enerdig</i>				0.012
<i>(bağımsızlık > 0.0556)</i>				(0.027)
<i>fdi</i>	0.010 (0.025)	-0.013 (0.026)	0.043* (0.025)	-0.023 (0.023)
<i>boyut</i>	0.672*** (0.082)	0.731*** (0.082)	0.597*** (0.080)	0.567*** (0.076)
<i>ŞEHİR</i>	1.066* (0.573)	1.036* (0.582)	0.750 (0.547)	0.808 (0.519)
<i>ins</i>	0.617*** (0.060)	0.629*** (0.061)	0.621*** (0.057)	0.606*** (0.054)
<i>trans</i>	-16.700*** (4.812)	-13.400*** (4.874)	-13.810*** (4.561)	-10.650** (4.352)
<i>sabit</i>	-1.052*** (0.264)	-1.114*** (0.268)	-0.875*** (0.254)	-0.767*** (0.242)
<i>N</i>	300	300	300	300
<i>R²</i>	0.672	0.661	0.703	0.732

5.4.2. Mekânsal etkilerin analizi

LM, Wald testi, LR ve Hausman dahil olmak üzere bir dizi istatistiksel teste dayanarak, sonuçları **Tablo 14**'te sunulan SDM'yi oluşturduk. Üç sabit etkili SDM'deki ρ katsayıları önemli ölçüde pozitifdir ve CP'nin mekânsal korelasyonuna dair daha fazla kanıt sağlamaktadır. Değişkenlerin önemi ve LR test sonuçları [127] göz önüne alındığında, odak noktamız sütun (3)'te gösterildiği gibi çift sabit etkili SDM'nin sonuçları olacaktır. Bu modelde, ED'nin $W \times \text{enerdig}$ için 0,200 katsayısı ile CP'yi olumlu yönde etkilediği açıktır. Bu bulgu, ED'nin komşu bölgeler üzerinde yayılma etkilerine sahip olduğunu göstermekte ve böylece bu makalede özetlenen **hipotez 4** için ön destek sunmaktadır.

Değişkenler arasındaki mekânsal geri tepme etkisi nedeniyle, mekânsal korelasyonun tam olarak yakalanmasının, değişkenlerin ve mekânsal etkileşim terimlerinin etkisinin incelenmesini ve aşağıdaki hususların dikkate alınmasını gerektirdiğini belirtmek önemlidir ED'nin çeşitli mekânsal etkileri. Bunu başarmak için dinamik SDM'yi uyguladık ve sonuçlar **Tablo 15**'te sunulmuştur. ① Mekânsal doğrudan etkiyle ilgili olarak, ED bölgesel kalkınmayı önemli ölçüde ve olumlu yönde etkilemektedir.

Tablo 12

Moran's I sonuçları.

Yıl	CP				Yıl	<i>enerdig</i>			
	I	Z	E(I)	sd(I)		I	Z	E(I)	sd(I)
2011-2012	0.174**	2.239	-0.034	0.093	2012	0.039	0.605	-0.034	0.121
2012-2013	0.167**	2.151	-0.034	0.094	2013	0.126*	1.308	-0.034	0.123
2013-2014	0.139**	1.908	-0.034	0.091	2014	0.107	1.138	-0.034	0.124
2014-2015	0.16**	2.102	-0.034	0.092	2015	0.256***	2.357	-0.034	0.123
2015-2016	0.15**	2.037	-0.034	0.091	2016	0.350***	3.163	-0.034	0.122
2016-2017	0.144**	2.05	-0.034	0.087	2017	0.213**	1.99	-0.034	0.124
2017-2018	0.141**	2.065	-0.034	0.085	2018	0.212**	1.977	-0.034	0.125
2018-2019	0.132**	1.966	-0.034	0.085	2019	0.277***	2.517	-0.034	0.124
2019-2020	0.116**	1.797	-0.034	0.084	2020	0.217**	2.029	-0.034	0.124
2020-2021	0.125**	1.900	-0.034	0.084	2021	0.150*	1.522	-0.034	0.121

CP. Daha da önemlisi, kısa ve uzun vadeli doğrudan etkilerde önemli bir değişiklik yoktur. Özellikle, ED'deki her %1'lik artış için, iç bölgenin CP'si kısa dönemde %0,066 artarken

Uzun vadede %0,051. ② Mekânsal yayılma etkisi ile ilgili olarak, ED dış bölgelerin CP'si üzerinde olumlu bir yayılma etkisi göstermektedir, bu makalede özetlenen **hipotez 4**'ü destekleyen güçlü kanıtlar sağlamaktadır. Bu yayılma etkisi, sırasıyla 0,232 ve 0,188'lik elastik katsayılarla kısa dönemde daha belirgindir. Bunun olası nedeni, uzun vadede bölgeler arasında işbirliğine dayalı dijital stratejiler kurmanın daha kolay olması, bunun da eş etkilerin neden olduğu yayılma etkisini zayıflatması ve sonuç olarak uzun vadede

mekânsal yayılma etkisi. ③ Mekânsal toplam etki ile ilgili olarak, bir nedenle hem uzun hem de kısa vadede önemli olumlu etki yaratacaktır. pozitif doğrudan ve yayılan mekânsal etkilerin birikimi.

5.5. Sağlamlık testi

Sağlamlık testi açısından, bu çalışmada sonuçların sağlamlığını değerlendirmek için dört farklı test gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonuçları **Tablo 16**'da sunulmuştur. Dört sağlamlık testi, temel bağımsız değişkenin değiştirilmesini, bağımlı değişkenin ikame edilmesini, örneklem döneminin azaltılmasını ve uç değerlerin ele alınmasını içermektedir.

Sonuçlar aşağıdaki gibidir: ① Temel bağımsız değişkeni değiştirin. İçinde (1) numaralı sütunda, temel bağımsız değişken ED'nin yerini pro-Enerji işletmelerindeki maddi olmayan varlıkların oranı (*digreplac*), işletmelerin dijitalleşme derecesi için bir vekil olarak hizmet edebilir. Sonuçlar, enerji işletmelerindeki maddi olmayan varlıkların oranının önceki sonuçların güvenilirliğini teyit eder şekilde CP ile pozitif ilişkilidir; ② Bağımlı değişkeni değiştirin. Sütun (2)'de, kişi başına karbon emisyonları ters ikame değişken olarak tanıtılmıştır.

Guo ve diğerlerini [43] takip ederek düşük karbonlu ekonomik kalkınma için uygundur.

Analiz, ED'nin kişi başına karbon emisyonlarını etkili bir şekilde azalttığını ortaya koymakta ve daha önceki bulguları desteklemektedir: ③ Örneklem dönemini azaltın. Sütun (3), örneklem dönemi hariç tutulduktan sonraki tahmin sonuçlarını sunmaktadır.

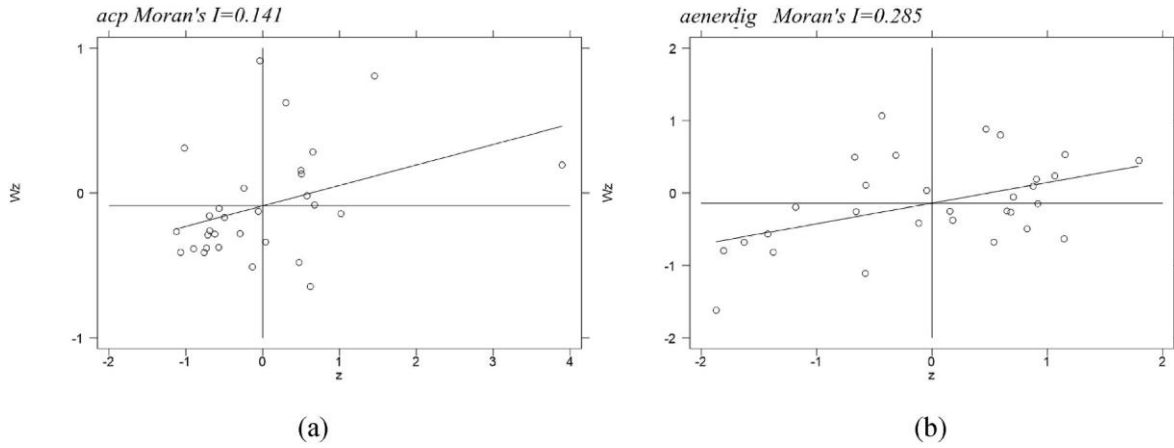
Araştırma örneklemine ilk ve son dönemleri, 2013'ten 2020'ye kadar olan veriler korunarak. Değişkenlerin katsayıları ve anlamlılık düzeyleri aşağıdaki gibi kalmıştır

önceki bulgularla tutarlı olup, bu azaltılmış örneklem dönemi boyunca sonuçların sağlamlığını göstermektedir; ④ Uç değerlerin elenmesi. Luo ve diğerlerinden [47] esinlenerek, tüm değişkenler için %5 uç değerler aykırı değerlerin etkisini azaltmak için çıkarılmıştır. Bu yaklaşım, sütun (4)'te gösterildiği gibi bulguların güvenilirliğini artırmaktadır.

5.6. Tartışma

Bu çalışma, enerjide dijitalleşmenin CP üzerindeki çok yönlü etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Amaç, düşük karbonlu kalkınma potansiyelinin altını çizerek, dijital güdümlü bir enerji sistemini dönüştürmek için ampirik kanıtlar ve politika rehberliği sağlamaktır.

Bir yandan, mevcut literatürdeki araştırma paradigmalarına paralel olarak [47,96], dijitalleşmenin çok boyutlu etkisi düşük GELİŞİM var olmuş kapsamlı bir incelendi. karbonlu ur şekilde



Şekil 5. *acp* (CP'nin ortalama değeri) (a) ve *aenerdig* (*enerdig*'in ortalama değeri) (b) Moran dağılım grafikleri.

Tablo 13

Mekânsal Markov modelinin sonuçları.

Markov Tipi	Mahalle Tipi	t/t+1	1	2	3	n
Geleneksel Markov	\	1	0.942	0.058	0.000	138
		2	0.000	0.845	0.155	71
		3	0.000	0.016	0.984	61
Mekânsal Markov	1	1	0.969	0.031	0.000	97
		2	0.000	0.909	0.091	11
		3	0.000	0.000	1.000	7
	2	1	0.906	0.094	0.000	32
		2	0.000	0.810	0.190	42
		3	0.000	0.033	0.967	30
	3	1	0.778	0.222	0.000	9
		2	0.000	0.889	0.111	18
		3	0.000	0.000	1.000	24

Mikroskobik verilere dayanan ampirik sonuçlar, dijitalleşmenin düşük karbon potansiyelini ve bölgesel heterojenliğin etkisini doğrulamaktadır [95]. Aynı zamanda, bulgularımız enerji teknolojisi inovasyonunun pozitif bir aktarım mekanizması olarak hareket ettiğini ve teknoloji inovasyonundaki mevcut aracı rolü için sağlam kanıtlar sunduğunu göstermektedir [62]. Buna ek olarak, analizimiz CP'nin mekânsal korelasyon özellikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Mekânsal aktarım yoluyla dijitalleşme, [128] çalışmasıyla tutarlı olarak bölgesel dış CP seviyeleri üzerinde pozitif bir mekânsal etki yaratabilir ve dijitalleşmenin mekânsal etkilerinin daha fazla araştırılması için teorik bir temel oluşturur.

Öte yandan, araştırmamız beklenmedik bazı sonuçlar ve yeni katkılar sağlamıştır. İlk olarak, bu çalışma, enerji sektörünün dijitalleşmesine yönelik ilk nicel araştırmayı temsil etmekte ve genel endüstriyel [50], imalat sektörü dijitalleşmesi [129] ve tarıma [130] odaklanan önceki çalışmaların üzerine inşa edilen endüstriyel dijitalleşme üzerine teorik araştırmaları artırmaktadır. Özellikle çalışmamız, Zhao ve diğerlerinin [104] ve Cheng ve diğerlerinin [55] önceki çalışmalarının bulgularından farklı olarak, enerji dijitalleşmesi ile CP arasındaki ters U şeklindeki ilişkiyi desteklemektedir. Bu durum, enerji dijitalleşmesinin potansiyel olarak faktör bileşimlerini yeniden yapılandırdığı ve endüstriyel organizasyon biçimlerini derinleştirdiği, endüstrinin düşük karbonlu geçişini teşvik ettiği ve ekonomilerin Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) dönüm noktasını aşması için önemli bir nokta olarak hizmet ettiği karbon emisyonları ve ekonomik faydaların ikili değerlendirmesine bağlanabilir. İkinci olarak, aracı regresyon sonuçları enerji yapısı ve enerji kullanım verimliliğinin pozitif aktarım mekanizmasını doğrulamakta, böylece dijital karbon azaltımına ilişkin mekanizma araştırmasını zenginleştirmekte ve hükümet politikası formülasyonu için yeni yönler sunmaktadır. Üçüncü olarak, piyasalaşmanın [52] ve çevresel düzenlemenin düzenleyici rolleri üzerine mevcut çalışmalara dayanarak

Tablo 14

Sonuçlar SDM model regresyonu.

Değişken	(1)	(2)	(3)
	ind	zaman	her ikisi de
<i>enerdig</i>	0.083*** (0.021)	0.084** (0.036)	0.093*** (0.021)
<i>fdi</i>	0.058*** (0.019)	0.092*** (0.021)	0.046** (0.019)
<i>boyut</i>	0.204*** (0.064)	-0.279*** (0.079)	0.143** (0.067)
<i>ŞEHİR</i>	-3.271*** (0.970)	-2.135*** (0.573)	-3.659*** (0.973)
<i>ins</i>	0.577*** (0.066)	0.767*** (0.045)	0.544*** (0.070)
<i>trans</i>	1.550*** (0.102)	1.721*** (0.180)	1.630*** (0.104)
<i>W×enerdig</i>	0.138*** (0.040)	0.045 (0.088)	0.200*** (0.052)
<i>W×fdi</i>	0.095* (0.049)	0.222*** (0.086)	-0.037 (0.064)
<i>G×boyut</i>	0.072 (0.129)	0.764*** (0.230)	-0.277 (0.192)
<i>W×şehir</i>	-18.160*** (2.230)	-2.299 (1.944)	-20.400*** (2.516)
<i>W×ins</i>	0.391*** (0.144)	-0.223 (0.180)	0.331 (0.234)
<i>W×trans</i>	1.727*** (0.306)	-1.362*** (0.440)	2.417*** (0.361)
ρ	-0.347*** (0.105)	0.201** (0.098)	-0.453*** (0.106)
σ^2	0.018*** (0.002)	0.121*** (0.010)	0.017*** (0.001)
<i>N</i>	300	300	300
<i>Log-Likelihood</i>	172.498	-109.645	182.333
<i>LR-ind</i>	19.670**		
<i>LR zamanı</i>	583.960***		

[93], araştırmamız dijitalleşme ve düşük karbonlu kalkınma arasındaki doğrusal olmayan ilişkiye dair mevcut araştırma boşluğunu ele alarak dijitalleşmede dış altyapı ve enerji bağımlılığındaki heterojenliği daha fazla araştırmaktadır. Bu, bölgeye özgü enerji dijitalleştirme politikasının formülasyonu için teorik temeller sağlamaktadır. Son olarak, mekânsal Markov zinciri analizi, Çin'in bölgesel CP'sinin mekânsal-zamansal dağılımında "Matthew etkisi" ve "kulüp güdümlü" olguların varlığını ortaya koymaktadır. Bu, Moran endeksi tarafından oluşturulan mekânsal korelasyonların ötesine geçerek CP'nin mekânsal ve zamansal dağılım özelliklerinin anlaşılmasını zenginleştirmektedir [47,55]. Enerji dijitalleşmesinin kısa vadeli mekânsal etkisinin, uzun vadeli mekânsal etkilere kıyasla daha belirgin olması dikkat çekicidir. Bu bulgu, enerjinin dijitalleşmesinin mekânsal etkilerine ilişkin mevcut araştırmaları tamamlamaktadır.

Tablo 15

Mekânsal etkinin ayrıştırılması.

Değişken	Kısa vadeli mekansal etkiler			Uzun vadeli mekansal etkiler		
	Doğrudan	Yayımla	Toplam	Doğrudan	Yayımla	Toplam
<i>enerdig</i>	0.066*** (0.022)	0.232*** (0.051)	0.298*** (0.058)	0.051** (0.024)	0.188*** (0.042)	0.238*** (0.044)
Kontrol değişkenleri	Kontrol					
ρ	0.220*					
σ^2	(0.132)					
	0.016*** (0.001)					
Log- Olabilirlik	-4404.537					

Tablo 16

Sağlamlık testinin sonuçları.

Değişken	(1)	(2)	(3)	(4)
	X. değiştirin	Y. değiştirin	Timecut	Winsor
<i>digreplac</i>	25.720* (15.140)			
<i>enerdig</i>		-0.034*** (0.007)	0.109*** (0.032)	0.119*** (0.029)
<i>fdi</i>	0.016 (0.027)	-0.014*** (0.004)	0.034 (0.035)	0.008 (0.026)
<i>boyut</i>	0.760*** (0.088)	0.093*** (0.015)	0.632*** (0.093)	0.753*** (0.084)
<i>ŞEHİR</i>	0.912 (0.668)	0.305*** (0.075)	0.515 (0.763)	1.218** (0.606)
<i>ins</i>	0.721*** (0.062)	-0.050*** (0.009)	0.625*** (0.072)	0.619*** (0.063)
<i>trans</i>	-8.800* (5.151)	-0.420 (0.383)	-11.700** (5.774)	-14.230*** (5.138)
<i>sabit</i>	-1.150*** (0.310)	0.017 (0.036)	-0.856** (0.345)	-1.300*** (0.274)
<i>N</i>	300	300	240	300
<i>R²</i>	0.614	0.586	0.590	0.632

dijitalleşme ve bölgeler arası dijital dönüşüm işbirliği stratejilerine önemli teorik katkılar sunmaktadır.

6. Sonuç ve çıkarımlar

6.1. Sonuçlar

Enerji sektörü, gelişen dijital teknoloji devrimi ve endüstriyel metamorfozun damgasını vurduğu, düşük karbonlu kalkınma için sağlam bir itici güç oluşturan dönüştürücü bir aşamadan geçmektedir. Çin'den 2012-2021 yıllarını kapsayan il verilerini kullanan bu çalışma, teorik analiz ve ampirik testler yoluyla ED ile düşük karbonlu bir ekonomi geliştirme arasındaki karmaşık etkileşimi çözmeye çalışmaktadır. Bulgularımız

Sonuçlar dört önemli içgörü ile sonuçlanmaktadır: ① Enerji dijitalleşme işareti-CP'yi önemli ölçüde artırır; bu, içsellik araştırması yapıldıktan sonra bile geçerli bir sonuçtur.

ve sağlamlık değerlendirmeleri. Ayrıca, heterojenlik analizleri şunları ortaya koymaktadır

bu olumlu etkinin Çin'in doğu bölgelerinde ve 2015'ten sonraki yıllarda daha belirgin olduğunu göstermektedir. ② Enerji dijitalleşmesi, enerji teknolojisini yenileyerek ve temiz enerji yapısını iyileştirerek CP'yi dolaylı olarak etkilemektedir,

ve enerji kullanım verimliliğinin artırılması. Özellikle, enerji kullanım verimliliğindeki gelişmeler en etkili faktör olarak ortaya çıkmaktadır. ③ ED ve CP arasındaki ilişki doğrusal değildir ve aşağıdakilerden etkilenir dış çevresel faktörler. Olgun pazarların varlığı, uygun çevre düzenlemeleri, gelişmiş dijital altyapı ve kaynaklara olan bağımlılığın azalması daha elverişli bir ortam yaratma eğilimindedir.

Bu ilişki için ortam. ④ Hem ED hem de CP farklı özellikler sergiler mekansal birleştirme özellikleri. Enerji dijitalleşmesi sadece kendi bölgesi içinde CP'yi artırır, ancak aynı zamanda komşu bölgelerdeki CP üzerinde de olumlu yayılma etkileri yaratır ve bu etkiler kısa vadede daha belirgindir.

6.2. Politika çıkarımları

Yukarıdaki bulgular ışığında, üç düzeyde politika çıkarımları öneriyoruz.

Ulusal düzeyde, ED stratejisini ilerletmek, enerji sektörlerinin dijitalleşmesini hızlandırmak ve enerji sistemlerinin temiz ve akıllı gelişimini sağlamak için dijitalleşme ile karakterize edilen yeni güç sistemleri inşa etmek için acil bir ihtiyaç vardır. İlk olarak, ED için gerekli donanım desteğini sağlayarak enerji endüstrisinde dijital altyapı inşasını güçlendirmek esastır. Bu da akıllı üretim, enerji interneti, akıllı şebekeler ve enerji büyük verisi gibi kritik alanlarda belirli eylemlerin uygulanmasını gerektirmektedir. İkinci olarak, "çift karbon" hedefi doğrultusunda, dijital ve enerji teknolojisinin entegrasyon inovasyonunun teşvik edilmesi gerekmektedir. Bu, enerji tasarrufu, çevre koruma, yeni enerji, enerji depolama, dağıtılmış enerji ve daha fazlası gibi alanlarda dijitalleşmenin hızlı gelişimini teşvik etmeyi içerir. Bu çabalar enerji sektörünün gelişim kalitesini ve verimliliğini artıracaktır. Makro düzeydeki stratejiler, veri ve süreçlerle desteklenen yenilenebilir enerji santrallerinin inşasında, geleneksel güç tedarikinde karbon emisyonu yönetiminin dijital yollarla optimize edilmesinde ve yenilenebilir enerjiyi destekleyen çok seviyeli güç sistemi operasyonlarının akıllı optimizasyonunun geliştirilmesinde araştırılabilir.

Bölgesel düzeyde, hükümetler ED için destekleyici bir düzenleyici ortam yaratmak üzere kurumsal gelişime odaklanmalıdır. Bölgesel hükümetler çevresel düzenleme yoğunluğu, piyasa rekabet seviyeleri, dijital altyapı inşası ve karbon emisyonu azaltma hedeflerine dayalı kapsayıcı, farklılaştırılmış ve kesin bir politika çerçevesi oluşturmalıdır. Aşırı devlet müdahalesi yerine, piyasa odaklı reformların teşvik edilmesi, doğrudan kaynak tahsisinin azaltılması ve ED için elverişli bir kurumsal ortamın geliştirilmesi için idari tekellere kaçınılması üzerinde durulmalıdır. Ayrıca, ED'nin CP üzerindeki mekansal etkileri göz önünde bulundurularak, bölgeler arası hükümetler dijitalleşmenin bölgesel faydalarından etkin bir şekilde yararlanmak için dijital ağlar kurma konusunda işbirliği yapmalıdır. Dijital bariyerlerin yıkılması, bölgeler arası enerji ağlarının kurulması ve özellikle doğu ve kuzeydoğu bölgeleri arasında farklı bölgelerin göreceli güçlerinin vurgulanması elzemdir. Doğru ve orta bölgeler arasındaki dijital altyapı ve kaynak donanımı farklılıkları göz önüne alındığında, orta ve batı bölgelerin dijital dönüşümün karbon emisyonu azaltma potansiyelini tam olarak gerçekleştirebilmesi için ek desteğe ihtiyacı olabilir. Orta ve batı bölgelerdeki yenilenebilir enerji altyapısını optimize ederken doğu bölgesinin finansal ve teknolojik avantajlarından yararlanmak temiz enerjinin benimsenmesini artırabilir.

Kurumsal düzeyde, ED'nin kilit oyuncularını olarak enerji şirketleri şunları yapmalıdır

Kaçınılmaz dijital dönüşüm trendine proaktif bir şekilde yanıt verilmelidir. İşletmeler, sanayi-üniversite-araştırma işbirliği stratejilerine aktif olarak katılmalı, üniversiteler ve enerji araştırma enstitüleri ile ortaklıkları güçlendirmeli, dijital okuryazarlığı artırmalı ve dijital inovasyon yeteneklerini desteklemelidir. Araştırma ve geliştirmeye yatırım yapılması, dijital teknolojinin enerji tedarik zinciri boyunca uygulanmasına odaklanılması, örneğin akıllı şebekelerde inovasyonun teşvik edilmesi acil bir ihtiyaçtır.

ve iletim için çoklu enerji tamamlayıcı teknolojisi ve dağıtım için sanal enerji santrallerinin ve elektrik enerjisi ikame teknolojisinin geliştirilmesinin teşvik edilmesi. Şirketler ayrıca enerji verilerinde inovasyona odaklanmalı ve uygulamalarını derinleştirmelidir. Bu, kaynak planlaması, izleme yönetimi, derinlemesine analiz gibi kritik teknolojilerdeki atılımları ve Nesnelerin İnterneti, yapay zeka, blok zinciri, büyük veri, uç bilişim ve dijital ikizler gibi en son teknolojilerin temel iş süreçleriyle entegrasyonunu içerir. Ayrıca, enerji şirketleri dijital stratejilerini uyarlamalı, organizasyon yapılarını ve operasyonel mekanizmalarını iyileştirmeli ve dijital teknolojilerin iş stratejileri ve hedefleriyle sorunsuz entegrasyonunu kolaylaştırmalıdır. ED için çeşitli bir yetenek havuzu geliştirmek çok önemlidir. Çalışanların dijital teknoloji kazanımlarını uygulama yeterliliklerini artırmaya teşvik edilmesi ve teknik alışveriş ve işbirliğinin teşvik edilmesi, ED'nin düşük karbonlu kalkınma faydalarını tam olarak gerçekleştirmek için gerekli adımlardır.

6.3. Sınırlamalar ve geleceğe yönelik yönlendirmeler

Dijital dönüşümün CP üzerindeki etkisini derinlemesine inceledik, ancak çalışmamızdaki bazı sınırlamaları kabul etmek önemlidir. İlk olarak, enerji sektörüne ilişkin güvenilir verilerin bulunmaması ve halka açık olmayan şirketlere ilişkin verilerin hariç tutulması, özellikle gelişmiş ekonomilerle karşılaştırıldığında bulgularımızın uygulanabilirliğini sınırlayabilir. İkinci olarak, konunun karmaşıklığı ve içerdiği titiz matematiksel ilişkiler göz önüne alındığında, aracı etkide içselliğin ele alınması daha etkili bir şekilde ele alınabilirdi. Endojenlik, ekonometride iyi bilinen bir zorluktur. Son olarak, bu makalede oluşturulan dijital dönüşüm sözlüğünün, dijital ekonominin hızlı evrimi nedeniyle gelecekteki araştırmalarda periyodik olarak güncellenmesi gerekebilir.

Gelecekteki çalışmalarda, bu makalede geliştirilen araştırma çerçevesi kültür endüstrisi, tarım kültürü, turizm veya diğer gelişmekte olan ülkeler gibi farklı endüstrilere genişletilebilir. Bu genişleme, farklı bağlamlarda dijital dönüşüm ve CP arasındaki ilişkiye dair anlayışımızı daha da zenginleştirecektir. Ekonometrik modellerdeki içsellik sorunlarını hafifletmek için, temel değişkenler arasında sağlam bir matematiksel model oluşturmak amacıyla teorik analiz ve matematiksel üretmeyi birleştirmek umut verici bir yaklaşımdır. Ayrıca, araştırmayı güncel tutmak için her yıl dijital dönüşüm ve endüstriyel kalkınma planlaması ile ilgili politika metinlerinden kritik terimleri yakalayarak anahtar kelime analizinin düzenli olarak güncellenmesi tavsiye edilmektedir. Bu, gelecekteki çalışmalarda dijital dönüşüm vo- cabulary'sinin sürekli olarak genişletilmesine olanak sağlayacaktır.

Finansman

Bu çalışma Çin Ulusal Sosyal Bilimler Fonu (23CGL041) tarafından desteklenmiştir.

Veri ve materyallerin mevcudiyeti

Makul gerekliliklere ilişkin veriler mevcuttur.

Yazar beyanı

Kavramsallaştırma: [Shi Ziyi]; Metodoloji: [Shi Ziyi, Lawrence Loh]; Yazılım: [Shi Ziyi, Han Dongri]; Veri Küratörlüğü: [Shi Ziyi, Lawrence Loh]; Yazım- orijinal taslak: [Shi Ziyi, Lawrence Loh]; Yazım- gözden geçirme ve düzenleme: [Shi Ziyi]; Süpervizyon: [Shi Ziyi, Lawrence Loh]; Görselleştirme: [Shi Ziyi, Han Dongri]; Gözden geçirme: [Shi Ziyi, Wu Hongshuang]

Rekabetçi çıkar beyanı

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek bilinen herhangi bir rakip finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan etmektedir.

Veri kullanılabilirliği

Veriler talep üzerine kullanıma sunulacaktır.

Teşekkür

Bu makaleyi inceleyen editörlere ve anonim hakemlere çok teşekkür ederiz.

References

- [1] S.Y. Ren, Y. Hao, L. Xu, H.T. Wu, N. Ba, Digitalization and energy: how does internet development affect China's energy consumption? *Energy Econ.* 98 (2021) 105220.
- [2] M. Murshed, N. Apergis, M.S. Alam, U. Khan, S. Mahmud, The impacts of renewable energy, financial inclusivity, globalization, economic growth, and urbanization on carbon productivity: evidence from net moderation and mediation effects of energy efficiency gains, *Renew. Energy* 196 (2022) 824–838.
- [3] G.C. Fang, Z.Y. Gao, C.W. Sun, How the new energy industry contributes to carbon reduction? -Evidence from China, *J. Environ. Manag.* 329 (2023) 117066.
- [4] X.G. Zhao, L. Xu, Y. Zhou, How to promote the effective implementation of China's Renewable Portfolio Standards considering non-neutral technology? *Energy* 238B (2022) 121748.
- [5] Z. Jan, F. Ahamed, W. Mayer, N. Patel, G. Grossmann, M. Stumptner, A. Kuusk, How to promote the effective implementation of China's Renewable Portfolio Standards considering non-neutral technology? *Expert Systems With Applications* 216 (2023) 119456.
- [6] Q. Wu, Digital transformation of energy enterprises: the role of the "sixth energy" is highlighted, *Energy* 1 (2022) 36–39.
- [7] M. Shahbaz, J.D. Wang, K.Y. Dong, J. Zhao, The impact of digital economy on energy transition across the globe: the mediating role of government governance, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 166 (2022) 112620.
- [8] Y. Lyu, Y. Wu, G. Wu, W.Q. Wang, et al., Digitalization and energy: how could digital economy eliminate energy poverty in China? *Environ. Impact Assess. Rev.* 103 (2023) 107243.
- [9] L. Ha, Are digital business and digital public services a driver for better energy security? Evidence from a European sample, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 29 (18) (2023) 27232–27256.
- [10] D.H. Husaini, H.H. Lean, Digitalization and energy sustainability in ASEAN, *Resour. Conserv. Recycl.* 184 (2022) 106377.
- [11] Q. Xu, M.R. Zhong, X. Li, How does digitalization affect energy? *International Evidence, Energy Econ.* 107 (2022) 105879.
- [12] K.H. Choi, G.H. Kwon, A study on the strategy of digital technology utilization in energy sector's new industries: from the perspective of technology convergence patterns, innovation effects and prediction, *Journal of Korea Technology Innovation Society* 24 (2) (2021) 1–21.
- [13] H.Y. Zhang, S.Z. Gao, P. Zhou, Role of digitalization in energy storage technological innovation: evidence from China, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 171 (2022) 113014.
- [14] K. Li, X.B. Cao, Research on the formation mechanism of digital resilience capability of energy enterprises, *Energy of China* 43 (7) (2021) 73–80.
- [15] R.J. Zheng, G. Wu, Y. Cheng, H.M. Liu, How does digitalization drive carbon emissions? The inverted U-shaped effect in China, *Environ. Impact Assess. Rev.* 102 (2023) 107203.
- [16] C. Ancillai, A. Sabatini, M. Gatti, A. Perna, Digital technology and business model innovation: a systematic literature review and future research agenda, *Technol. Forecast. Soc. Change* 188 (2023) 122307.
- [17] X. Li, T. Wu, H.J. Zhang, D.Y. Yang, Digital technology adoption and sustainable development performance of strategic emerging industries: the mediating role of digital technology capability and the moderating role of digital strategy, *Journal of Organizational And User Computing* 34 (8) (2023) 315645.
- [18] G.H. Zhou, C. Zhang, Z. Li, K. Ding, C. Wang, Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing, *Int. J. Prod. Res.* 58 (4) (2020) 1034–1051.
- [19] M. Kohtamaki, V. Parida, P. Oghazi, H. Gebauer, T. Baines, Digital servitization business models in ecosystems: a theory of the firm, *J. Bus. Res.* 104 (2019) 380–392.
- [20] T. He, M.J. Liu, C.W. Phang, J. Luo, Toward social enterprise sustainability: the role of digital hybridity, *Technol. Forecast. Soc. Change* 175 (2021) 121360.
- [21] F. Donati, S.M.R. Dente, C. Li, X. Vilaysouk, A. Froemelt, et al., The future of artificial intelligence in the context of industrial ecology, *J. Ind. Ecol.* 26 (4) (2022) 1175–1181.
- [22] S.C. Liu, J.C. Tan, S.X. Zhang, H.C. Lin, Can corporate digital transformation promote input-output efficiency? *Journal of Management World* 37 (5) (2021) 170–190+13.
- [23] C. Gaglio, E. Kraemer-Mbula, E. Lorenz, The effects of digital transformation on innovation and productivity: firm-level evidence of South African manufacturing micro and small enterprises, *Technol. Forecast. Soc. Change* 182 (2022) 121785.
- [24] N. Li, X.H. Wang, Z.R. Wang, X.Y. Luan, The impact of digital transformation on corporate total factor productivity, *Front. Psychol.* 13 (2022) 1071986.
- [25] J. Torrent-Sellens, A. Diaz-Chao, A.P. Miro-Perez, J. Sainz, Towards the Tyrell corporation? Digitisation, firm-size and productivity divergence in Spain, *Journal of Innovation & Knowledge* 7 (2) (2022) 100185.
- [26] H.Y. Deng, G. Bai, Z.Y. Shen, Digital economy and its spatial effect on green productivity gains in manufacturing: evidence from China, *J. Clean. Prod.* 378 (2022) 134539.
- [27] W.R. Pan, T. Xie, Z.W. Wang, L.S. Ma, Digital economy: an innovation driver for total factor productivity, *J. Bus. Res.* 139 (2022) 303–311.
- [28] X.H. Ren, G.D. Zeng, G. Gozgor, How does digital finance affect industrial structure upgrading? Evidence from Chinese prefecture-level cities, *J. Environ. Manag.* 330 (2023) 117125.
- [29] K.Z. Dai, Z. Huang, S.M. Wang, Does the digital economy promote the structural upgrading of the Chinese service industry? *Journal of Quantitative & Technological Economics* 40 (2) (2023) 90–112.
- [30] T.L. Wu, W. Shao, How does digital economy drive industrial structure upgrading: an empirical study based on 249 prefecture-level cities in China, *PLoS One* 17 (11) (2023) e0277787.
- [31] Q.W. Fu, How does digital technology affect manufacturing upgrading? Theory and evidence from China, *PLoS One* 17 (5) (2022) e0267299.
- [32] D.X. Kan, L.J. Lyu, W.C. Huang, W.Q. Yang, Digitalization and energy: evidence from the global value chain of China's service industry, *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research* 17 (4) (2023) 1279–1296.
- [33] X.C. Xu, M.H. Zhang, Research on the scale measurement of China's digital economy: based on the perspective of international comparison, *China Industrial Economics* (5) (2020) 23–41.
- [34] Y.Z. Cai, X.X. Niu, Scale measurement and structural analysis of the value-added of China's digital economy, *Soc. Sci. China* (11) (2021) 4–30+204.
- [35] J.Z. Zhang, W.Q. Zhao, B.D. Cheng, A.X. Li, Y.Z. Wang, et al., The impact of digital economy on the economic growth and the development strategies in the post-COVID-19 era: evidence from countries along the "belt and road", *Front. Public Health* 10 (2022) 856142.
- [36] H. Mahmood, CO₂ emissions, financial development, trade, and income in north America: a spatial panel data approach, *Sage Open* 10 (4) (2020).
- [37] H. Mahmood, The spatial analyses of consumption-based CO₂ emissions, exports, imports, and FDI nexus in GCC countries, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 29 (32) (2022) 48301–48311.
- [38] H. Mahmood, N. Saqib, A.H. Adow, M. Abbas, FDI, exports, imports, and consumption-based CO₂ emissions in the MENA region: spatial analysis, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 30 (25) (2023) 67634–67646.
- [39] H. Mahmood, N. Saqib, A.H. Adow, M. Abbas, Oil and natural gas rents and CO₂ emissions nexus in MENA: spatial analysis, *PeerJ* 11 (2023) e15708.
- [40] T.C. Li, Z.Y. Shi, D.R. Han, Does renewable energy consumption contribute to the development of low-carbon economy? Evidence from China, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 28 (39) (2021) 54891–54908.
- [41] H. Mahmood, M. Furqan, N. Saqib, A.H. Adow, et al., Innovations and the CO₂ emissions nexus in the MENA region: a spatial analysis, *Sustainability* 15 (13) (2023) 10729.
- [42] Y.H. Zhao, Z.Y. Zhao, Z.L. Qian, L. Zheng, Is cooperative green innovation better for carbon reduction? Evidence from China, *J. Clean. Prod.* 394 (2023) 136400.
- [43] Q.B. Guo, Y. Wang, X.B. Dong, Effects of smart city construction on energy saving and CO₂ emission reduction: evidence from China, *Appl. Energy* 313 (2022) 118879.
- [44] J. Wang, K. Dong, X. Dong, F. Taghizadeh-Hesary, Assessing the digital economy and its carbon-mitigation effects: the case of China, *Energy Econ.* 113 (2022) 106198.
- [45] W.X. Xu, J.P. Zhou, C.J. Liu, The impact of digital economy on urban carbon emissions: based on the analysis of spatial effects, *Geogr. Res.* 41 (1) (2022) 111–129.
- [46] J.L. Liu, Q.H. Yu, Y.Y. Chen, J.G. Liu, The impact of digital technology development on carbon emissions: a spatial effect analysis for China, *Resour. Conserv. Recycl.* 185 (2022) 106445.
- [47] K. Luo, Y.B. Liu, P.F. Chen, M.L. Zeng, Assessing the impact of digital economy on green development efficiency in the Yangtze River Economic Belt, *Energy Econ.* 112 (2022) 106127.
- [48] Y.W. Lyu, W.Q. Wang, Y. Wu, J.N. Zhang, How does digital economy affect green total factor productivity? Evidence from China, *Sci. Total Environ.* 857 (2) (2023) 159428.
- [49] Q. Xu, M.R. Zhong, M.Y. Cao, Does digital investment affect carbon efficiency? Spatial effect and mechanism discussion, *Sci. Total Environ.* 827 (2022) 154321.
- [50] S. Kunkel, M. Matthes, Digital transformation and environmental sustainability in industry: putting expectations in Asian and African policies into perspective, *Environ. Sci. Pol.* 112 (2020) 318–329.
- [51] Z.D. Shabani, R. Shahnazi, Energy Consumption, Carbon Dioxide Emissions, Information and Communications Technology, and Gross Domestic Product in Iranian Economic Sectors: a Panel Causality Analysis, 169, 2019, pp. 1064–1078.
- [52] Z. Yang, W.J. Gao, Q. Han, L.Y. Qi, Y.J. Cui, Y.Q. Chen, Digitalization and carbon emissions: how does digital city construction affect China's carbon emission reduction? *Sustain. Cities Soc.* 87 (2022) 104201.
- [53] A.M. Hao, Y.R. Hou, J.Y. Tan, How does digital village construction influences carbon emission? The case of China, *PLoS One* 17 (12) (2022) e0278533.
- [54] Z.G. Li, J. Wang, The dynamic impact of digital economy on carbon emission reduction: evidence city-level empirical data in China, *J. Clean. Prod.* 351 (2022) 131570.
- [55] Y. Cheng, Y. Zhang, J.J. Wang, J.X. Jiang, The impact of the urban digital economy on China's carbon intensity: spatial spillover and mediating effect, *Resour. Conserv. Recycl.* 189 (2022) 106762.
- [56] X.L. Hao, S.F. Wen, Y.H. Li, Y.P. Xu, Y. Xue, Can the digital economy development curb carbon emissions? Evidence from China, *Front. Psychol.* 13 (2022) 938918.
- [57] L. Zhang, R.Y. Mu, Y.F. Zhan, J.H. Yu, L.Y. Liu, Y.S. Yu, J.X. Zhang, Digital economy, energy efficiency, and carbon emissions: evidence from provincial panel data in China, *Sci. Total Environ.* 852 (2022) 158403.
- [58] C. Semeraro, A.G. Olabi, H. Aljaghoub, A.H. Alami, M. Al Radi, M. Dassisi, M. A. Abdelkareem, Digital twin application in energy storage: trends and challenges, *J. Energy Storage* 58 (2023) 106347.
- [59] A. Polyanska, S. Savchuk, I. Zapukhliak, et al., Digital maturity of the enterprise as an assessment of its ability to function in industry 4.0, *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2022) 209–227.
- [60] C. Park, S. Cho, W. Heo, Study on the future sign detection in areas of academic interest related to the digitalization of the energy industry, *J. Clean. Prod.* 313 (2021) 127801.
- [61] J.Q. Wang, X.H. Nghiem, F. Jabeen, A. Luqman, M.L. Song, Integrated development of digital and energy industries: paving the way for carbon emission reduction, *Technol. Forecast. Soc. Change* 187 (2023) 122236.
- [62] D.R. Han, Y.Y. Ding, Z.Y. Shi, Y. He, The impact of digital economy on total factor carbon productivity: the threshold effect of technology accumulation, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 29 (37) (2022) 55691–55706.
- [63] H. Mahmood, M. Furqan, M.S. Hassan, S. Rej, The environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis in China: a review, *Sustainability* 15 (7) (2023) 6110.
- [64] H. Mahmood, M.S. Hassan, S. Rej, M. Furqan, The environmental Kuznets Curve and renewable energy consumption: a review, *Int. J. Energy Econ. Pol.* 13 (3) (2023) 279–291.
- [65] L. Chen, M.Z. Li, Q.Y. Xue, Realistic constraints and path selection of data element market construction, *Reforma* (1) (2023) 83–94.

- 65] S.Y. Luo, N. Yimamu, Y.R. Li, H.T. Wu, et al., Digitalization and sustainable development: how could digital economy development improve green innovation in China? *Bus. Strat. Environ.* 32 (4) (2022) 1847–1871.
- [67] X. Xiao, Y.D. Qi, Value dimension and theoretical logic of industrial digital transformation, *Reforma* (8) (2019) 61–70.
- [68] M. Kolloch, D. Dellermann, Digital innovation in the energy industry: the impact of controversies on the evolution of innovation ecosystems, *Technol. Forecast. Soc. Change* 136 (2018) 254–264.
- [69] J.Q. Wang, X.W. Ma, J. Zhang, X. Zhao, Impacts of digital technology on energy sustainability: China case study, *Appl. Energy* 323 (2022) 119329.
- [70] Q. Xu, M.R. Zhong, Shared prosperity, energy-saving, and emission-reduction: can ICT capital achieve a "win-win-win" situation? *J. Environ. Manag.* 319 (2022) 115710.
- [71] IPCC, IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- [72] T.C. Li, Z.Y. Shi, D.R. Han, Research on the impact of energy technology innovation on total factor ecological efficiency, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 29 (24) (2022) 37096–37114.
- [73] H. Altintas, Y. Kassouri, The impact of energy technology innovations on cleaner energy supply and carbon footprints in Europe: a linear versus nonlinear approach, *J. Clean. Prod.* 276 (2020) 124140.
- [74] Z.M. Yan, B.L. Zou, K.R. Du, K. Li, Do renewable energy technology innovations promote China's green productivity growth? Fresh evidence from partially linear functional-coefficient models, *Energy Econ.* 90 (2020) 104842.
- [75] J. Ning, Q.R. Yin, A. Yan, How does the digital economy promote green technology innovation by manufacturing enterprises? Evidence from China, *Front. Environ. Sci.* 10 (2022) 967588.
- [76] B.Q. Lin, Z. Li, Towards world's low carbon development: the role of clean energy, *Appl. Energy* 307 (2022) 118160.
- [77] P. Tzeremes, E. Dogan, N.K. Alavijeh, Analyzing the nexus between energy transition, environment and ICT: a step towards COP26 targets, *J. Environ. Manag.* 326A (2023) 116598.
- [78] M. Pagliaro, F. Meneguzzo, Digital management of solar energy en route to energy self-sufficiency, *Global Challenges* 3 (8) (2019) 1800105.
- [79] P.Y. Chen, Is the digital economy driving clean energy development? -New evidence from 276 cities in China, *J. Clean. Prod.* 372 (2022) 133783.
- [80] R.R. Li, L.J. Li, Q. Wang, The impact of energy efficiency on carbon emissions: evidence from the transportation sector in Chinese 30 provinces, *Sustain. Cities Soc.* 82 (2022) 103880.
- [81] Q.X. Wang, A. Hu, Z.H. Tian, Digital transformation and electricity consumption: evidence from the Broadband China pilot policy, *Energy Econ.* 115 (2022) 106346.
- [82] T. Zhao, Z. Zhang, S.K. Liang, Digital economy, entrepreneurship, and high-quality economic development empirical evidence from urban China, *Journal of Management World* 36 (10) (2020) 65–76.
- [83] Y. Zhao, X.H. Chen, The relationship between the withdrawal of the digital economy's innovators, government interventions, the marketization level and market size based on big data, *J. Enterprise Inf. Manag.* 35 (4/5) (2022) 1202–1232.
- [84] X.M. Yin, Z.Y. Lin, J. Chen, R. Zhao, The value ecosystem construction and market allocation mechanism of data elements, *Sci. Technol. Prog. Policy* 39 (22) (2022) 1–8.
- [85] M.E. Porter, America's green strategy, *Sci. Am.* 264 (4) (1991) 193–246.
- [86] L.P. Wang, Y. Long, C. Li, Research on the impact mechanism of heterogeneous environmental regulation on enterprise green technology innovation, *J. Environ. Manag.* 322 (2022) 116127.
- [87] C.J. Liu, T. Feng, Y. Li, Network infrastructure construction, digital inclusive finance and digital divide: a policy effect analysis based on the establishment of "broadband China" demonstration cities, *Finance Econ.* (12) (2022) 103–116.
- [88] M. Shahbaz, M.A. Destek, I. Okumus, A. Sinha, An empirical note on comparison between resource abundance and resource dependence in resource abundant countries, *Resour. Pol.* 60 (2019) 47–55.
- [89] S. Che, J. Wang, Can environmental regulation solve the carbon curse of natural resource dependence: evidence from China, *Resour. Pol.* 79 (2022) 103100.
- [90] X.L. Hao, Y.H. Li, S.Y. Ren, H.T. Wu, Y. Hao, The role of digitalization on green economic growth: does industrial structure optimization and green innovation matter? *J. Environ. Manag.* 325A (2023) 116504.
- [91] P.M. Romer, Endogenous technological change, *J. Polit. Econ.* 98 (S) (1990) 71–102.
- [92] W. Chen, Can Low-Carbon Development Force Enterprises to Make Digital Transformation? *Business Strategy and the Environment*, 2022.
- [93] Dong, F., Hu, M.Y., Gao, Y.J., Liu, Y.J. et al. How does digital economy affect carbon emissions? Evidence from global 60 countries. *Sci. Total Environ.* 852, 158401.
- [94] R.Y. Ma, Z.P. Zhang, B.Q. Lin, Evaluating the synergistic effect of digitalization and industrialization on total factor carbon emission performance, *J. Environ. Manag.* 348 (2023) 119281.
- [95] A. Saia, Digitalization and CO2 emissions: dynamics under R&D and technology innovation regimes, *Technol. Soc.* 74 (2023) 102323.
- [96] H.M. Li, R.Z. Xu, How does digital finance affect the efficiency of urban green economies? Evidence from China, *Finance Res. Lett.* 58 (2023) 104595.
- [97] Y. Liu, Y.X. Xie, K.Y. Zhong, Impact of digital economy on urban sustainable development: evidence from Chinese cities, *Sustain. Dev.* (2023) 2656.
- [98] H. Mahmood, Trade, FDI, and CO2 emissions nexus in Latin America: the spatial analysis in testing the pollution haven and the EKC hypotheses, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 30 (6) (2023) 14439–14454.
- [99] Z.L. Wen, B.J. Ye, Analyses of mediating effects: the development of methods and models, *Adv. Psychol. Sci.* 22 (5) (2014) 731–745.
- [100] B.E. Hansen, Threshold effect in non-dynamic panels: estimation, testing, and inference, *J. Econom.* 93 (2) (1999) 345–368.
- [101] L. Anselin, D.A. Griffith, Do spatial effects really matter in regression analysis? *Pap. Reg. Sci.* 65 (1) (2010) 11–34.
- [102] X.D. Yang, Q.Y. Ran, J.N. Zhang, Urbanization, industrialization, and environment pollution, *Ind. Econ. Res.* (3) (2020) 1–16.
- [103] J.N. Zhang, Y.W. Lyu, Y.T. Li, Y. Geng, Digital economy: an innovation driving factor for low-carbon development, *Environ. Impact Assess. Rev.* 96 (2022) 106821.
- [104] C.Y. Zhao, W.C. Wang, X.S. Li, How does digital transformation affect the total factor productivity of enterprises? *Finance & Trade Economics* 42 (7) (2021) 114–129.
- [105] X.D. Chen, X.X. Yang, Does the digital transformation improve the independent and controllable ability of industrial chain? *Business and Management Journal* 44 (8) (2022) 23–39.
- [106] W.Q. Zhao, J. Hu, S.G. Zhao, Factor allocation efficiency industry and industry upgrading in China, *Journal of Quantitative & Technological Economics* 37 (12) (2020) 146–162.
- [107] F. Wu, H.Z. Hu, H.Y. Lin, X.Y. Ren, Enterprise digital transformation and capital market performance: empirical evidence from stock liquidity, *Journal of Management World* 37 (7) (2021) 130–144+10.
- [108] P.B. Guo, X.J. Zhou, D. Li, et al., Predicament and its solution in the transformation of coal resource based economy: a perspective of energy technology innovation, *China Soft Science* (7) (2013) 39–46.
- [109] A. Sagar, Technology Innovation and Energy, Harvard University, 2004.
- [110] J. Wang, S.L. Zhang, Q.J. Zhang, The relationship of renewable energy consumption to financial development and economic growth in China, *Renew. Energy* 170 (2021) 897–904.
- [111] M.A. Destek, A. Asian, Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in emerging economies: evidence from bootstrap panel causality, *Renew. Energy* 111 (2017) 757–7563.
- [112] D. Shi, S.L. Li, Emissions trading system and energy use efficiency: measurement and empirical evidence for cities at and above the prefecture level, *China Industrial Economics* (9) (2020) 5–23.
- [113] G. Fan, X.L. Wang, L.W. Zhang, H.P. Zhu, Marketization index for China's provinces, *Econ. Res. J.* (3) (2003) 9–18, 89.
- [114] Q. Wei, A. Wang, J. Wang, The rise of China's coastal regions: the power of the market, *Econ. Res. J.* 49 (8) (2014) 170–183.
- [115] W.H. Pan, Z.C. He, H.Y. Pan, Research on spatiotemporal evolution and distribution dynamics of digital economy development in China, *China Soft Science* 10 (2021) 137–147.
- [116] B.M. Gu, J.G. Liu, Q. Ji, The effect of social sphere digitalization on green total factor productivity in China: evidence from a dynamic spatial Durbin model, *J. Environ. Manag.* 320 (2022) 115946.
- [117] H. Wang, Y.Y. Li, W.F. Lin, W.D. Wei, How does digital technology promote carbon emission reduction? Empirical evidence based on e-commerce pilot city policy in China, *J. Environ. Manag.* 325A (2023) 116524.
- [118] J.J. Zheng, X.W. Wang, Can mobile information communication technologies (ICTs) promote the development of renewables? Evidence from seven countries, *Energy Pol.* 149 (2021) 112041.
- [119] Y.R. Guan, Y.L. Shan, Q. Huang, H.L. Chen, D. Wang, K. Hubacek, Assessment to China's recent emission pattern shifts, *Earth's Future. Earths Future* 9 (11) (2021) e2021EF002241.
- [120] X.L. Wang, L.P. Hu, G. Fan, Report on Market Index by Province in China (2021), Social Sciences Academic Press, Beijing, 2021.
- [121] J.A. Schumpeter, Capitalism, Socialism and Democracy, Harper & Brothers, New York, 1942.
- [122] J. Zhao, Q.Z. Jiang, X.C. Dong, K.Y. Dong, H.D. Jiang, How does industrial structure adjustment reduce CO2 emissions? Spatial and mediation effects analysis for China, *Energy Econ.* 105 (2022) 105704.
- [123] M. Yi, Y.F. Liu, M.S. Sheng, L. Wen, Effects of digital economy on carbon emission reduction: new evidence from China, *Energy Pol.* 171 (2022) 113271.
- [124] Q. Liang, S.P. Xiao, M.X. Li, Digital economy development, spatial spillover and innovation quality growth: the threshold effect test of market efficiency, *Shanghai Journal of Economics* (9) (2021) 44–56.
- [125] Y.W. Yang, Q.Y. Liang, Digital economy, environmental regulation and green eco-efficiency-Empirical evidence from 285 cities in China, *Front. Environ. Sci.* 11 (2023) 1113293.
- [126] X.M. Yin, L.Y. Qi, J.L. Zhou, The impact of heterogeneous environmental regulation on high-quality economic development in China: based on the moderating effect of digital finance, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* (2022).
- [127] Y. Su, Y.Q. Yu, Spatial agglomeration of new energy industries on the performance of regional pollution control through spatial econometric analysis, *Sci. Total Environ.* 704 (2020) 135261.
- [128] M.M. Tao, S. Poletti, L. Wen, M.S. Sheng, et al., Appraising the role of the digital economy in global decarbonization: a spatial non-linear perspective on globalization, *J. Environ. Manag.* 347 (2023) 119170.
- [129] H.Y. Hu, Q.Z. She, Does digital transformation of manufacturing reduce the embodied carbon intensity on exports, *Journal of International Trade* (7) (2022) 36–52.
- [130] Y. Xie, Z. Chen, F. Boadu, H.J. Tang, How does digital transformation affect agricultural enterprises' pro-land behavior: the role of environmental protection cognition and cross-border search, *Technol. Soc.* 70 (2023) 101991.

