

A Hybrid Fuzzy AHP–TOPSIS Approach for Ranking Sustainable Green Technology Innovations

Kadriye Doğanay¹, Aytac Yıldız^{2*}

¹Bursa Technical University, Department of Industrial Engineering, Bursa Türkiye

²Bursa Technical University, Department of Industrial Engineering, Bursa Türkiye

Abstract: The escalating global climate crisis, resource scarcity, and carbon-intensive production systems have made the evaluation of innovative technologies aimed at reducing environmental impacts a strategic necessity. In this context, conducting a comprehensive and reliable assessment of green technology innovations is critically important for the effectiveness of sustainable development policies. Responding to this need, the present study proposes a hybrid Fuzzy AHP–Fuzzy TOPSIS approach to evaluate green technology innovations within a multi-criteria and uncertainty-based decision environment. In the first stage, criteria reflecting environmental, economic, technological, and social dimensions were weighted using expert judgments through the fuzzy AHP method. Subsequently, nine alternative innovative technologies were ranked according to their closeness coefficients to the ideal solution using the fuzzy TOPSIS technique. The findings indicate that environmental sustainability and technological feasibility emerged as the most influential criteria. Under this weighting structure, green hydrogen and geothermal energy–lithium recovery technologies demonstrated stronger overall performance than the other alternatives due to their long-term sustainability potential and technological maturity.

The results provide decision-makers with a clear and comparable perspective regarding which technologies should be prioritized in line with sustainable transformation goals. Overall, the study offers a systematic evaluation framework under uncertainty, contributing uniquely to both the academic literature and policy-making processes related to sustainable technology investments.

Keywords: Green technology, green innovation, fuzzy AHP, fuzzy TOPSIS, sustainability

Sürdürülebilir Yeşil Teknoloji İnovasyonlarının Sıralanmasında Hibrit Bulanık AHP–TOPSIS Yaklaşımı

Özet: Küresel ölçekte derinleşen iklim krizi, kaynak kıtlığı ve karbon yoğun üretim yapıları, çevresel etkileri azaltan yenilikçi teknolojilerin değerlendirilmesini stratejik bir gereklilik haline getirmiştir. Bu bağlamda yeşil teknoloji inovasyonlarının performansının bütüncül ve güvenilir biçimde analiz edilmesi, sürdürülebilir kalkınma politikalarının etkinliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışma, söz konusu ihtiyaca yanıt olarak yeşil teknoloji inovasyonlarını çok kriterli ve belirsizlik içeren bir karar ortamında değerlendirmek amacıyla hibrit bir Bulanık AHP–Bulanık TOPSIS yaklaşımı önermektedir. İlk aşamada çevresel, ekonomik, teknolojik ve sosyal boyutları kapsayan kriterler uzman görüşleriyle bulanık AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Daha sonra dokuz alternatif yenilikçi teknoloji, bulanık TOPSIS yöntemiyle ideal çözüme yakınlık katsayılarına göre sıralanmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular, kriter ağırlıklarında özellikle çevresel sürdürülebilirlik ve teknolojik uygulanabilirliğin öne çıktığını ortaya koymuştur. Bu ağırlık yapısı altında yeşil hidrojen ve jeotermal enerji/lityum geri kazanımı teknolojileri hem uzun vadeli sürdürülebilirlik potansiyelleri hem de teknik olgunluk düzeyleri sayesinde diğer alternatiflere kıyasla daha güçlü bir toplam performans sergilemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, sürdürülebilir dönüşüm hedefleri doğrultusunda hangi teknolojilerin önceliklendirilmesi gerektiğine dair karar vericilere açık ve karşılaştırılabilir bir perspektif sunmaktadır. Çalışma, belirsizlik koşullarında sistematik bir değerlendirme çerçevesi sağlayarak hem akademik literatüre hem de sürdürülebilir teknoloji yatırımlarına yönelik politika geliştirme süreçlerine özgün katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yeşil teknoloji, yeşil inovasyon, bulanık AHP, bulanık TOPSIS, sürdürülebilirlik

Reference to this paper should be made as follows (bu makaleye aşağıdaki şekilde atıfta bulunulmalı):

K. Doganay, A. Yildiz, 'A Hybrid Fuzzy AHP–TOPSIS Approach for Ranking Sustainable Green Technology Innovations', Elec Lett Sci Eng , vol. 21(2) , (2025), 62-83

* Corresponding author; aytac.yildiz@btu.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik kalkınma ve toplumsal refahın sürdürülebilir biçimde sağlanabilmesi için küresel bir öncelik haline gelmiştir. İklim değişikliğinin hızlanması, doğal kaynakların tükenmesi ve artan karbon emisyonları gibi çevresel sorunlar, çevre odaklı stratejik politikaların ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [1]. Sanayi devriminden itibaren üretim odaklı büyüme anlayışı doğal kaynaklar üzerinde baskı oluşturmuştur. Bu durum kaynak verimliliği ve çevre dostu teknolojilerin ekonomik politikalara entegrasyonunu kaçınılmaz hale getirmiştir. Dolayısıyla sürdürülebilir kalkınma, ekonomik büyüme ile çevresel dengeyi aynı anda gözeten çok boyutlu bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bu noktada inovasyon, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Inovasyon yalnızca yeni ürün ve süreçlerin geliştirilmesiyle sınırlı olmayıp, teknolojik, toplumsal ve örgütsel dönüşümleri kapsayan bütüncül bir kavramdır [2]. Son yıllarda inovasyonun çevresel boyutunun önem kazanması, “sürdürülebilir” ve “yeşil inovasyon” kavramlarını gündeme taşımıştır. Yeşil inovasyon, çevresel etkileri azaltmayı, kaynak verimliliğini artırmayı ve karbon emisyonlarını düşürmeyi amaçlayan yenilik faaliyetlerini kapsamaktadır [3]. Bu yaklaşım, işletmeler için yalnızca çevresel bir sorumluluk değil, aynı zamanda uzun vadeli rekabet avantajı sağlayan bir stratejik araçtır [4]. Teknoloji, yeşil inovasyonun etkinliğini artıran temel bir belirleyici olarak öne çıkmaktadır. Dijitalleşme, büyük veri analitiği, yapay zekâ ve nesnelerin interneti gibi teknolojiler, çevresel performansın ölçülmesi ve optimize edilmesine olanak tanımakta, yeşil dönüşümün hızını artırmaktadır [5]. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinin yanı sıra tedarik zinciri, enerji sistemleri ve politika geliştirme alanlarında da yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu bağlamda yeşil teknoloji inovasyonu, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen, enerji verimliliğini artıran ve doğal kaynak kullanımını optimize eden yeniliklerin bütünüdür ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji, temiz üretim, atık yönetimi, karbon yakalama ve çevre dostu malzeme teknolojileri bu kapsamda değerlendirilmektedir [6]. Yeşil inovasyonun işletmelere çevresel uyumun ötesinde maliyet etkinliği ve yeni pazar fırsatları kazandırdığı görülmektedir [2]. Ancak finansman kısıtları, teknik altyapı eksiklikleri ve düzenleyici belirsizlikler bu dönüşümün yaygınlaşmasını güçleştirmektedir [7]. Yeşil teknoloji inovasyonlarının performansının ölçülmesi hem nitel hem nicel kriterleri içeren çok boyutlu bir karar problemidir. Bu süreçte teknik verimlilik, ekonomik sürdürülebilirlik, toplumsal kabul ve çevresel katkı unsurlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir [8]. Bu karmaşık yapı nedeniyle Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri öne çıkmaktadır. Özellikle bulanık mantık tabanlı ÇKKV yaklaşımları, belirsizlik koşullarında karar vericilerin sezgisel yargılarını matematiksel biçimde modelleyebilmesi açısından etkilidir.

Bu çalışma, yeşil teknoloji inovasyonlarının performans değerlendirmesine ilişkin literatürdeki yöntemsel boşluğu gidermeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen hibrit bulanık AHP–bulanık TOPSIS modeli, kriter ağırlıklarını uzman yargılarına dayalı olarak belirlemekte ve alternatifleri ideal çözüme yakınlık katsayılarına göre sıralamaktadır. Model, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutları bütünleştirerek hem akademik literatüre hem de politika yapıcılara uygulanabilir, veri temelli bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde yeşil teknoloji inovasyonları ve bunların değerlendirme kriterleri ayrıntılı olarak açıklanmış, üçüncü bölümde araştırmada kullanılan yöntemler tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde analizlerden elde edilen bulgular sunulmuş, son bölümde ise genel sonuçlar ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. Yeşil Teknoloji İnovasyonları

Çevresel sürdürülebilirliği destekleyen yeşil teknoloji inovasyonları, insan faaliyetlerinin doğa üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada kilit rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji, atık yönetimi ve döngüsel ekonomi çözümleri, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli araçlardır. Forbes [9], karbon ayak izinin küçültülmesine katkı sağlayan en umut verici 15 yeşil teknolojiyi belirlemiş ve bunların enerji, ulaşım, inşaat, veri yönetimi ve tarım gibi sektörlerde teknik ve ekonomik sürdürülebilirliği desteklediğini vurgulamıştır. Bu teknolojilerden çalışmada kullanılması kararlaştırılan dokuz tanesi aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Yeşil hidrojen: Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla suyun elektrolizi sonucu üretilen, karbon salımı yaratmayan çevre dostu bir enerji taşıyıcısıdır. Fosil yakıtlardan elde edilen gri hidrojene kıyasla sera gazı emisyonlarını ortadan kaldırması, onu iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir inovasyon haline getirmektedir [10]. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerjisiyle üretilen yeşil hidrojen, enerji sistemlerinin karbonsuzlaşmasına katkı sağlamaktadır. Alkalın, PEM ve katı oksit elektrolizörleri farklı verimlilik ve maliyet avantajları sunarken yeni nesil katalizörler, ileri membranlar ve devlet destekli politikalar maliyetleri düşürerek süreci hızlandırmaktadır. Bu yönüyle yeşil hidrojen, sürdürülebilir enerji dönüşümünün stratejik bileşenidir [11].

Enerji verimli kodlama: Yazılım ve yapay zekâ uygulamalarında enerji tüketimini azaltmaya yönelik stratejik bir yaklaşımdır. Zhang ve diğ. [12], bu amaçla zamansal kodlama temelli başak tabanlı derin takviye öğrenimi modeli geliştirmiştir. Biyolojik sinir sistemlerinden esinlenen bu model, yalnızca belirli zaman noktalarında sinyal göndererek bilgi taşıyan ve sürekli etkin olmayan bir mekanizma kullanır. Bu sayede, geleneksel yapay sinir ağlarına kıyasla çok daha düşük enerjiyle benzer doğruluk oranlarına ulaşmak mümkündür. Özellikle gömülü sistemler, mobil cihazlar ve enerji kısıtlı donanımlarda uygulanabilir olan bu yöntem, bilgi işlem

maliyetlerini azaltarak karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Enerji verimli kodlama, yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda yapay zekâ teknolojilerinin ekolojik sürdürülebilirliğini güçlendiren etik bir dönüşüm olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, geleceğin “akıllı ve yeşil” bilgi işlem sistemleri için yeni bir paradigma sunmaktadır [12].

Jeotermal enerji ve lityum geri kazanımı: Yeraltı sıcak su kaynaklarının hem yenilenebilir enerji üretimi hem de batarya teknolojilerinde kullanılan lityum gibi stratejik elementlerin sürdürülebilir biçimde elde edilmesi için değerlendirilmesini kapsar. Jeotermal enerji, düşük karbon salımı ve sürekliliği sayesinde yeşil teknoloji uygulamaları arasında önemli bir yere sahiptir [13]. Ayrıca jeotermal akışkanlardan lityum geri kazanımı hem ekonomik değer yaratmakta hem de çevre dostu madencilik anlayışını desteklemektedir. Bu bütünleşik yaklaşım, enerji üretimi ile kritik minerallerin kazanımını bir araya getirerek sürdürülebilir enerji dönüşümüne çift yönlü katkı sağlamaktadır [14].

3D baskı teknolojileri: Katmanlı üretim prensibine dayanan yapısı sayesinde günümüz üretim sistemlerinde sürdürülebilir dönüşümün en önemli itici güçlerinden biri haline gelmiştir. Gereken miktarda malzeme kullanarak üretim yapması, kaynak israfını ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır [15]. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha az enerji tüketen bu teknoloji, yerinde üretim olanağıyla lojistik kaynaklı çevresel etkileri de azaltmaktadır. Ayrıca, doğada çözünebilen polimerlerin katkılı imalatla kullanımı ve yüksek performanslı mühendislik malzemeleriyle entegrasyonu, 3D baskının döngüsel ekonomi ve çevreci inovasyonda stratejik bir konuma sahip olduğunu göstermektedir [16].

Blockchain: Blockchain teknolojisi, sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayan şeffaf, güvenli ve izlenebilir bir dijital altyapı sunarak çevresel yönetim süreçlerinde devrim yaratmaktadır. Dağıtık defter sistemleri, karbon emisyonlarının izlenmesi ve çevresel düzenlemelerin uygulanmasında önemli rol oynamaktadır [17]. Karbon kredisi ticareti gibi uygulamalarda güvenilir kayıt mekanizmaları oluşturarak çevre politikalarının etkinliğini artırmaktadır. Enerji tüketimi yüksek olsa da geliştirilen yeni nesil sürdürülebilir blockchain mimarileri bu etkiyi azaltmaktadır. Ayrıca, inşaatta malzeme kaynağının izlenmesi, yenilenebilir enerji ticareti ve ulaşım da yakıt verimliliği gibi uygulamalarla blockchain, çevresel sürdürülebilirliğin dijital temeli haline gelmiştir [18].

Karbon negatif beton: Karbon negatif beton, üretim sürecinde atmosfere salınan karbonu yakalayan çevre dostu bir yapı malzemesidir. Küresel karbon azaltım hedefleriyle uyumlu bu yenilikçi malzeme, inşaat sektörünün çevresel etkilerini azaltmada stratejik önem taşımaktadır. Biochar gibi karbon açısından zengin bileşenlerin beton karışımına eklenmesi, karbon tutulumunu artırarak sürdürülebilirliği güçlendirir [19]. Beton yıkama suyunun üretim sürecine entegre edilmesi ise kaynak kullanımını optimize eder ve atıkların karbon emilimine katkı

sağlar. Böylece beton üretimi, çevresel onarım sağlayan döngüsel bir süreç haline gelmektedir. Ayrıca karbon azaltıcı teknolojilerin yaygınlaşması, çevresel farkındalığı artırarak sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarını teşvik etmektedir [20].

Karbon yakalama: Karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojisi, sanayi tesisleri ve enerji santrallerinden çıkan CO₂'nin atmosfere ulaşmadan ayrıştırılıp güvenli biçimde depolanmasıyla iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır [21]. Özellikle ağır sanayi ve enerji sektörlerinde net sıfır hedeflerine ulaşmak için kısa-orta vadede vazgeçilmez bir çözümdür. Kimyasal absorpsiyon, membran ve kriyojenik ayırma gibi yöntemler, maliyet ve enerji gereksinimi açısından değerlendirilmekte; nano-malzeme temelli adsorbanlar ve enzim destekli sistemler verimliliği artırmaktadır. Ayrıca CCS başarısı, teknik kapasitenin yanı sıra sosyal kabul, ekonomik sürdürülebilirlik ve enerji adaleti gibi sosyo-teknik faktörlere de bağlıdır [22].

Atıktan enerjiye dönüştürme teknolojisi: Atıktan enerjiye dönüştürme (Waste-to-Energy, WtE) teknolojileri, biyolojik ve endüstriyel atıkların yakma veya fermantasyon yoluyla enerjiye dönüştürülmesini sağlayarak hem atık miktarını azaltır hem de alternatif enerji üretimi sunar. Bu teknolojiler, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda çevresel etkileri azaltırken ekonomik değer yaratmaktadır. Farklı WtE yöntemleri arasında piroliz, gazlaştırma, anaerobik çürütme ve doğrudan yakma öne çıkmakta, bu sistemler sera gazı emisyonlarını düşürmekte ve döngüsel ekonomiye katkı sağlamaktadır [23]. Literatürde çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik kriterleriyle bütüncül analizlerin önemine vurgu yapılmakta, yapay zekâ ve IoT tabanlı dijital teknolojilerin entegrasyonu ile sistem verimliliğinin artırılacağı belirtilmektedir [24].

Akıllı tarım: Dijital dönüşümün tarım sektörüne entegre edilmesiyle sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada stratejik bir öneme sahip yeşil bir inovasyondur. IoT, uzaktan algılama ve veri analitiği gibi teknolojiler sayesinde su, enerji ve gübre kullanımı optimize edilerek hem üretkenlik artmakta hem de doğal kaynakların korunması sağlanmaktadır [25]. Bu yönüyle akıllı tarım, iklim değişikliğiyle mücadelede karbon ayak izini azaltan en etkili uygulamalardan biridir. IoT tabanlı sensör sistemleri çevresel veriye dayalı kararlar alarak kaynak israfını önlerken, üretim süreçlerinde çevresel sürdürülebilirliği güçlendirmektedir. Ayrıca, düşük enerji tüketimli iletişim teknolojileriyle desteklenen bu sistemler, enerji verimliliği ve çevresel performans açısından kritik rol oynamaktadır [26].

2.1 Yeşil Teknoloji İnovasyonlarının Değerlendirilmesinde Kullanılan Performans Kriterleri

Yeşil teknoloji inovasyonları, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları bütünleştiren stratejik bir dönüşüm aracıdır. Bu teknolojilerin performansının

değerlendirilmesi yalnızca teknik verimliliği değil, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılması, ekonomik sürdürülebilirliğin güçlendirilmesi ve toplumsal faydanın artırılmasını da kapsamaktadır. Bu nedenle yeşil inovasyonun performans kriterleri çok boyutlu bir yapıya sahiptir ve genellikle enerji verimliliği, emisyon azaltımı, geri dönüşüm oranı, kaynak kullanımı, ekonomik etkinlik, teknolojik etki ve toplumsal kabul gibi göstergeler üzerinden analiz edilmektedir [27].

Yeşil teknoloji performansının temel unsurlarından biri enerji verimliliğidir. Enerji verimliliği, aynı çıktıyı daha az enerjiyle elde etmeyi hedefleyerek maliyetleri düşürür ve çevresel etkileri azaltır. Wang ve diğ. [28] ise enerji verimliliğinin yalnızca enerji tasarrufu değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesini içerdiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle enerji verimliliği hem çevresel sürdürülebilirlik hem de rekabet avantajı açısından kritik bir göstergedir.

Bir diğer önemli kriter emisyon azaltımıdır. Karbon emisyonlarının minimize edilmesi, yeşil teknolojilerin çevresel performansını doğrudan belirler. Fosil yakıt kullanımının azaltılması, temiz enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve karbon tutma teknolojilerinin geliştirilmesi bu göstergenin temel unsurlarıdır. Türkiye'nin 2030 yılına kadar enerji tüketimini %16 oranında azaltarak yaklaşık 100 milyon ton karbon emisyonunu önleme hedefi, bu kriterin politika düzeyindeki stratejik önemini göstermektedir. Smith ve diğ. [29], karbon ayak izi analizlerinin yeşil inovasyonun çevresel etkilerini ölçmede önemli bir araç olduğunu ve süreç bazlı iyileştirmeleri kolaylaştırdığını vurgulamaktadır. Emisyon azaltımı, yalnızca çevresel koruma açısından değil, aynı zamanda uluslararası çevre standartlarına uyum açısından da kilit bir performans göstergesidir.

Geri dönüşüm oranı ve atık yönetimi etkinliği, yeşil teknolojilerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki diğer bir göstergesidir. Geri dönüşüm, doğal kaynak kullanımını azaltarak döngüsel ekonomiyi destekler. Sanayi üretiminde geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı maliyetleri düşürmekte ve karbon ayak izini küçültmektedir. Fercoq ve diğ. [29], yeşil ürün tasarımında atıkların minimize edilmesi ve geri dönüştürülebilir malzemelerin tercih edilmesinin sürdürülebilirlik için kritik bir strateji olduğunu belirtmektedir. Mala ve Bencikova [30] ise biyolojik olarak parçalanabilir veya enerji yoğunluğu düşük malzemelerin kullanılmasının çevresel performansı artırdığını ifade etmektedir. Bu bağlamda geri dönüşüm, üretim süreçlerinin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Yeşil teknolojilerin ekonomik performansı, uzun vadeli başarının belirleyici göstergelerindendir. Bu kriter; maliyet etkinliği, yatırım geri dönüş süresi, ticarileştirilebilirlik ve pazar payı gibi göstergeleri içerir. Guo ve diğ. [31], yeşil teknolojilerin başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasına karşın, uzun vadede

enerji ve kaynak tasarrufuyla ekonomik avantaj sağladığını vurgulamaktadır. Stringfellow ve diğ. [32] ise bölgesel yeşil inovasyon verimliliği çalışmalarında teknolojik ilerlemenin ekonomik büyüme üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir. Dolayısıyla ekonomik performans, yeşil teknolojilerin hem çevresel hem finansal sürdürülebilirliğini yansıtan çok yönlü bir ölçüttür.

Bir diğer kriter olan teknolojik etki, inovasyonun çevresel ve ekonomik sistemler üzerindeki dönüşüm gücünü temsil eder. Bu etki Ar-Ge yoğunluğu, yenilik düzeyi, patent sayısı ve enerji dönüşüm kapasitesi gibi göstergelerle ölçülür. OECD [2], yeşil teknolojilerin yalnızca yeni ürünler ortaya koymadığını, mevcut üretim sistemlerinde de verimlilik artışı sağlayarak kaynak kullanımını optimize ettiğini belirtmektedir. Bu yönüyle teknolojik etki hem üretim süreçlerinin modernleşmesinde hem de sanayi rekabet gücünün artırılmasında kilit bir faktördür.

Son olarak, sosyal performans kriterleri, yeşil teknolojilerin toplum üzerindeki etkilerini değerlendirir. Toplumsal kabul, çevre bilinci, paydaş katılımı ve yaşam kalitesine katkı bu göstergeler arasında yer alır. Ali ve diğ. [33], yeşil inovasyonun başarısında sosyal farkındalığın ve paydaş katılımının belirleyici olduğunu vurgulamaktadır. Bu bağlamda yeşil teknolojiler, yalnızca çevre dostu üretim biçimleri değil, aynı zamanda sürdürülebilir yaşam kültürünü destekleyen sosyal yenilik araçlarıdır.

Jie [34], yeşil inovasyonun performansının bütüncül biçimde ele alınması gerektiğini, çevresel, ekonomik ve sosyal kriterlerin entegrasyonunun gerçek sürdürülebilirlik performansını ortaya koyduğunu ifade etmektedir. Özet olarak yeşil teknoloji inovasyonlarının performans göstergeleri; enerji verimliliği, emisyon azaltımı, geri dönüşüm oranı, kaynak kullanımı, ekonomik uygulanabilirlik, teknolojik etki ve toplumsal kabul, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmanın temel unsurlarıdır. Bu kriterlerin bütüncül olarak değerlendirilmesi, çevresel koruma, ekonomik büyüme ve toplumsal refahı bir arada ele alan sürdürülebilirlik anlayışının gelişmesine katkı sağlamaktadır.

3. Yöntem

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), birden çok ve çoğu zaman birbiriyle çelişen kriteri eşzamanlı değerlendirerek alternatifler arasında rasyonel, izlenebilir ve savunulabilir seçim yapılmasını sağlayan analitik bir çerçevedir [35]. Günümüz karar problemlerinin; sürdürülebilirlik, yeşil teknoloji inovasyonu ve enerji verimliliği gibi alanlarda teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları birlikte içermesi tek ölçütlü yaklaşımları yetersiz kılmakta ve ÇKKV'yi kamu politikası, sanayi ve akademide vazgeçilmez bir karar desteği haline getirmektedir [36]. ÇKKV'nin temel katkısı, nitel (uzman yargıları, paydaş tercihleri) ve nicel (ölçümler, maliyetler, performans göstergeleri) veriyi ortak bir ölçekte bütünleştirerek karar sürecine sistematiklik, şeffaflık ve hesap

verebilirlik kazandırmasıdır [37]. Bu sayede karar vericiler; kriterler arası ödünleşmeleri görünür kılar, önceliklendirme ve kaynak tahsisini rasyonelleştirir, belirsizlik ortamında dahi tutarlı sonuçlar elde eder ve seçimin gerekçesini açık biçimde belgeleyebilir [35]. Belirsizliğin ve bilgi eksikliğinin yüksek olduğu durumlarda ÇKKV, bulanık mantık ve benzeri uzantılarla uzman yargılarındaki muğlaklığı modele dâhil ederek duyarlılık ve sağlamlık analizleriyle sonuç güvenilirliğini artırır [37]. ÇKKV literatüründe en sık kullanılan yöntemler arasında AHP, TOPSIS, ANP, VIKOR, ELECTRE ve PROMETHEE yer almaktadır [35]. Çalışmamızda bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılmış olup, her iki yöntemin temel yapısı ve uygulanma adımları aşağıda açıklanmıştır.

3.1 Bulanık AHP Yöntemi

Karar verme süreçlerinde birden fazla kriterin dikkate alındığı durumlarda, karar vericilere sistematik ve analitik bir değerlendirme çerçevesi sunan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi, ÇKKV literatüründe en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Thomas L. Saaty tarafından 1977 yılında geliştirilen AHP, nitel ve nicel değişkenleri birlikte ele alarak karmaşık karar problemlerini hiyerarşik bir yapı içerisinde analiz etmeye ve önceliklendirmeye olanak tanır [38]. Bu yöntemde karar verme problemi; amaç, kriterler, alt kriterler ve alternatifler olarak kademeli biçimde yapılandırılır. Daha sonra, ikili karşılaştırma matrisleri aracılığıyla kriterlerin ve alternatiflerin göreceli önem dereceleri belirlenir. AHP'nin temel amacı, karar vericilerin öznel yargılarını sayısal değerlere dönüştürerek farklı kriterler arasında ağırlıklar oluşturmak ve bu doğrultuda en uygun alternatifi seçmektir. Ancak klasik AHP yöntemi, karar vericilerin yargılarını belirli ve net sayısal değerlerle ifade etmesini gerektirdiğinden, özellikle sürdürülebilirlik, inovasyon ve teknoloji yönetimi gibi belirsizliklerin yüksek olduğu alanlarda sınırlılıklar göstermektedir. Bu eksikliği gidermek amacıyla geliştirilen bulanık AHP (Fuzzy AHP) yöntemi, klasik AHP'nin genişletilmiş bir versiyonu olup karar vericilerin belirsiz veya çelişkili yargılarını bulanık sayılar kullanarak modellemesine olanak tanır. Bulanık mantık teorisine dayanan bu yöntem, kesin olmayan insan yargılarını matematiksel biçimde analize dahil ederek daha esnek, gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Bulanık AHP'nin temelinde, klasik AHP'de kullanılan ikili karşılaştırma matrislerinin, karar vericilerin belirsizliklerini yansıtmak amacıyla üçgen bulanık sayılar (Triangular Fuzzy Numbers – TFN) ile ifade edilmesi yer alır. Bu yaklaşımda karar vericiler, kriterler ve alternatifler arasındaki göreceli önemleri “düşük”, “orta” veya “yüksek” gibi sözel ifadelerle belirtir; bu ifadeler bulanık sayılara dönüştürülerek analize dâhil edilir. Böylece öznel değerlendirmeler daha sistematik bir biçimde matematiksel modele entegre edilir [39].

Bu çalışmada, Buckley [40] tarafından geliştirilen ve klasik AHP'nin bulanık uzantısı olarak kabul edilen Buckley algoritması kullanılmıştır. Buckley, klasik AHP'nin lineer denklemlerle tek bir çözüm üretmekte yetersiz kaldığı durumlarda, geometrik ortalama yaklaşımı ve üssel bulanık sayıları içeren bir yöntem geliştirmiştir. Bu algoritma, karar vericilerin değerlendirmelerini bulanık oranlar biçiminde ele alır ve geometrik ortalama yöntemiyle kriterlerin ağırlıklarını hesaplar. Bu sayede, karar vericilerin belirsiz yargıları daha esnek biçimde işlenir ve bulanık mantığın avantajları AHP'nin sistematik yapısıyla birleştirilir. Buckley algoritması, özellikle belirsizliğin yoğun olduğu alanlarda klasik AHP'ye kıyasla daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Aşağıda, Buckley [41] tarafından açıklanan Buckley algoritmasının adımları ayrıntılı biçimde verilmiştir.

Adım 1: Karar vericinin fikri alınarak, elemanları $\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$, $\forall i, j$ için olan üçgen bulanık sayılarla karşılaştırma matrisi oluşturulur. A pozitif ikili karşılaştırma matrisi;

$$A = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ 1/\tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1/\tilde{a}_{n1} & 1/\tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \text{ şeklinde gösterilsin.} \quad (1)$$

$$\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} 1, 3, 5, 7, 9 & i \text{ kriterinin } j \text{ kriterine göreli önemi} \\ 1, i = j, \\ 1^{-1}, 3^{-1}, 5^{-1}, 7^{-1}, 9^{-1} & i \text{ kriterinin } j \text{ kriterine daha az göreli önemi} \end{cases} \quad (2)$$

Kriterlerin/alternatiflerin ikili karşılaştırılması için Tablo 1'de verilen bulanık ölçek ve dilsel ifadeler kullanılmaktadır.

Tablo 1. Bulanık ölçek ve dilsel ifadesi

Bulanık sayı	Dilsel ölçek	Bulanık sayının ölçeği
1	Eşit Önemli (EÖ)	(1, 1, 3)
2	Zayıf Önemli (ZÖ)	(1, 3, 5)
3	Esasen Önemli (EÖ)	(3, 5, 7)
4	Çok Kuvvetli Önemli (ÇKÖ)	(5, 7, 9)
5	Kesinlikle Önemli (KÖ)	(7, 9, 9)

Adım 2: Her satırın geometrik ortalaması eşitlik (3) ile hesaplanır.

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n}, \quad \forall i \quad (3)$$

Adım 3: Herbir kriterin bulanık $\tilde{w}_i$ ağırlık vektörü,

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \text{ ile hesaplanır.} \quad (4)$$

Adım 4: Aşağıdaki denklem yardımıyla her bir kriterin en iyi bulanık olmayan performans (Best Nonfuzzy Performance-BNP) değeri (net ağırlık) bulunur.

$$BNP\tilde{w}_i = [(uw_i - lw_i) + (mw_i - lw_i)] / 3 + lw_i \quad (5)$$

Hesaplanan bu BNP değerine göre, her bir alternatif sıralaması yapılır.

3.2 Bulanık TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi, çok kriterli karar verme problemlerinde alternatifleri pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıklarına göre sıralayan etkili bir tekniktir. Temel mantığı, en iyi alternatifin ideal çözüme en yakın, negatif ideale ise en uzak olan seçenek olmasıdır. Böylece karar sürecine objektif ve nicel bir yapı kazandırır. Geleneksel TOPSIS yöntemi, verilerin kesin olduğu durumlar için geliştirilmiştir. Ancak gerçek dünyada karar verme süreçleri çoğu zaman belirsizlik, eksik bilgi ve dilsel ifadeler içerir. Bu nedenle, bulanık küme teorisinin TOPSIS'e entegre edilmesiyle bulanık TOPSIS yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, karar vericilerin belirsiz yargılarını bulanık sayılar aracılığıyla modele dahil ederek daha esnek ve gerçekçi bir analiz sağlar [41]. Bulanık TOPSIS, belirsiz veya eksik bilgi içeren durumlarda karar verme sürecini kolaylaştırmakta ve geleneksel TOPSIS'e göre daha doğru, güvenilir sonuçlar sunmaktadır [42]. Bulanık TOPSIS yönteminin algoritması aşağıdaki gibidir [43];

Chen [43] tarafından geliştirilen bulanık TOPSIS yönteminin ilk adımı, değerlendirme sürecine katılacak uzman veya karar vericilerden oluşan bir grubun tanımlanmasıdır. Bu grup, genellikle $E = \{KV_1, KV_2, \dots, KV_N\}$ biçiminde gösterilir. Uzman grubunun belirlenmesinin ardından, karar sürecinde değerlendirilecek alternatifler $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ ve bu alternatiflerin inceleneceği kriterler $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ şeklinde tanımlanır.

Bir sonraki aşamada hem kriterlerin önem derecelerini hem de alternatiflerin performanslarını değerlendirmek için kullanılacak sözel değişkenler belirlenir. Karar vericiler, bu sözel ifadeleri kullanarak değerlendirmelerini gerçekleştirir. Elde edilen sözel veriler, daha sonra üçgen bulanık sayılar biçiminde sayısal değerlere dönüştürülür. Bu değerlendirmelerin bulanık sayılar şeklindeki ifadesi Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Kriterlerin önem ağırlığının belirlenmesinde kullanılan değişkenler

Sözel değişkenler	Üçgen bulanık sayılar
Çok Düşük (ÇD)	(0, 0, 0.1)
Düşük (D)	(0, 0.1, 0.3)
Orta Düşük (OD)	(0.1, 0.3, 0.5)
Orta (O)	(0.3, 0.5, 0.7)
Orta Yüksek (OY)	(0.5, 0.7, 0.9)
Yüksek (Y)	(0.7, 0.9, 1)
Çok Yüksek (ÇY)	(0.9, 1, 1)

Tablo 3. Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan değişkenler

Sözel değişkenler	Üçgen bulanık sayılar
Çok Kötü (ÇK)	(0, 0, 1)
Kötü (K)	(0, 1, 3)
Orta Kötü (OK)	(1, 3, 5)
Epeyce (E)	(3, 5, 7)
Orta İyi (Oİ)	(5, 7, 9)
İyi (İ)	(7, 9, 10)
Çok İyi (Çİ)	(9, 10, 10)

N tane karar vericinin kriter ve alternatiflere ilişkin değerlendirmeleri, ortak bir görüşü yansıtacak şekilde tek bir bulanık değerde birleştirilir.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{N} [\tilde{x}_{ij}^1(+) \tilde{x}_{ij}^2(+) \dots \dots \dots (+) \tilde{x}_{ij}^N] \quad (6)$$

Burada, $\tilde{x}_{ij}^N$ N . karar vericinin değerlendirilmesini göstermektedir.

Her kriter için N tane karar verici tarafından belirlenen ağırlıkları tek bir değere indirgemek için, $\tilde{w}_j$ aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{N} [\tilde{w}_j^1(+) \tilde{w}_j^2(+) \dots \dots \dots (+) \tilde{w}_j^N] \quad (7)$$

Burada $\tilde{w}_j^N$ N . karar vericinin ağırlığını göstermektedir.

Tüm kriter ve alternatifler için birleşik değerler elde edildikten sonra karar matrisi aşağıdaki biçimde oluşturulur.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad \tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots \tilde{w}_n] \quad (8)$$

Burada $\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ ve $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$ üçgen bulanık sayılar olup, $\tilde{D}$ bulanık karar matrisini, $\tilde{W}$ ise bulanık ağırlıklar matrisini göstermektedir.

Karar matrisinin oluşturulmasından sonraki adım, karar matrisinin normalize edilmesidir. Bulanık karar matrisi eşitlik (10) ve (11) yardımıyla normalize edilir ve normalize bulanık karar matrisi $\tilde{R}$ elde edilir.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

B ve C, fayda ve maliyet kriterleri olmak üzere:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right), \quad j \in B, \quad u_j^+ = \max_i u_{ij} \quad (10)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right) \quad j \in C, \quad l_j^- = \min_i l_{ij} \quad (11)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $r_{ij}, (\forall i, j)$ normalize edilmiş üçgen bulanık sayılardır.

Normalize bulanık karar matrisinin oluşturulmasından sonra, her bir karar kriterinin farklı önem ağırlığına sahip olabileceği dikkate alınarak ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi şu şekilde oluşturulur.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\text{Burada, } \tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij}(\cdot) \tilde{w}_j \text{ 'dir.} \quad (13)$$

Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi oluşturulduktan sonra bulanık pozitif ideal çözüm (FPIS, A^+) ve bulanık negatif ideal çözüm (FNIS, A^-) şu şekilde tanımlanır.

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+) \quad (14)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \quad (15)$$

$$\text{Burada, } \tilde{v}_{ij}^+ = (1, 1, 1) \text{ ve } \tilde{v}_{ij}^- = (0, 0, 0) \quad j = 1, 2, \dots, n \text{ 'dir.}$$

Daha sonra, her alternatifin pozitif ideal çözüm (A^+) ve negatif ideal çözüme (A^-) olan uzaklıkları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

Burada $d_v(a, b)$, iki bulanık sayı arasındaki mesafeyi ifade eder ve bu mesafe, eşitlik (18)'de verilen vertex yöntemi ile hesaplanır. Uzaklıklar belirlendikten sonra, her bir alternatif için yakınlık katsayısı (CC_i) hesaplanır. Bu katsayı, alternatifin bulanık pozitif ideal çözüm (A^+) ve bulanık negatif ideal çözüm (A^-) noktalarına olan uzaklıklarını birlikte değerlendirir.

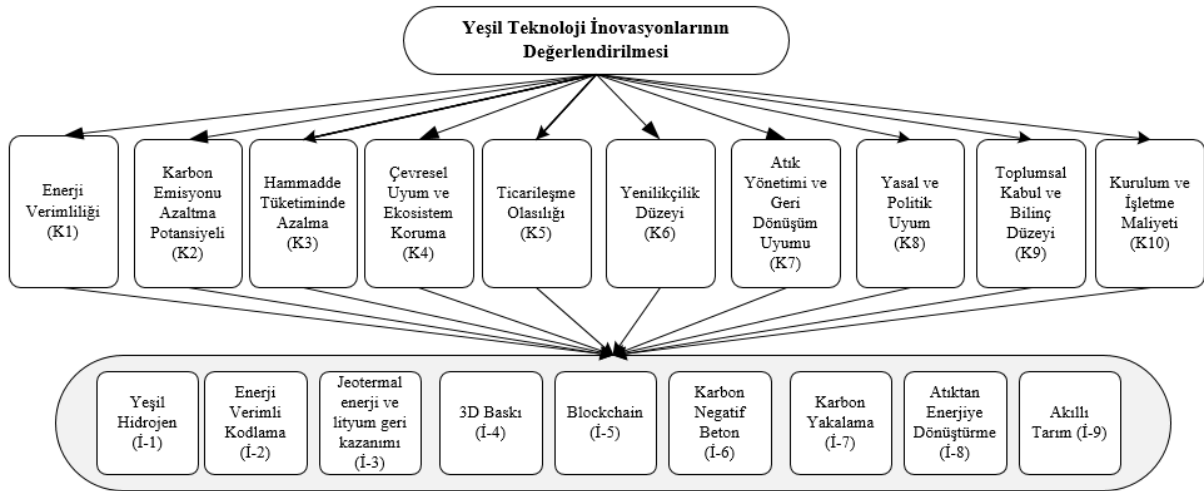
$$d(a, b) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_a - l_b)^2 + (m_a - m_b)^2 + (u_a - u_b)^2]} \quad d(a, b) \in R^+ \quad (18)$$

Her alternatifin yakınlık katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır. Yakınlık katsayısı 1'e ne kadar yakınsa alternatifin tercih edilme şansı o kadar artar.

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

4. Bulgular

Bu çalışmada geliştirilen kriter seti ve alternatif yeşil teknoloji inovasyonları literatür taraması ve uygulama alanlarının gereksinimleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Kriterler, çevresel sürdürülebilirliğin yanı sıra teknolojik uygulanabilirlik, ekonomik fizibilite ve toplumsal yaygınlaşma boyutlarını da kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır. Kriterlerin seçimi, sürdürülebilirlik, yeşil inovasyon ve ÇKKV literatüründeki yaygın kabul görmüş göstergelere dayanmaktadır. Enerji verimliliği, emisyon azaltımı, kaynak kullanımı, teknolojik uygulanabilirlik ve ekonomik sürdürülebilirlik hem OECD hem de UN SDG çerçevelerinde yeşil teknolojilerin temel performans belirleyicileri olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, son yıllarda yapılan ÇKKV çalışmalarında (ör., karbon yakalama, yenilenebilir enerji, döngüsel ekonomi uygulamaları) aynı kriter setinin sistematik biçimde kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan kriterler, literatürdeki kuramsal çerçeveyi ve uygulamaya yönelik güncel eğilimleri yansıtan kapsamlı bir yapı sunmaktadır. Böylece, yeşil teknoloji inovasyonlarının hem teorik hem de pratik düzeyde nesnel biçimde değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, yeşil teknoloji inovasyonu performansının değerlendirilmesi amacıyla hibrit bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu esas alınmıştır. Belirlenen kriterler ve alternatifler doğrultusunda karar hiyerarşisini gösteren model Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Yeşil teknoloji inovasyonlarının değerlendirilmesi için karar verme modeli

4.1. Bulanık AHP Yönteminden Elde Edilen Bulgular

Çalışmada ilk olarak bulanık AHP yönteminde Buckley algoritması kullanılarak yeşil teknoloji inovasyon performansını değerlendirme kriterleri Tablo 1’de verilen ölçeğe göre ikili olarak karşılaştırılarak kriterlerin önem ağırlıkları belirlenmiştir. Karşılaştırmalar, üç farklı disiplinden uzmanlardan oluşan bir karar verici ekip tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu ekip; bir çevre

mühendisi, bir endüstri mühendisi ve bir inovasyon uzmanından oluşmaktadır. Bu disiplinler arası yaklaşım, kriterlerin hem çevresel hem de teknolojik ve ekonomik boyutlarını dikkate alarak daha bütüncül bir değerlendirme yapılmasını sağlamıştır. Yeşil teknoloji inovasyonları kriterleri bu üç kişi tarafından ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Tablo 4’te 1. karar verici tarafından yapılan değerlendirme verilmiştir. 2. ve 3. karar vericinin sözel değerlendirmeleri ise ek’te verilmiştir.

Üç karar verici tarafından oluşturulan ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranları sırasıyla 0.090, 0.084 ve 0.074 olarak, grup karar matrisinin tutarlılık oranı ise 0.080 olarak hesaplanmıştır. Tüm değerler 0.10 eşik değerinin altında olduğundan, kriterler arasındaki ikili karşılaştırmalar tutarlı kabul edilmiştir.

Tablo 4. Değerlendirme kriterlerinin 1. karar verici tarafından sözel değerlendirilmesi

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
K1	ESÖ	EÖ	ZÖ	ÇKÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ
K2	EÖ	ESÖ	ZÖ	KÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ
K3	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ
K4	ÇKÖ	KÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K5	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	EÖ	ZÖ
K6	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ESÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	EÖ
K7	EÖ	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ESÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ
K8	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ÇKÖ	EÖ
K9	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ÇKÖ	ESÖ	ZÖ
K10	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ESÖ

Sonrasında, yeşil teknoloji inovasyonlarının değerlendirilmesinde kullanılan on kriterin birbirlerine göre göreceli önemleri, üç karar vericinin görüşlerinin geometrik ortalaması alınarak elde edilmiş ve elde edilen bulanık karar matrisi Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Bulanık karar matrisi

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K8	K10
K1	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(2,08, 4,22, 6,26)	(4,22, 6,26, 8,26)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(1,44, 3,56, 5,59)	(2,08, 4,21, 6,25)	(1, 3, 5)
K2	(0,14, 0,20, 0,33)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(5,59, 7,61, 9)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(1,44, 3,56, 5,59)	(2,08, 4,22, 6,26)	(1, 3, 5)
K3	(0,16, 0,24, 0,48)	(0,20, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1,44, 3,56, 5,59)	(1, 3, 5)	(1,44, 3,56, 5,59)	(1,44, 3,56, 5,59)	(1, 3, 5)	(1,44, 3,56, 5,59)
K4	(0,12, 0,16, 0,24)	(0,11, 0,13, 0,18)	(0,20, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(2,08, 4,22, 6,26)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(1,44, 3,56, 5,59)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
K5	(0,20, 0,33, 1)	(0,20, 0,33, 1)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,16, 0,24, 0,48)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(2,08, 4,22, 6,22)	(1,44, 3,56, 5,59)
K6	(0,20, 0,33, 1)	(0,20, 0,33, 1)	(0,20, 0,33, 1)	(0,14, 0,20, 0,33)	(0,20, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1,44, 3,56, 5,59)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1,44, 3,56, 5,59)
K7	(0,14, 0,20, 0,33)	(0,14, 0,20, 0,33)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,14, 0,20, 0,33)	(0,20, 0,33, 1)	(0,18, 0,28, 0,69)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(2,08, 4,22, 6,26)	(1, 3, 5)
K8	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,16, 0,28, 0,69)	(0,20, 0,33, 1)	(0,20, 0,33, 1)	(0,20, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1,71, 3,98, 6,08)	(1,44, 3,56, 5,59)
K9	(0,16, 0,24, 0,48)	(0,16, 0,24, 0,48)	(0,20, 0,33, 1)	(0,20, 0,33, 1)	(0,16, 0,24, 0,48)	(0,20, 0,33, 1)	(0,16, 0,24, 0,48)	(0,16, 0,25, 0,59)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
K10	(0,20, 0,33, 1)	(0,20, 0,33, 1)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,20, 0,33, 1)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,20, 0,33, 1)	(0,18, 0,28, 0,69)	(0,20, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

Son aşamada, eşitlik (4) kullanılarak kriter ağırlıkları üçgen bulanık sayılar olarak hesaplanmış ve Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Bulanık AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları

Kriterler	Kriter ağırlıkları		
K1	0,0796	0,2671	0,7517
K2	0,0561	0,1908	0,5466
K3	0,0378	0,1372	0,4451
K4	0,0354	0,1050	0,3144
K5	0,0261	0,0854	0,3075
K6	0,0214	0,0674	0,2589
K7	0,0167	0,0472	0,1644
K8	0,0154	0,0432	0,1824
K9	0,0114	0,0301	0,1232
K10	0,0103	0,0266	0,1282

4.2. Bulanık TOPSIS Yönteminden Elde Edilen Bulgular

Bu aşamada, yeşil teknoloji inovasyonları performanslarına göre sıralanmıştır. Bulanık AHP yöntemi kapsamında kriterlerin değerlendirmesini gerçekleştiren ekip, bu bölümde alternatif yeşil teknoloji inovasyonlarını, belirlenen kriterler doğrultusunda analiz etmiştir. Bu bağlamda, birinci karar vericiye ait dilsel değerlendirmeler Tablo 7’de, ikinci ve üçüncü karar vericilere ait değerlendirmeler ise eklerde sunulmuştur.

Tablo 7. Karar verici 1’e ait dilsel değerlendirmeler

Kriterler	Yeşil teknoloji inovasyonları								
	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	Oİ	Çİ	Oİ	OK	K	Oİ	OK	OK	Çİ
K2	Çİ	OK	Oİ	K	K	Oİ	Çİ	Oİ	OK
K3	Oİ	OK	Oİ	E	OK	Oİ	E	Oİ	E
K4	Oİ	OK	Oİ	E	K	Oİ	E	Oİ	E
K5	Oİ	Oİ	E	Çİ	Çİ	E	OK	OK	Çİ
K6	Oİ	Çİ	Oİ	Çİ	Çİ	E	E	Oİ	ZÖ
K7	OK	OK	E	Çİ	OK	OK	K	Çİ	Oİ
K8	OK	OK	Oİ	E	K	E	K	E	Oİ
K9	Oİ	Oİ	Oİ	E	K	E	K	E	Oİ
K10	K	Çİ	OK	Oİ	Çİ	E	Çİ	OK	E

Ardından, Tablo 8’de yeşil teknoloji inovasyonu alternatiflerinin belirlenen kriterler doğrultusunda değerlendirilmesine yönelik bulanık karar matrisi sunulmuştur. Söz konusu matris, eşitlik (6) kullanılarak üç farklı karar vericiden elde edilen değerlendirmelerin ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 8. Bulanık karar matrisi

Kriterler	Yeşil Teknoloji İnovasyonları								
	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	(5,7,9)	(8,3,9,7, 10)	(5,7,9,)	(1,3,5,)	(0, 1, 3)	(4,3, 6,3, 8,3)	(1, 3, 5)	(4,3, 6,3, 8,3)	(7,7, 9,3, 10)
K2	(8,3, 9,7, 10)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(0,3, 1,7, 3,7)	(0, 1, 3)	(5, 7, 9)	(8,3, 9,7, 10)	(5,7, 7,7, 9,3)	(1, 3, 5)
K3	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(3,7, 5,7, 7,7)
K4	(6,3, 8, 9,3)	(1,7, 3,7, 5,7)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(0,3, 1,7, 3,7)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(6,3, 8, 9,3)	(5, 7, 9)
K5	(5,7, 7,3, 8,7)	(6,3, 8, 9,3)	(3,7, 5,7, 7,7)	(9, 10, 10)	(7,7, 9,3, 10)	(3,7, 5,7, 7,7)	(1,7, 3,7, 5,7)	(2,3, 4,3, 6,3)	(8,3, 9,7, 10)
K6	(5, 7, 9)	(8,3, 9,7, 10)	(5, 7, 9)	(8,3, 9,7, 10)	(9, 10, 10)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
K7	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(8,3, 9,7, 10)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(0,7, 2,3, 4,3)	(8,3, 9,7, 10)	(5, 7, 9)
K8	(1,7, 3,7, 5,7)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(0,3, 1,7, 3,7)	(3, 5, 7)	(0,3, 1,7, 3,7)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
K9	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(2,3, 4,3, 6,3)	(0,3, 1,7, 3,7)	(3, 5, 7)	(0,7, 2,3, 4,3)	(3, 5, 7)	(8,3, 9,7, 10)
K10	(0,3, 1,7, 3,7)	(8,3, 9,7, 10)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(8,3, 9,7, 10)	(3,7, 5,7, 7,7)	(9, 10, 10)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)

Tablo 8’de verilen bulanık karar matrisi, eşitlik (10) ve eşitlik (11) yardımıyla seçim kriterlerinin faydalarını maksimize, maliyetlerini ise minimize edecek şekilde normalize edilerek Tablo 9’daki normalize edilmiş bulanık karar matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 9. Normalize edilmiş bulanık karar matrisi

Yeşil Teknoloji İnovasyonları									
Kriterler	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	(0.5, 0.7, 0.9)	(0.8, 1, 1)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,1,0.3)	(0.4,0.6,0.8)	(0.1,0.3,0.5)	(0.4,0.6,0.8)	(0.8,0.9,1)
K2	(0.8,1,1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.0,0.2,0.4)	(0.0,1,0.3)	(0.5,0.7,0.9)	(0.8,1,1)	(0.6,0.8,0.9)	0.1,0.3,0.5)
K3	(0.6,0.8,1)	(0.1,0.3,0.6)	(0.6, 0.8, 1)	(0.3, 0.6, 0.8)	(0.1,0.3,0.6)	(0.6, 0.8, 1)	(0.3,0.6,0.8)	(0.6,0.8,1)	(0.4,0.6,0.9)
K4	(0.7,0.9,1)	(0.2,0.4,0.6)	(0.5,0.8,1)	(0.3,0.5,0.8)	(0.0,2,0.4)	(0.5,0.8, 1)	(0.3, 0.5, 0.8)	(0.7,0.9,0.1)	(0.5, 0.8, 1)
K5	(0.6,0.7,0.9)	0.6,0.8,0.9)	(0.4,0.6,0.8)	(0.9,1,1)	(0.8,0.9,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.2,0.4,0.6)	(0.2,0.4,0.6)	0.8,1,1)
K6	(0.5,0.7,0.9)	(0.8,1,1)	(0.5,0.7,0.9)	(0.8,1,1)	(0.9,1,1)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
K7	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.5,0.7)	(0.8,1,1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.2,0.4)	(0.8,1,1)	(0.5,0.7,0.9)
K8	(0.2,0.4,0.6)	(0.1,0.3,0.6)	(0.6,0.8,1)	(0.3,0.6,0.8)	(0.0,2,0.4)	(0.3,0.6,0.8)	(0.0,2,0.4)	(0.3,0.6,0.8)	(0.6,0.8,1)
K9	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.2,0.4,0.6)	(0.0,2,0.4)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.2,0.4)	(0.3,0.5,0.7)	(0.8, 1, 1)
K10	(1,0.2,0.4)	(0.8,1,1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.8,1,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.9,1,1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)

Tablo 10’da verilen ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi, eşitlik (12) ve (13) kullanılarak Tablo 9’da verilen normalize edilmiş bulanık karar matrisinin bulanık AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları ile çarpılması sonucu elde edilmiştir.

Tablo 10. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi

Yeşil Teknoloji İnovasyonları									
Kriterler	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	(0.04,0.19,0.58)	(0.07,0.26,0.75)	(0.04,0.19,0.68)	(0.08,0.38,0.93)	(0.03,0.23,0.62)	(0.03,0.17,0.63)	(0.08,0.38,0.93)	(0.03,0.17,0.63)	(0.06,0.25,0.75)
K2	(0.05,0.18,0.55)	(0.01,0.06,0.27)	(0.03,0.13,0.49)	(0.00,0.03,0.20)	(0.02,0.16,0.39)	(0.03,0.13,0.49)	(0.05,0.18,0.58)	(0.03,0.15,0.51)	(0.01,0.06,0.27)
K3	(0.02,0.12,0.45)	(0.00,0.05,0.25)	(0.02,0.11,0.45)	(0.01,0.08,0.35)	(0.02,0.11,0.45)	(0.01,0.08,0.35)	(0.02,0.11,0.45)	(0.02,0.09,0.38)	(0.00,0.05,0.25)
K4	(0.02,0.09,0.31)	(0.06,0.05,0.19)	(0.02,0.08,0.30)	(0.01,0.06,0.24)	(0.00,0.02,0.15)	(0.01,0.06,0.24)	(0.00,0.02,0.15)	(0.01,0.04,0.20)	(0.02,0.08,0.30)
K5	(0.02,0.06,0.27)	(0.02,0.07,0.29)	(0.01,0.05,0.24)	(0.01,0.06,0.24)	(0.00,0.03,0.18)	(0.01,0.05,0.24)	(0.01,0.05,0.24)	(0.01,0.05,0.24)	(0.01,0.05,0.24)
K6	(0.01,0.05,0.23)	(0.02,0.07,0.26)	(0.01,0.05,0.23)	(0.02,0.07,0.26)	(0.01,0.03,0.18)	(0.00,0.03,0.18)	(0.01,0.03,0.18)	(0.01,0.05,0.23)	(0.01,0.05,0.23)
K7	(0.01,0.06,0.21)	(0.00,0.01,0.10)	(0.01,0.03,0.18)	(0.01,0.02,0.14)	(0.00,0.02,0.14)	(0.00,0.02,0.14)	(0.00,0.02,0.14)	(0.00,0.02,0.14)	(0.00,0.02,0.14)
K8	(0.00,0.02,0.12)	(0.00,0.01,0.07)	(0.00,0.02,0.12)	(0.00,0.01,0.07)	(0.00,0.01,0.06)	(0.00,0.01,0.06)	(0.00,0.01,0.06)	(0.00,0.01,0.07)	(0.00,0.01,0.07)
K9	(0.01,0.02,0.11)	(0.00,0.01,0.06)	(0.01,0.02,0.11)	(0.00,0.01,0.08)	(0.01,0.02,0.11)	(0.00,0.01,0.08)	(0.01,0.02,0.11)	(0.00,0.01,0.08)	(0.00,0.01,0.08)
K10	(0.01,0.00,0.05)	(0.01,0.03,0.13)	(0.00,0.01,0.06)	(0.01,0.02,0.12)	(0.01,0.03,0.13)	(0.00,0.02,0.10)	(0.01,0.0,0.13)	(0.00,0.01,0.06)	(0.00,0.01,0.09)

Bulanık TOPSIS yöntemi kapsamında her bir alternatife belirli kriterler açısından pozitif ideal çözüme olan uzaklık değerleri (d_i^+) eşitlik (16) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Her kriter için d_i^+ değerleri

Kriterler	Yeşil Teknoloji İnovasyonları								
	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	0,750	0,703	0,750	0,860	0,921	0,766	0,860	0,766	0,709
K2	0,770	0,895	0,807	0,926	0,942	0,807	0,770	0,797	0,895
K3	0,830	0,907	0,830	0,867	0,907	0,830	0,867	0,830	0,854
K4	0,866	0,924	0,875	0,904	0,954	0,875	0,904	0,866	0,875
K5	0,892	0,884	0,907	0,870	0,873	0,907	0,933	0,924	0,871
K6	0,908	0,892	0,908	0,892	0,891	0,929	0,929	0,908	0,908
K7	0,968	0,968	0,953	0,928	0,968	0,968	0,973	0,928	0,939
K8	0,956	0,962	0,928	0,945	0,973	0,945	0,973	0,945	0,928
K9	0,955	0,955	0,955	0,969	0,983	0,966	0,980	0,966	0,947
K10	0,980	0,947	0,976	0,955	0,947	0,962	0,947	0,976	0,965

Aynı şekilde, her bir alternatifin belirli kriterler açısından negatif ideal çözüme olan uzaklık değerleri (d_i^-) eşitlik (17) yardımıyla hesaplanmış ve Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Her kriter için d_i^- değerleri

Kriterler	Yeşil Teknoloji İnovasyonları								
	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	0,406	0,460	0,406	0,222	0,131	0,375	0,222	0,375	0,459
K2	0,334	0,161	0,295	0,117	0,095	0,295	0,334	0,307	0,161
K3	0,265	0,145	0,265	0,205	0,145	0,265	0,205	0,265	0,225
K4	0,189	0,113	0,181	0,140	0,072	0,181	0,140	0,189	0,181
K5	0,158	0,171	0,139	0,185	0,184	0,139	0,102	0,115	0,184
K6	0,137	0,154	0,137	0,154	0,155	0,106	0,106	0,137	0,137
K7	0,048	0,048	0,068	0,099	0,048	0,048	0,042	0,099	0,088
K8	0,067	0,059	0,107	0,083	0,043	0,083	0,043	0,083	0,107
K9	0,065	0,065	0,065	0,046	0,026	0,051	0,031	0,051	0,073
K10	0,028	0,076	0,037	0,068	0,076	0,057	0,076	0,037	0,052

Tablo 13’te her bir yeşil teknoloji inovasyon alternatifine ait pozitif ideal çözüme olan uzaklık (d_i^+), negatif ideal çözüme olan uzaklık (d_i^-) ve yakınlık katsayısı (CC_i) değerleri verilmiştir.

Tablo 13. Yeşili teknoloji inovasyonlarının d_i^+ , d_i^- ve CC_i değerleri

	Yeşil Teknoloji İnovasyonları								
	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
d_i^+	8,875	9,038	8,890	9,116	9,360	8,955	9,136	8,906	8,893
d_i^-	1,698	1,453	1,700	1,318	0,976	1,601	1,301	1,658	1,668
CC_i	0,161	0,138	0,161	0,126	0,094	0,152	0,125	0,157	0,158
Sıralama	1	5	1	6	8	4	7	3	2

Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek yakınlık katsayısı değeri yeşil hidrojen (İ-1) ve jeotermal enerji/lityum geri kazanımı (İ-3) alternatiflerinde (0,161) gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki inovasyonun tüm kriterler açısından dengeli ve ideal çözüme en yakın alternatifler olduğunu göstermektedir. Bu teknolojileri akıllı tarım (İ-9), atıktan enerjiye dönüştürme (İ-8) ve karbon negatif beton (İ-6) izlemiştir. Buna karşılık, en düşük yakınlık katsayısı değeri blockchain (İ-5) alternatifinde hesaplanmış; 3D baskı (İ-4) ve karbon yakalama (İ-7) teknolojileri de görece düşük uygunluk düzeyleri sergilemiştir.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma, yeşil teknoloji inovasyonlarının performansını değerlendirmek üzere geliştirilen hibrit bir ÇKKV modeli aracılığıyla yürütülmüştür. Modelde bulanık AHP ile kriter ağırlıkları belirlenmiş, ardından bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak alternatif yeşil teknolojiler sıralanmıştır.

Çalışma bulgularına göre “enerji verimliliği” en yüksek öneme sahip kriter olmuş, bunu “karbon emisyonunu azaltma potansiyeli” ve “hammadde tüketiminde azalma” izlemiştir. Bu sonuçlar, karbonsuzlaşma hedeflerinin ve enerji yönetiminin sürdürülebilir teknoloji politikalarındaki belirleyici rolünü yansıtmaktadır. Bulanık TOPSIS analizi sonucunda “yeşil hidrojen” ve “jeotermal enerji/lityum geri kazanımı” teknolojileri en yüksek genel performansa sahip alternatifler olarak belirlenmiş, “akıllı tarım” ve “atıktan enerjiye dönüştürme” teknolojileri de öne çıkan diğer çözümler olmuştur. Buna karşın “3D baskı”, “Blockchain” ve “karbon yakalama” gibi teknolojilerin alt sıralarda yer alması, çevresel etkilerinin henüz olgunlaşmadığını göstermektedir. Yöntemsel olarak hibrit bulanık AHP–TOPSIS entegrasyonu, belirsiz ortamlarda karar verici yargılarını sistematik biçimde modele dâhil ederek değerlendirme güvenilirliğini artırmıştır. Ancak uzman sayısının sınırlı olması ve kriter setinin belirli kapsamda kalması modelin genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Gelecek çalışmalarda yaşam döngüsü, döngüsel ekonomi ve sosyal sürdürülebilirlik kriterlerinin dâhil edilmesi önerilmektedir.

Çalışma bulguları, enerji verimliliği, karbon emisyonu azaltımı ve hammadde tüketiminin düşürülmesinin sürdürülebilir teknoloji politikalarının merkezinde yer alması gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, yeşil hidrojen ile jeotermal enerji/lityum geri kazanımı teknolojileri stratejik öncelik olarak desteklenmelidir. Yatırım teşvikleri, AR-GE fonları ve pilot uygulamalar yoluyla yaygınlaştırılmalıdır. Akıllı tarım ve atıktan enerjiye dönüşüm gibi orta seviyedeki çözümler için bölgesel uygulama programları ve dijital altyapı yatırımları güçlendirilmelidir. Çevresel etkileri henüz olgunlaşmamış olan 3D baskı, blockchain ve karbon yakalama teknolojilerinde ise erken aşama inovasyon destekleri, test alanları ve düzenleyici çerçeveler geliştirilerek potansiyel etkilerinin artırılması önerilmektedir.

Yapılan çalışma yeşil teknoloji inovasyonlarının performans değerlendirmesinde bütünlük, esnek ve belirsizliğe dayanıklı bir yaklaşım sunarak literatüre hem metodolojik hem de uygulamalı düzeyde katkı sağlamıştır. Gelecek araştırmalarda modelin farklı sektörlerde uygulanması ve yapay zekâ destekli karar sistemleriyle entegrasyonu, yeşil inovasyon yönetiminin gelişimine önemli katkılar sunacaktır.

Kaynaklar

- [1] Chen, Y. S., Lai, S. B., & Wen, C. T. (2006). The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, 67(4), 331–339.
- [2] OECD. (2023). *Green Technology and Innovation: OECD Insights*.
- [3] Zhang, W., Zhang, S., Chen, F., Wang, Y., & Zhang, Y. (2023). Does Chinese companies' OFDI enhance their own green technology innovation? *Finance Research Letters*, 104113.
- [4] Kemp, R., & Pearson, P. (2007). Final report MEI project about measuring eco-innovation. *UM Merit, Maastricht*, 10(2), 1-120.
- [5] Xu, Q., Li, X., Dong, Y., & Guo, F. (2025). Digitization and green innovation: how does digitization affect enterprises' green technology innovation?. *Journal of Environmental Planning and Management*, 68(6), 1282-1311.
- [6] Tariq, G., Sun, H., Ali, I., Pasha, A. A., Khan, M. S., Rahman, M. M., ... & Shah, Q. (2022). Influence of green technology, green energy consumption, energy efficiency, trade, economic development and FDI on climate change in South Asia. *Scientific reports*, 12(1), 16376.
- [7] Li, C., Solangi, Y. A., & Ali, S. (2023). Evaluating the factors of green finance to achieve carbon peak and carbon neutrality targets in China: a delphi and fuzzy AHP approach. *Sustainability*, 15(3), 2721.
- [8] Çelik, M. T., & Yıldız, A. (2024). Evaluation of Factors Affecting Innovation Productivity by Pythagorean Fuzzy AHP Method. *Verimlilik Dergisi*, 89-106.
- [9] 15 'Green' Tech Innovations And Practices That Can Help Protect The Environment. <https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2025/10/10/cloud-observability-challenges-at-scale-and-how-to-solve-them/>
- [10] Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., ... & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491.
- [11] Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. A., ... & Mahlia, T. I. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113941.
- [12] Zhang, M., Wang, S., Wu, J., Wei, W., Zhang, D., Zhou, Z., ... & Yang, Y. (2025). Toward Energy-Efficient Spike-Based Deep Reinforcement Learning With Temporal Coding. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 20(2), 45-57.
- [13] Wang, Y., Wu, D., & Li, H. (2022). Efficiency measurement and productivity progress of regional green technology innovation in China: a comprehensive analytical framework. *Technology Analysis & Strategic Management*, 34(12), 1432-1448.
- [14] Elshehabi, T., & Alfehaid, M. (2025). Sustainable geothermal energy: a review of challenges and opportunities in deep wells and shallow heat pumps for transitioning professionals. *Energies*, 18(4), 811.
- [15] Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158–167.
- [16] Zhou, H., Cheng, X., Jiang, X., Zheng, G., Zhang, J., Li, Y., ... & Lv, F. (2022). Green manufacturing-oriented polyetheretherketone additive manufacturing and dry milling post-processing process research. *Processes*, 10(12), 2561.
- [17] Mulligan, C., Morsfield, S., & Cheikosman, E. (2024). Blockchain for sustainability: A systematic literature review for policy impact. *Telecommunications Policy*, 48(2), 102676.
- [18] Liu, Y., Fang, Z., Cheung, M. H., Cai, W., & Huang, J. (2023). Mechanism design for blockchain storage sustainability. *IEEE Communications Magazine*, 61(8), 102-107.

- [19] Chen, L., Zhang, Y., Wang, L., Ruan, S., Chen, J., Li, H., ... & Tsang, D. C. (2022). Biochar-augmented carbon-negative concrete. *Chemical Engineering Journal*, 431, 133946.
- [20] Dang, C. N., Wipulanusat, W., Nuaklong, P., & Witchayangkoon, B. (2025). Assessing green innovation practices in construction firms: a developing-country perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 32(5), 3104-3131.
- [21] Leung, D. Y., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 426-443.
- [22] Mclaughlin, H., Littlefield, A. A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B. K., & Griffiths, S. (2023). Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 177, 113215.
- [23] Varjani, S., Shahbeig, H., Popat, K., Patel, Z., Vyas, S., Shah, A. V., ... & Tabatabaei, M. (2022). Sustainable management of municipal solid waste through waste-to-energy technologies. *Bioresource technology*, 355, 127247.
- [24] Hsu, H. W., Binyet, E., Nugroho, R. A. A., Wang, W. C., Srinophakun, P., Chein, R. Y., ... & Laemthong, T. (2024). Toward sustainability of Waste-to-Energy: An overview. *Energy Conversion and Management*, 321, 119063.
- [26] Azadi, H., Moghaddam, S. M., Burkart, S., Mahmoudi, H., Van Passel, S., Kurban, A., & Lopez-Carr, D. (2021). Rethinking resilient agriculture: From climate-smart agriculture to vulnerable-smart agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128602.
- [25] Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems*, 153, 69-80.
- [28] Wang, Y., & Yang, Y. (2021). Analyzing the green innovation practices based on sustainability performance indicators: a Chinese manufacturing industry case. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 1181-1203.
- [29] Fercoq, A., Lamouri, S., & Carbone, V. (2016). Lean/Green integration focused on waste reduction techniques. *Journal of Cleaner production*, 137, 567-578.
- [30] Mala, D., & Bencikova, D. (2018). Innovations of a green product. *Ekonomicko-manazerske spektrum*, 12(1), 64-74.
- [31] Guo, M., Nowakowska-Grunt, J., Gorbanyov, V., & Egorova, M. (2020). Green technology and sustainable development: Assessment and green growth frameworks. *Sustainability*, 12(16), 6571.
- [32] Stringfellow, W. T., & Dobson, P. F. (2021). Technology for the recovery of lithium from geothermal brines. *Energies*, 14(20), 6805.
- [33] Ali, A., Jiang, X., & Ali, A. (2023). Social ties, absorptive capacity, and the adoption of green innovation: a social capital perspective. *International Journal of Manpower*, 44(2), 214-230.
- [34] Jie, H. (2021). Overall optimization model of efficiency and performance of green technology innovation. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 30, 100501.
- [35] Taherdoost, Hamed, and Mitra Madanchian. "Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts." *Encyclopedia* 3.1 (2023): 77-87.
- [36] Thakkar, J. J. (2021). *Multi-criteria decision making*, 336, 1-365. Singapore: Springer.
- [37] Sahoo, S. K., & Goswami, S. S. (2023). A comprehensive review of multiple criteria decision-making (MCDM) Methods: advancements, applications, and future directions. *Decision Making Advances*, 1(1), 25-48.
- [38] Dağdeviren, M., Yavuz, S., & Kılınç, N. (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert systems with applications*, 36(4), 8143-8151.

- [39] Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). *Decision making with the analytic network process* (Vol. 282). Berlin, Germany: Springer Science+ Business Media, LLC.
- [40] Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247.
- [41] Sirisawat, P., & Kiatcharoenpol, T. (2018). Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers. *Computers & Industrial Engineering*, 117, 303–318.
- [42] Yıldız, A., & Demir, Y. (2019). Bulanık TOPSIS yöntemiyle Türkiye’nin yerli otomobili için en uygun fabrika yerinin seçimi. *Business & Management Studies: An International Journal*, 7(4), 1427-1445.
- [43] Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9.

Ek1. Yeşil teknoloji inovasyonları kriterlerinin 2. karar verici tarafından sözel değerlendirilmesi

2. Karar Verici Değerlendirilmesi										
Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
K1	ESÖ	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K2	EÖ	ESÖ	ZÖ	ÇKÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K3	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ
K4	EÖ	ÇKÖ	ZÖ	ESÖ	EÖ	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ
K5	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	EÖ
K6	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K7	EÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ
K8	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ
K9	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ
K10	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ

Ek2. Yeşil teknoloji inovasyonları kriterlerinin 3. karar verici tarafından sözel değerlendirilmesi

3. Karar Verici Değerlendirilmesi										
Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
K1	ESÖ	EÖ	EÖ	ÇKÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ
K2	EÖ	ESÖ	ZÖ	ÇKÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ
K3	EÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K4	ÇKÖ	ÇKÖ	ZÖ	ESÖ	EÖ	EÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K5	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K6	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K7	EÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ
K8	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ	ZÖ
K9	EÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ	ZÖ
K10	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ESÖ

Ek3. Yeşil teknoloji inovasyonu alternatiflerinin karar verici 2 tarafından dilsel değerlendirmesi

Yeşil Teknoloji İnovasyonları									
Kriterler	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	Oİ	İ	Oİ	OK	K	Oİ	OK	Oİ	İ
K2	Çİ	OK	Oİ	OK	K	Oİ	Çİ	İ	OK
K3	Oİ	OK	Oİ	E	OK	Oİ	E	Oİ	Oİ
K4	Çİ	E	Oİ	E	OK	Oİ	E	Çİ	Oİ
K5	E	Oİ	E	Çİ	İ	E	OK	OK	İ
K6	Oİ	Çİ	Oİ	Çİ	Çİ	E	E	Oİ	Oİ
K7	OK	OK	E	Çİ	OK	OK	OK	Çİ	Oİ
K8	E	OK	Oİ	E	K	E	K	E	Oİ
K9	Oİ	Oİ	Oİ	E	K	E	OK	E	Çİ
K10	OK	İ	OK	Oİ	Çİ	E	Çİ	OK	E

Ek4. Yeşil teknoloji inovasyonu alternatiflerinin karar verici 3 tarafından dilsel değerlendirmesi

Yeşil Teknoloji İnovasyonları									
Kriterler	İ-1	İ-2	İ-3	İ-4	İ-5	İ-6	İ-7	İ-8	İ-9
K1	Oİ	Çİ	Oİ	OK	K	E	OK	Oİ	İ
K2	İ	OK	Oİ	K	K	Oİ	İ	Oİ	OK
K3	Oİ	OK	Oİ	E	OK	Oİ	E	Oİ	E
K4	Oİ	OK	Oİ	E	K	Oİ	E	Oİ	Oİ
K5	Çİ	Çİ	Oİ	Çİ	İ	Oİ	E	Oİ	Çİ
K6	Oİ	İ	Oİ	Çİ	Çİ	E	E	Oİ	Oİ
K7	OK	OK	E	İ	OK	OK	OK	İ	Oİ
K8	OK	OK	Oİ	E	OK	E	OK	E	Oİ
K9	Oİ	Oİ	Oİ	OK	OK	E	OK	E	İ
K10	K	Çİ	OK	Oİ	İ	Oİ	Çİ	OK	E