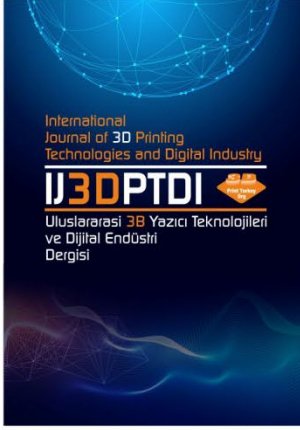




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

ELEKTRİKLİ ARAÇ BESLEME SİSTEMLERİNDE 3B BASKININ ÇEVRESEL ETKİLERİ VE MEVZUAT UYUMU

ENVIRONMENTAL IMPACTS AND REGULATORY COMPLIANCE OF 3D PRINTING IN ELECTRIC VEHICLE SUPPLY EQUIPMENT

Yazarlar (Authors): Zühre Aydın 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aydın Z.,
“Elektrikli Araç Besleme Sistemlerinde 3B Baskının Çevresel Etkileri ve Mevzuat Uyumu”
Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., 9(2): 294-309, (2025).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1715813

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

ELEKTRİKLİ ARAÇ BESLEME SİSTEMLERİNDE 3B BASKININ ÇEVRESEL ETKİLERİ VE MEVZUAT UYUMU

Zühre Aydın^a 

^aEnerji Piyasası Düzenleme Kurumu, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: zaydin@epdk.gov.tr

(Geliş/Received: 07.06.25; Düzeltme/Revised: 14.07.25; Kabul/Accepted: 15.07.25)

ÖZ

Elektrikli araçların yaygınlaşması, karbon nötrlüğü hedefleri doğrultusunda sadece araçların kendisiyle değil, aynı zamanda şarj altyapısının çevresel etkileriyle de doğrudan ilişkilidir. Bu çalışma, 3B baskı teknolojilerinin elektrikli araç şarj altyapısında kullanılan bileşenlerdeki ve elektrikli araç besleme donanımındaki karbon ayak izine etkisini değerlendirmekte ve söz konusu bileşenlerin çevresel mevzuatlara uygunluğunu analiz etmektedir. Literatürde nadiren karşılaşılan şekilde, karbon salımı, mevzuat uyumu, üretim maliyeti, yapısal dayanıklılık ve üretim süresi gibi çoklu kriterler bir arada ele alınmıştır. Çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak, üç boyutlu baskı yoluyla üretilen bileşenlerin geleneksel yöntemlerle üretilenlere kıyasla çevresel etki, maliyet ve mevzuat açısından uygunlukları değerlendirilmiştir. Monte Carlo tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci ile belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda, İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği ile geleneksel ve üç boyutlu baskı üretim yöntemlerinin çevresel ve yapısal uygunlukları karşılaştırılmıştır. Bulgular, üç boyutlu baskı ile üretilmiş bileşenlerin karbon salımında daha düşük üretim kaynaklı karbon emisyonu sunduğunu, ancak bu etkinin sürdürülebilir olması için mevzuatla entegre tasarım kriterlerinin gözetilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Çalışma, sürdürülebilir dijital üretim teknolojilerinin enerji altyapısına entegrasyonu konusunda özgün bir hesaplama metodolojisi çerçevesinde katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç, 3B Baskı, Karbon Ayak İzi, Monte Carlo AHP, TOPSIS, Çok Kriterli Karar Verme, Dijital Üretim, Elektrikli Araç Besleme Donanımı

ENVIRONMENTAL IMPACTS AND REGULATORY COMPLIANCE OF 3D PRINTING IN ELECTRIC VEHICLE SUPPLY EQUIPMENT

ABSTRACT

The widespread adoption of electric vehicles is directly linked not only to the vehicles themselves but also to the environmental impacts of the associated charging infrastructure, in alignment with carbon neutrality targets. This study evaluates the carbon footprint of components used in electric vehicle charging infrastructure and electric vehicle supply equipment through 3D printing technologies while also analyzing them. It also analyzes their compliance with relevant environmental regulations. Unlike most studies in the literature, this research simultaneously considers multiple criteria including carbon emissions, regulatory compliance, production cost, structural durability, and production time. Using multi criteria decision-making methods, the environmental impact, cost efficiency, and regulatory alignment of 3D printed components are compared to those produced by conventional methods. Based on criterion weights determined through a Monte Carlo based Analytic Hierarchy Process, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution is employed to rank conventional and additive manufacturing technologies according to their environmental and structural suitability. The findings reveal that 3D printed components

offer lower production related carbon emissions; however, for this advantage to be sustainable, integration with regulatory compliant design principles is essential. This study provides an original methodological framework for evaluating the integration of sustainable digital manufacturing technologies into energy infrastructure systems.

Keywords: Electric Vehicle, 3D Printing, Carbon Footprint, Monte Carlo AHP, TOPSIS, Multi-Criteria Decision Making, Digital Manufacturing, Electric Vehicle Supply Equipment

1. GİRİŞ

Elektrikli araç (EA) Şarj Ekipmanları/Elektrikli Araç Besleme Donanımı (Electric Vehicle Supply Equipment, EVSE) üretiminde üç boyutlu (3B) baskı teknolojisinin benimsenmesi, ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılmasında önemli bir potansiyel göstermektedir. Curran vd. [1], yeni nesil araçlarda enerji aktarma bileşenlerinin hızlı 3B baskı yoluyla üretilen prototiplemesi için Büyük Ölçekli Eklemeli Üretim (Big Area Additive Manufacturing, BAAM)'in uygulanabilirliğini göstererek, geleneksel yöntemlere kıyasla geliştirme süresinde bataryalı elektrikli aktarma bileşeninin entegrasyonunu gerçekleştirmiştir. Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design, CAD) 'dan fiziksel parçaya uzanan bu entegre süreç, geleneksel şasi geliştirme yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde zaman tasarrufu sağlamış ve prototipleme süreçlerini hızlandırmadaki potansiyelini ortaya koymuştur. Kang vd. [2], büyük veri analitiğini kullanarak enerji tüketim desenlerini optimize eden akıllı şarj sistemleri geliştirmiş ve bu sayede yoğun talep dönemlerinde şebeke üzerindeki yükü azaltmıştır. Hachey [3], EA üretimi için mikro-fabrika modelini inceleyerek, dağıtılmış 3B baskı tesislerinin tedarik zinciri emisyonlarını %35'e kadar azaltabileceğini ve kitlesel özelleştirmeyi mümkün kılabileceğini ortaya koymuştur. Moon vd. [4], veri odaklı üretim sistemlerinin gerçek zamanlı kaynak optimizasyonu yoluyla sürdürülebilir üretimi nasıl desteklediğini vurgulamıştır. Tseng ve Li [5], özelleştirilmiş EA bileşenleri için optimal 3B baskı parametrelerini seçmek üzere Analitik Ağ Süreci (Analytical Network Process, ANP) ve İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) yöntemlerini kullanan bir karar verme çerçevesi sunmuş ve malzeme verimliliğinde %22'lik bir iyileşme sağlamıştır.

Bu yaklaşımlar, EVSE gelişiminin hem teknik hem de çevresel yönlerini ele almaktadır.

EA şarj altyapısında standardizasyon çabaları önemli bir rol oynamıştır. Pallander [6], araçtan şebekeye (Vehicle to Grid, V2G) iletişim için HomePlug Green PHY standardını uygulamış, Serohi [7] ise 3B baskının kesintiler sırasında tedarik zinciri dayanıklılığını nasıl artırdığını belgeleyerek bu alana katkıda bulunmuştur. Elavarasan vd. [8], akıllı şarjın 2030 yılına kadar AB ulaşım sektörü emisyonlarını %18 ile %25 oranında azaltabileceğini gösteren kapsamlı karbonsuzlaşma stratejileri analizi sunmuştur. Zhang ve Ran [9], lityum iyon (LIB) ve sodyum iyon (SIB) bataryalarında yük/iyon taşınımını iyileştirmeye yönelik 3B karbon bazlı elektrotların tasarım stratejilerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, 3B elektrot mimarilerinin iyon ve elektron iletimi üzerindeki etkilerini optimize etmek amacıyla çeşitli malzeme mühendisliği teknikleri, nano/mikro yapılar ve gözenekli tasarım yaklaşımları değerlendirilmiştir. Yöntem olarak literatürdeki güncel çalışmalar derinlemesine analiz edilmiş; elektrot geometrisinin, elektriksel iletkenliğin ve iyon difüzyon yollarının performans üzerindeki etkileri sistematik olarak sınıflandırılmıştır. Sonuç olarak, 3B karbon bazlı elektrotların enerji yoğunluğu, döngü kararlılığı ve iletkenlik açısından önemli avantajlar sunduğu gösterilmiş, gelecekteki batarya teknolojileri için yüksek performanslı elektrot tasarımı açısından yönlendirici ilkeler ortaya konulmuştur.

Malzeme bilimi ve üretim alanındaki son gelişmeler ilerlemeyi daha da hızlandırmıştır. Tarancón vd. [10], enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinde 3B baskılı enerji bileşenlerinin EA sistemlerinde de %30 ağırlık azaltımı sağlayabileceğini belirtmiştir. Jovanović vd. [11], eklemeli olarak üretilmiş otonom araç

bileşenlerinin %23 daha düşük karbon ayak izine sahip olduğunu raporlamıştır. Rosado vd. [12], şarj verimliliğini izlemek için düşük maliyetli enerji sayaçları geliştirerek veri odaklı optimizasyona olanak tanımıştır. Rabih vd. ile Hussein vd. [13-14], sürdürülebilir EA gelişimi çerçevesinde sırasıyla kablosuz şarj ve araç modelleme çerçevelerini ilerleterek teknik performans ve emisyon azaltımı arasında sinerji yaratmıştır.

Sürdürülebilir EA gelişimi için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) önemli bir metodoloji haline gelmiştir. Kumar vd. [15], 12 teknik ve çevresel parametreyi kullanarak motor seçiminde optimizasyon yapmış, Kumar ve Farhan [16] ise şebeke güvenilirliğini %19 artıran optimal şarj istasyonu yerleşim algoritmaları geliştirmiştir. Prasittisopin [17], 3B baskının akıllı şehir gelişimine katkısını %28 daha hızlı altyapı yayılımı gösteren vaka çalışmalarıyla ortaya koymuştur. Sama [18], batarya enerji yoğunluğunu %40 artırabilecek grafenle güçlendirilmiş malzemeleri tanıtarak EA menzili ve şarj sıklığı üzerinde önemli bir etki yaratmıştır.

Dijital üretim ve döngüsel ekonomi ilkelerinin kesişimi kapsamında; Singh ve Sehgal [19], 3B baskının kullanım ömrünü tamamlamış bileşenlerin yeniden üretimini nasıl mümkün kıldığını ve malzeme atıklarını %65'e kadar azaltabileceğini belgeleyerek bu alana katkıda bulunmuştur. Shuker [20], elektromekanik sistemler için gelişmiş yeniden üretim teknikleri geliştirerek bu araştırmayı genişletmiştir. Marinkovic [21], EA gövde ağırlığını %30 azaltabilecek sürdürülebilir kompozit malzemeleri tanımlamış ve Owen ile Hayes [22], bu yeniliklerin yenilenebilir enerji entegrasyonu ile birleştirildiğinde 2030 yılına kadar üretim emisyonlarını %50 azaltabileceğini öngörmüştür. Jaller vd. [23], sıfır ve sıfıra yakın emisyonlu araçların benimsenmesini etkileyen faktörleri değerlendirmeyi amaçlamıştır. Araç türleri olarak hibrit elektrikli, batarya elektrikli ve hidrojen yakıt hücresi sistemleri ele alınmıştır. Düşük anket katılımı nedeniyle uzman görüşlerine dayalı Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS yöntemiyle çok kriterli karar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ekonomik, çevresel ve altyapısal açılardan bataryalı EA'ların kısa

mesafelerde daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, sıfır emisyonlu araçların benimsenmesinin önündeki temel engellerin altyapı eksikliği, menzil kaygısı ve maliyet yapısı olduğunu ortaya koyarken; politika teşvikleri, filo dönüşüm planları ve teknolojik gelişmelerin bu araçların yaygınlaşmasında kritik rol oynayacağını göstermiştir.

EVSE bileşenlerinin 3B baskı teknolojisiyle üretilmesi, üretim süreçlerinin dijitalleşmesini sağlarken aynı zamanda karbon nötrlüğü hedefleri doğrultusunda çevresel ve teknik düzenlemelere yüksek düzeyde uyum gerektirir. EA şarj istasyonlarında kullanılan 3B baskı teknolojileriyle üretilen parçaların güvenli, dayanıklı ve standartlara uygun olması için belirli teknik düzenlemelere uyulması önemlidir. Bu kapsamda, üretimde kullanılan malzemelerin toksik içeriğe sahip olmaması için Zararlı Maddelerin Kısıtlanması Direktifi (Restriction of Hazardous Substances, RoHS) ve Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması Tüzüğü (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, REACH) gibi düzenlemeler doğrultusunda kimyasal güvenlik sağlanmalıdır. Üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini güvence altına almak amacıyla, Çevre Yönetim Sistemi Standardı (Environmental Management System, ISO 14001) ile kurumsal çevre politikalarının uygulanması ve ürünlerin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü boyunca sistematik şekilde analiz edilmesini sağlayan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Standartları (Life Cycle Assessment Standards, ISO 14040 / ISO 14044) dikkate alınmalıdır [24-27]. Avrupa Birliği (AB) pazarına sunulacak ürünler için CE (Conformité Européenne) işareti kapsamında temel sağlık, güvenlik ve çevre gerekliliklerine uygunluk belgelenmeli, ayrıca Elektrikli ve Elektronik Atık Yönetimi Direktifi (Waste of Electrical and Electronic Equipment Directive, WEEE) çerçevesinde geri dönüştürülebilirlik tasarım sürecine entegre edilmelidir. 3B baskıya özgü standartlar ise özellikle ISO/ASTM 52900 serisi altında tanımlanmakta olup; parça tasarımı (ISO/ASTM 52910), eklemeli üretimde dosya formatı uyumluluğu (ISO/ASTM 52915) ve tedarik edilen parçalar için kalite gereksinimleri (ISO/ASTM 52901) gibi temel teknik ilkeleri

kapsamaktadır. Bu standartlar, EVSE bileşenlerinin TS EN IEC 62196 gibi elektriksel bileşen güvenlik normları ve yukarıda belirtilen çevresel regülasyonlarla birlikte değerlendirilmesine olanak tanıyarak, sürdürülebilir üretim zincirinde izlenebilirlik ve teknik güvenliği bütüncül biçimde sağlamaktadır [28-34]. Türkiye'de EA şarj sistemleri özelinde TS EN IEC 61851-1 standardı kapsamında şarj ünitelerinin teknik performans, güvenlik ve haberleşme protokolleri tanımlanmakta; ayrıca EA şarj istasyonları için güvenlik kurallarını, muayene, deney ve yeterliliğin gereklerini belirleyen TS 13912 standardı, EVSE ekipmanlarında kullanılacak bileşenlerin çevresel ve elektriksel güvenlik kriterlerini içermektedir. Bu bağlamda, EVSE bileşenlerinin 3B baskı ile üretiminde TSE onaylı standartların da entegrasyonu, yerel regülasyonlara uygunluk açısından kritik önemdedir [35-36]. TS EN IEC 61439-7 standardı, elektrikli araç şarj istasyonları gibi özel uygulamalar için alçak gerilim panolarının güvenlik ve performans gerekliliklerini tanımlar; 3B baskılı panoların hafif tasarım, özelleştirilebilirlik ve hızlı prototipleme avantajları, bu standart kapsamında test edilerek uygunluk sağlayabilir [37]. Standartlara uyum, EVSE sistemlerinin 3B baskı teknolojisi ile üretilen parçaları için yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmayıp aynı zamanda kullanıcı güvenliği ve uluslararası pazar erişimi açısından da önemlidir.

Dünyada mevzuat ve uygulama yaklaşımları doğal olarak farklılık gösterse de AB, EA araçlar konusunda, özellikle mevzuat geliştirme ve destekleyici politika çerçevesi oluşturma açısından öncü olmuştur. Bu kapsamda Yeşil Mutabakat (Green Deal) gibi stratejik belgelerle bu süreci yapılandırmıştır [38]. Bununla birlikte, AB, EA'ların ticarileştirilmesi ve düzenlenmesi konusunda Çin ve ABD'den farklı, kendi normatif yapısına özgü bir yol izlemekte, özellikle veri yönetimi, dijital hizmetler ve güvenlik politikaları gibi alanlarda Dijital Hizmetler Yasası (Digital Services Act, DSA), Genel Veri Koruma Tüzüğü (General Data Protection Regulation, GDPR) gibi düzenleyici mekanizmalar çerçevesinde politika üretmektedir [39-40]. Bu bağlamda, EA şarj altyapısında düşük atık üretim avantajına sahip 3B baskı

teknolojilerini benimsemesi, yalnızca karbon salımını azaltan sürdürülebilir üretim stratejilerine katkı sunmakla kalmamakta, aynı zamanda yerli üretim kapasitesinin artırılması ve teknoloji tabanlı sanayi politikalarının uygulanmasına da doğrudan hizmet etmektedir. Bölgesel farklılıkları dikkate alan çok katmanlı bir değerlendirme perspektifi, hem uygulayıcılar hem de politika yapımcılar açısından anlamlı sonuçlar üretmektedir. EA şarj altyapısında ve genel otomotiv üretiminde düşük atık üretim avantajına sahip 3B baskı teknolojilerini benimsemesi, yalnızca karbon emisyonlarını azaltan sürdürülebilir üretim stratejilerine katkı sunmakla kalmamakta, aynı zamanda yerli üretim kabiliyetini artırarak sanayide dijitalleşme ve döngüsel ekonomi hedeflerine hizmet etmektedir [41-42].

3B baskı teknolojilerinin EA bileşenlerinin üretiminde sunduğu çevresel avantajlara rağmen, özellikle seri üretim ölçeğinde maliyet etkinliği konusu literatürde sınırlı incelenmiştir. 3B baskı döngüsel ekonomi ve düşük karbon emisyonu hedeflerine katkıda bulunmaktadır ancak yüksek üretim süresi ve malzeme maliyetleri nedeniyle bu teknolojinin geleneksel yöntemlerle rekabetçiliğinin detaylı analizi literatürde yer almamaktadır. Bu çalışma, bu literatür boşluğunu dikkate alarak, 3B baskı teknolojilerinin çevresel etkilerini çok kriterli karar modeliyle değerlendirirken, maliyet boyutunu da sınırlılıklar kapsamında ele almaktadır.

Bu çalışmanın amacı, EA şarj ekipmanları ve diğer bileşenlerinin üretiminde kullanılan 3B baskı gibi farklı imalat teknolojilerinin, karbon salımı, mevzuat uyumu, üretim maliyeti, yapısal dayanıklılık ve üretim süresi parametreleri çerçevesinde; karbon ayak izi, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkısını çok kriterli karar analizi ile değerlendirmektir. Bu kapsamda kriter ağırlıkları, karar kriterlerindeki belirsizlikleri ve varyasyonları istatistiksel olarak modelleyerek daha güvenilir ve sağlam ağırlık değerleri elde eden Monte Carlo tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (MC-AHP) ile belirlenmiş, alternatif üretim yöntemleri ise her alternatifin ideal çözüme olan göreceli yakınlığını ölçerek çok kriterli karar problemlerinde en uygun seçeneği belirleyen TOPSIS yöntemiyle karşılaştırılmıştır.

2. METODOLOJİ: KARBON NÖTR HEDEFLER DOĞRULTUSUNDA EVSE ÜRETİMİNDE 3B BASKI TEKNOLOJİSİ VE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YAKLAŞIMI

Çalışmada önerilen yöntem ile AHP kriter seçiminde belirsizlik Monte Carlo simülasyonu ile modellenmiş, TOPSIS ile ideal çözüme göre sistematik sıralama imkanı sunulmuştur.

Bu çalışma, EVSE üretiminde 3B baskı teknolojilerinin uygulanabilirliğini ve sürdürülebilirlik etkisini ÇKKV yaklaşımıyla değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Temel amaç, EVSE üretiminde geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında 3B baskı teknolojisinin karbon nötrlüğü hedeflerine katkısını teknik, çevresel ve düzenleyici kriterler açısından sayısal olarak analiz etmektir. Bu doğrultuda, MC-AHP ve TOPSIS entegre edilerek hibrit bir karar destek metodolojisi oluşturulmuştur. Çalışmada karar verici konumundaki enerji sektörü yöneticilerinin, alternatif üretim teknolojileri arasında en sürdürülebilir ve uygulanabilir yöntemi seçebilmelerine olanak sağlayan MC-AHP ile TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanıldığı entegre bir ÇKKV modeli geliştirilmiştir.

MC-AHP, karar vericinin öznel yargılarından kaynaklanan belirsizlikleri istatistiksel olarak modellemek ve kriter ağırlıklarını daha güvenilir bir şekilde elde etmek amacıyla bu çalışmada tercih edilmiştir. Bu yöntem, klasik AHP'nin deterministik doğasını genişleterek, özellikle karbon salımı, mevzuat uyumu ve üretim süresi gibi çevresel ve teknik kriterlerin ağırlıklandırılmasında stokastik varyasyonları dikkate almayı mümkün kılmaktadır. MC-AHP kullanım amacı ve gerekçesi, hem belirsizlik içeren karar ortamlarında daha güvenilir kriter ağırlıkları üretmek, hem de geleneksel AHP'nin karar verici öznelliğine dayalı deterministik yapısını istatistiksel yaklaşımlarla desteklemektir [43-44].

Çalışmada MC-AHP ile kriter ağırlıkları belirlenmiş, bu ağırlıklar TOPSIS yöntemine entegre edilerek her üretim yönteminin ideal çözüme yakınlığı hesaplanmıştır. TOPSIS yöntemi, her bir alternatifin pozitif ideal (en iyi)

ve negatif ideal (en kötü) çözümlere olan Öklidyen uzaklığını esas alarak, alternatiflerin çok kriterli bir yapıda sıralanmasını sağlar. Bu yöntemin tercih edilme nedeni, karbon ayak izi, mevzuat uyumu, maliyet, üretim süresi ve yapısal bütünlük gibi farklı ölçüm türlerine sahip kriterleri normalize ederek tek bir skorla karşılaştırma imkânı sunmasıdır. Böylece, sürdürülebilirlik temelli karar verme süreci hem istatistiksel hem de analitik olarak sağlamlaştırılmıştır [45-47].

Bu çalışmada kullanılan kriterler ve üretim teknolojisi alternatifleri, tematik analiz temelli bir literatür tarama süreciyle yapılandırılmıştır. İlk olarak, Google Scholar, Scopus ve Web of Science veri tabanlarında, karbon ayak izi, mevzuat uyumu, maliyet, üretim süresi ve yapısal dayanıklılık anahtar kelimeleri kullanılarak, 2020 sonrası yayımlanan 3B baskı teknolojilerine ilişkin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) temelli akademik yayınlar incelenmiştir. Bu literatür taramasında yer alan çalışmalarda, çevresel ve yapısal performans göstergeleri sistematik olarak kodlanmış ve tematik analiz yöntemiyle gruplanarak çalışmada kullanılan kriter seti oluşturulmuştur. Üretim teknolojilerine ilişkin alternatifler ise, yine literatürden elde edilen çevresel etki karşılaştırmalarına ve Çevresel Ürün Beyanı (Environmental Product Declaration, EPD) veri tabanlarından alınan nicel göstergelere dayalı olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda; enjeksiyon kalıplama (Injection Molding), metal döküm (Metal Casting), polilaktik asit (Polylactic Acid, PLA) ile 3B baskı, akrilonitril bütadien stiren (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS) ile 3B baskı ve geri dönüştürülmüş PLA/ABS filamentler ile 3B baskı gibi üretim alternatifleri, çevresel metrikler açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve EVSE bileşen üretimi bağlamında sınıflandırılmıştır. Böylece çalışmada yer alan kriter ve alternatifler, bilimsel geçerliliğe ve uygulama bağlamına dayalı, analitik ve karşılaştırılabilir bir biçimde tanımlanmıştır [48-49].

Bu çalışmada kullanılan Ecoinvent ve GaBi veri tabanlarının seçimi, LCA uygulamalarında metodolojik tutarlılık ve sonuç güvenilirliği açısından önem arz etmektedir. Herrmann ve

Moltesen, SimaPro ve GaBi gibi farklı LCA araçlarının aynı süreç verileri üzerinde nasıl değişken sonuçlar üretebildiğini karşılaştırmalı olarak incelemiş ve veri tabanı seçiminin çevresel çıktıların doğruluğunu doğrudan etkilediğini vurgulamıştır. Öte yandan, 3B baskı tabanlı üretim süreçlerinin yaşam döngüsü perspektifinden değerlendirilmesinde, Tinoco vd., çevresel sürdürülebilirliği etkileyen temel değişkenlerin malzeme kompozisyonu, üretim yöntemi ve bölgesel veri farklılıkları olduğunu sistematik bir literatür taramasıyla ortaya koymuştur. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan Ecoinvent v3.9 ve GaBi Professional 10 sürümlerine ait süreç verileri, hem uluslararası karşılaştırılabilirliği sağlamak hem de karbon ayak izi analizini teknik yönden sağlam temellere oturtmak amacıyla tercih edilmiştir [50-57].

Yürütülen tematik analiz kapsamında, her üretim alternatifi; enjeksiyon kalıplama, metal döküm, 3B baskı, PLA, ABS, geri dönüştürülmüş PLA/ABS, beş temel kriter doğrultusunda sistematik biçimde eşleştirilmiştir. Karbon ayak izi (C1) kriteri, LCA tabanlı çalışmalar ve EPD veri setlerinden elde edilen birim başına CO₂ salımı değerleri üzerinden hesaplanmıştır. Mevzuat uyumu (C2) kriteri, RoHS, ISO 14001 ve çevresel etiketleme standartlarına uygunluk durumuna göre değerlendirilmiştir. Üretim maliyeti (C3), literatürde raporlanan birim maliyet analizleri ve düşük hacimli üretimlerde 3B baskının sağladığı maliyet avantajları temel alınarak tanımlanmıştır. Yapısal dayanıklılık (C4), malzeme mukavemeti, sıcaklık ve mekanik yük dayanımı gibi niteliksel ve niceliksel göstergelerle ölçülmüştür. Üretim süresi (C5) ise her teknolojiye birim üretim süresi ve esnek üretim kapasitesine ilişkin verilerle karşılaştırmalı olacak şekilde tasarlanmıştır [58-60].

Bu eşleştirme süreci, her alternatifin kriterler karşısındaki performansını somut verilerle ilişkilendirmiş; karar matrisine entegre edilmeden önce bilimsel geçerliliğe sahip ölçütlere dayalı olarak yapılandırılmıştır. Böylece, alternatifler ile kriterler arasında metodolojik olarak izlenebilir ve objektif temelli bir bağ kurulmuş, çok kriterli karar analizi sürecinin doğruluğu ve güvenilirliği artırılmıştır.

Bu metodoloji, belirsizlikleri MC-AHP ile minimize ederken, TOPSIS ile objektif bir sıralama sağlanmıştır. Çalışma sonuçlarının, politika belirleme süreçlerine bilimsel destek sunacağı düşünülmektedir. Bu çerçevede çalışmanın metodolojisi, aşağıda yer alan adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1. Problemin Tanımı

Üretim sürecinde düşük karbon salımı, çevresel mevzuat uyumu, yapısal bütünlük, maliyet etkinliği ve üretim süresi gibi çoklu kriterler göz önüne alınarak alternatif üretim teknolojilerinin, özellikle 3B baskı yöntemlerinin, değerlendirilmesi gerekmektedir.

Adım 2. Kriterlerin Belirlenmesi

Kriterler, EA bileşen üretiminde çevresel ve yapısal performansı belirleyen faktörler olarak literatür taraması ve sektörel regülasyonlara göre tanımlanmış; karbon ayak izi, mevzuat uyumu, maliyet, üretim süresi ve yapısal dayanıklılık olmak üzere beş temel kriter belirlenmiştir. MC-AHP yöntemiyle bu kriterler arasında yapılan ikili karşılaştırmalar üzerinden istatistiksel güvenilirlik içeren ağırlıklar elde edilmiştir.

Adımlar:

1.Kriterlerin Belirlenmesi:

Literatür taraması ve çevresel performans odaklı tematik analizle belirlenen beş kriter (karbon ayak izi, mevzuat uyumu, maliyet, üretim süresi, dayanıklılık) karar probleminde temel teşkil etmiştir.

2.İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması:

Kriterler arası öncelik ilişkileri, uzman görüşleriyle ikili karşılaştırma matrislerine dönüştürülmüştür.

3.Monte Carlo Tabanlı Ağırlık Hesaplaması:

10.000 iterasyonla rastgele varyasyonlar uygulanmış; her iterasyonda tutarlılık oranı ($CR \leq 0,1$) sağlanmıştır.

4.İstatistiksel Ağırlıkların Elde Edilmesi:

Her kriter için dağılım üzerinden medyan, ortalama ve %90 güven aralığı ile ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

5.Sonuçların Görselleştirilmesi:

Kriter ağırlıklarının dağılımları Boxplot ve istatistiksel tablolarla sunulmuş, karar verme sürecine belirsizlik uyarlaması entegre edilmiştir.

Adım 3. Alternatiflerin Belirlenmesi

Bu çalışmada, EVSE bileşenlerinin üretiminde kullanılan beş farklı yöntem alternatif olarak belirlenmiştir: enjeksiyon kalıplama, metal döküm, PLA (Polylactic Acid) ile 3B baskı, ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ile 3B baskı ve geri dönüştürülmüş PLA/ABS ile 3B baskı. Alternatiflerin seçimi, 2020 sonrası tematik analiz için literatür taramaları ve çalışmada yer alan standart ve regülasyonlara uygunluk temelinde yapılmıştır.

Adım 4. Karar Matrisinin Oluşturulması

Alternatiflerin kriterler karşısındaki performans değerleri bir matris (1) şeklinde gösterilir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 5. MC-AHP ile Ağırlıklandırma

Geleneksel AHP yöntemi, uzmanların ikili karşılaştırmalarına dayalı ağırlık hesaplar. Ancak belirsizlikleri modellemek için MC-AHP kullanılır:

- Kriterler arası ikili karşılaştırmalar yapılır.
- Tutarlılık indeksi ($CR \leq 0,1$) kontrol edilir.
- Ağırlıklar, rassal varyasyonlarla simüle edilerek daha güvenilir sonuçlar elde edilir.

Adım 6. TOPSIS ile İdeal Çözüme Yakınlık Sıralaması

TOPSIS yöntemi, alternatifleri ideal çözüme yakınlığına göre sıralar.

Adımlar:

1.Normalizasyon: Karar matrisi normalize edilir.

2.Ağırlıklandırılmış Matris: MC-AHP'den gelen ağırlıklar uygulanır.

3.İdeal ve Negatif İdeal Çözümler Belirlenir:

- A^+ : Her kriter için en iyi değer
- A^- : Her kriter için en kötü değer

4.Uzaklık Hesaplama:

- D_i^+ : Alternatifin ideal çözüme uzaklığı
- D_i^- : Alternatifin negatif ideal çözüme uzaklığı

5.Göreceli Yakınlık Katsayısı:
 $C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$

Adım 7. Sonuçların Yorumlanması ve Politik Öneriler: TOPSIS sonuçlarına göre en iyi alternatif belirlenir. Politika yapımcılar için öneriler sunulur.

2.1. Kriterlerin Belirlenmesi ve MC-AHP Uygulaması

Kriter belirleme aşamasında, literatüre dayalı olarak karbon salımı, çevresel mevzuat uyumu, üretim maliyeti, yapısal dayanıklılık ve üretim süresi gibi enerji altyapısında kritik kabul edilen beş temel kriter tanımlanmıştır. Karbon salımı, üretim sürecinde ortaya çıkan toplam sera gazı emisyonunu yansıtmakta; mevzuat uyumu ise RoHS ve ISO 14001 düzenleyici standartlarla teknik uyumluluğu temsil etmektedir. Üretim maliyeti ve süresi, operasyonel verimliliği; yapısal dayanıklılık ise bileşenin yaşam döngüsü ve güvenlik gereksinimlerine uyumunu ölçmektedir.

Önerilen model, 3B baskının geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla karbon salımı, çevresel mevzuat uyumu, üretim maliyeti, yapısal dayanıklılık ve üretim süresi gibi kritik kriterlerdeki performansını sayısal olarak değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

Kriterler, sistematik literatür taramasına dayalı tematik analiz ile belirlenmiştir:

- C1: Karbon Ayak İzi (kg CO2-eq)
- C2: Regülasyon Uygunluğu (RoHS, ISO 14001)
- C3: Üretim Maliyeti (DOLAR/kg)
- C4: Yapısal Dayanıklılık (dayanım test puanı)
- C5: Üretim Süresi (dk/adet)

2.2. Monte Carlo Tabanlı AHP Kriterlerinin Ağırlıklandırması

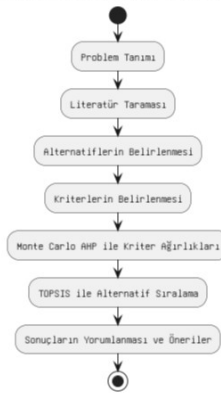
Bu çalışmada, karar verme sürecinin nesnellliğini artırmak ve uzman tabanlı öznellikleri ortadan kaldırmak amacıyla AHP yöntemine Monte Carlo simülasyonu entegre edilmiştir. Böylece geleneksel AHP yönteminin temelinde yer alan ikili karşılaştırmalar bu çalışmada doğrudan uzman görüşleri yerine parametrik dağılımlardan türetilmiştir. Her kriter çifti için, sektörel teknik dökümanlar ve literatürdeki ampirik veriler referans alınarak uniform veya üçgen dağılımlar tanımlanmış; örneğin karbon ayak izi ile üretim maliyeti kriterleri arasındaki karşılaştırma oranı aralığında uniform dağılımla modellenmiştir. Bu yaklaşım, karar matrisinin türetilmesinde herhangi bir bireysel uzman önyargısını dışlamış, bunun yerine çok sayıda simülasyon yoluyla istatistiksel güvenilirlik sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan Monte Carlo tabanlı AHP yaklaşımında, ağırlıkların belirsizliğini değerlendirmek amacıyla uniform dağılım esas alınarak her bir kriter çifti için 10.000 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Örnekleme yöntemi olarak basit random sampling değil, Latin Hypercube Sampling (LHS) uygulanmış ve bu sayede tüm olasılık aralığı daha dengeli biçimde kapsanmıştır. Tutarlılık İndeksi (CI), her iterasyonda Saaty'nin orijinal AHP tutarlılık oranı metoduna göre hesaplanmış ve tüm iterasyonlar için ortalama CI değeri $< 0,1$ olacak şekilde kabul edilmiştir.

AHP'de Tutarlılık İndeksi (Consistency Index, CI) ve Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio, CR), karar vericinin yaptığı ikili karşılaştırmaların tutarlılığını ölçmek için kullanılır. Ancak Monte Carlo Simülasyonu ile stokastik AHP uygulandığında, CI ve CR tek bir deterministik matristen değil, binlerce simüle edilmiş ikili karşılaştırma matrisinden elde edilir. Monte Carlo entegrasyonu kapsamında, her simülasyon iterasyonunda rastgele seçilen ikili karşılaştırmalarla oluşturulan AHP karar matrislerinin tutarlılık oranı ($CR < 0,1$) sağlanana kadar 10.000 tekrar yapılmıştır. Bu süreç sonunda elde edilen her bir kriterin ağırlığı, bir dağılım fonksiyonu olarak tanımlanmış ve bu dağılımlardan elde edilen ortalama ağırlıklar TOPSIS analizinde kullanılmıştır. Ayrıca,

ağırlıkların %95 güven aralıkları hesaplanmış ve sıralama tutarlılığı Spearman korelasyon katsayısı ile test edilmiştir ($\rho = 0,91$, $p < 0,01$). Böylece, AHP'nin deterministik yapısı yerine stokastik, esnek ve belirsizliği yöneten bir karar destek mekanizması geliştirilmiştir. Bu yöntem, özellikle çevresel ve üretim teknolojileri gibi karmaşık sistemlerde karar verme süreçlerinin güvenilirliğini artırmak amacıyla literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Şekil 1, 3B baskı tabanlı üretim için çalışmada takip edilen karar modeli akışını sunmaktadır.

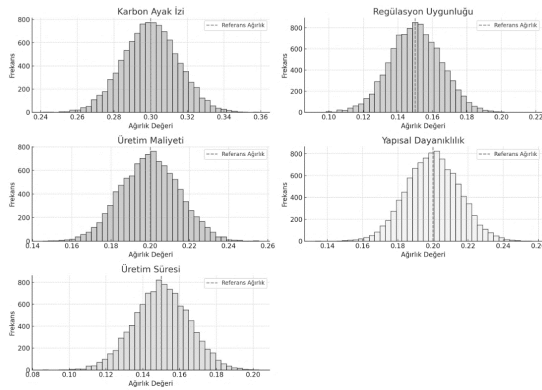
3B Baskı Tabanlı Üretim için Karar Modeli Metodolojisi



Şekil 1. 3B baskı tabanlı üretim için karar modeli akışı

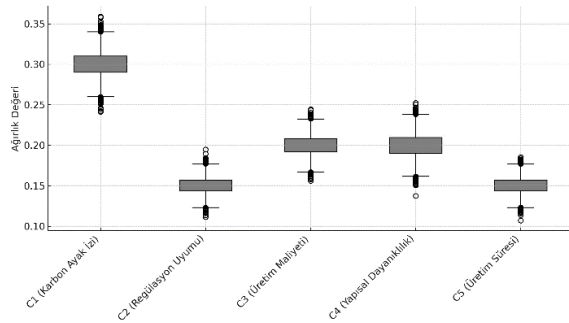
Saaty'nin 1–9 önem skalasına göre uzman görüşleriyle oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi kullanılarak [46], Monte Carlo tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (MC-AHP) ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu kapsamda, karbon ayak izi (C1) için 0,30, mevzuat uyumu (C2) için 0,15, üretim maliyeti (C3) için 0,20, yapısal dayanıklılık (C4) için 0,20 ve üretim süresi (C5) için 0,15 ağırlıkları elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen tutarlılık oranı ($CR = 0,064$), $< 0,1$ koşulunu sağladığı için karar matrisinin tutarlı olduğu kabul edilmiştir. Böylece, kriter ağırlıkları istatistiksel güvenilirlik sağlayacak şekilde belirlenmiş ve normalize edilmiş ağırlıklar, TOPSIS analizine aktarılmıştır. Şekil 2, Monte Carlo simülasyonu ile elde edilen kriter ağırlıklarının dağılımını göstermektedir. Her bir histogram, ilgili kriterin (örneğin karbon ayak izi, üretim maliyeti, regülasyon uyumu, yapısal dayanıklılık, üretim süresi) 10.000 iterasyonda elde edilen ağırlık değerlerinin frekans dağılımını sunmaktadır. Şekil 2'de

görüldüğü üzere, tüm kriterlerin ağırlıkları simetrik ve çan eğrisi şeklinde dağılım göstermekte olup, bu durum simülasyonun istatistiksel olarak dengeli ve güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır. Her dağılımın üzerine eklenen kesikli dikey çizgi, AHP süreciyle hesaplanan referans ağırlığına karşılık gelmekte; bu referans değerlerin dağılımların medyanına yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, klasik AHP ile elde edilen değerlerin Monte Carlo simülasyonu ile doğrulandığını ve karar ağırlıklarının belirsizlik altında bile kararlı kaldığını göstermektedir.



Şekil 2. Monte Carlo simülasyonu ile elde edilen ağırlıkların dağılımı

Şekil 3, Monte Carlo AHP yöntemiyle elde edilen beş karar kriterine ait ağırlıkların dağılımını kutu grafiği (boxplot) ile sunmakta olup, özellikle karbon ayak izi (C1) kriterinin en yüksek medyan değere ve daha düşük dağılım genişliğine sahip olduğunu, böylece karar sürecinde baskın ve tutarlı bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Monte Carlo simülasyonu ile AHP kriter ağırlıkları değerleri

Özetle Çizelge 1, MC-AHP sonucunda her bir kriter için elde edilen ağırlıkların temel

istatistiksel ölçütlerini sunmaktadır. karbon ayak izi (C1) kriteri hem en yüksek ortalama ve medyan değeriyle öncelikli kriter olduğunu göstermekte, hem de standart sapma ve çeyrekler arası aralık değerlerinin görece düşük olması sayesinde istatistiksel olarak kararlı bir yapıya sahiptir. Diğer kriterlerdeki daha düşük ortalama ağırlıklar, çevresel önceliğin karar sürecinde baskın olduğunu desteklemektedir. Bu dağılım özellikleri, belirsizliğin dikkate alındığı modellerde dahi kararların çevresel etkiler üzerinden şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 1. Kriter ağırlıklarına ilişkin temel istatistikler

Kriter	Ort. Ağırlık	Medyan	Std Sapma	Çeyrekler Arası
C1 (Karbon Ayak İzi)	0,35	0,35	0,04	0,07
C2 (Enerji Tüketimi)	0,20	0,20	0,03	0,06
C3 (Üretim Maliyeti)	0,15	0,15	0,02	0,04
C4 (Mevzuat Uyumu)	0,15	0,15	0,03	0,05
C5 (Üretim Süresi)	0,15	0,15	0,03	0,05

2.3. Alternatiflerin Tanımlanması

Çalışmada, EA şarj ekipmanı üretiminde değerlendirilen alternatif teknolojiler; çevresel etki, mevzuat uyumu ve teknik uygunluk temelinde seçilmiştir. 2020–2024 dönemine ait indirgenmiş 56 akademik yayın ile LCA ve EPD veri tabanları taranarak üretim yöntemlerine ilişkin karbon salımı, enerji tüketimi, üretim süresi ve geri dönüşüm oranı gibi veriler tematik olarak kodlanmıştır. Seçilen beş üretim yöntemi, bir EVSE muhafaza bileşeni üzerinden karşılaştırmalı analiz için standartlara uygun biçimde sayısallaştırılmış ve çalışma kapsamında önerilen MC-AHP, TOPSIS çok kriterli karar modelinde kullanılmak üzere karar matrisine dönüştürülmüştür.

Bu süreç, analizde kullanılan alternatif ve kriterlerin uygulama bağlamına dayalı, geçerli ve bütüncül bir yapıda tanımlanmasını sağlamıştır.

Çizelge 2'de sunulan karar matrisi, EA şarj ekipmanı üretiminde değerlendirilen beş alternatif teknolojinin; karbon ayak izi, mevzuat uyumu, üretim maliyeti, yapısal dayanıklılık ve

üretim süresi kriterleri açısından nicel performanslarını göstermektedir. TOPSIS yöntemi bu çalışmada, söz konusu kriterler doğrultusunda alternatiflerin çevresel ve teknik uygunluk düzeyine göre sıralanmasını sağlamak amacıyla uygulanmıştır. İlk aşamada, ölçüm birimlerinin heterojen yapısı nedeniyle karar matrisi vektör normu yöntemiyle normalize edilmiştir (Çizelge 3). Normalizasyon, klasik vektör tabanlı yöntemle yapılmış olup daha sonra AHP ile elde edilen ağırlıklar, normalize matrisin her bir sütunuyla çarpılarak ağırlıklı karar matrisi elde edilmiştir (Çizelge 4). İkinci aşamada, her bir kriter değeri MC-AHP ağırlıklarıyla çarpılarak ağırlıklı karar matrisi elde edilmiştir. Ardından, ideal ve negatif ideal çözüm noktaları tanımlanmış ve her alternatifin bu noktalara olan Öklidyen uzaklıkları hesaplanmıştır (Çizelge 5). Son aşamada, her alternatif için göreceli yakınlık katsayısı (C_i) hesaplanarak, alternatiflerin çok kriterli bir yapıda ideal çözüme olan yakınlıkları belirlenmiştir. Karar matrisi verileri; örneğin A5 için 0.85 kgCO₂, 0.92 regülasyon uyumu, 65 dolar maliyet, 65 yapı dayanımı, 11 dakika üretim süresi gibi min-max normalizasyon yöntemiyle ölçeklendirilmiş, ardından MC-AHP ile elde edilen kriter ağırlıklarıyla çarpılarak her alternatifin çok boyutlu performansı hesaplanmıştır. Bu süreç sonucunda üretim alternatifleri çevresel ve teknik uygunluk düzeylerine göre sıralanmıştır (Çizelge 6). TOPSIS yöntemi bu bağlamda, belirsizlik altında elde edilen istatistiksel ağırlıklarla entegre edilmiş, çevresel etki ve teknik uygulanabilirlik kriterlerini birlikte değerlendiren bütüncül bir sıralama çerçevesi sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, karar vericilerin karbon nötr hedeflerle uyumlu, mevzuat temelli ve üretim verimliliğini gözetken stratejik tercihler yapmasına olanak sağlamaktadır.

Çizelge 2. Karar matrisi

Alternatifler	C1 (kgCO ₂)	C2	C3 (dolar)	C4	C5 (dk)
A1	1,02	0,90	100	90	20
A2	2,00	0,85	120	95	25
A3	1,18	0,88	60	70	10
A4	2,10	0,86	70	75	12
A5	0,85	0,92	65	65	11

Çizelge 3. Normalize karar matrisi

Alternatifler	C1 (kgCO ₂)	C2	C3 (dolar)	C4	C5 (dk)
A1	0,29	0,45	0,51	0,50	0,53
A2	0,58	0,43	0,62	0,53	0,67
A3	0,34	0,44	0,31	0,39	0,26
A4	0,61	0,43	0,36	0,42	0,32
A5	0,24	0,46	0,33	0,36	0,29

Çizelge 4. Ağırlıklı karar matrisi

Alternatifler	C1 (kgCO ₂)	C2	C3 (dolar)	C4	C5 (dk)
A1	0,10	0,06	0,10	0,05	0,11
A2	0,20	0,06	0,12	0,05	0,13
A3	0,12	0,06	0,06	0,04	0,05
A4	0,21	0,06	0,07	0,04	0,06
A5	0,08	0,07	0,07	0,04	0,06

Çizelge 5. İdeal ve anti-ideal çözüm noktaları

C1 (kgCO ₂)	C2	C3 (dolar)	C4	C5 (dk)
0,2161	0,0699	0,1246	0,0532	0,1341
0,0875	0,0646	0,0623	0,0364	0,0536

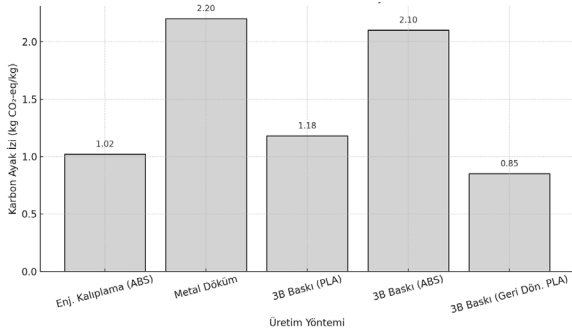
Çizelge 6. TOPSIS skorları ve sıralama

Alternatifler	TOPSIS Skoru	Sıralama
A5	0,799395	1
A3	0,745924	2
A1	0,477239	3
A4	0,396643	4
A2	0,388920	5

Çizelge 6, değerlendirmeye alınan beş üretim alternatifinin TOPSIS yöntemiyle elde edilen göreceli yakınlık skorlarını ve bu skorlar doğrultusunda yapılan sıralamayı göstermektedir. En yüksek skoru elde eden A5 alternatifi (geri dönüştürülmüş PLA/ABS ile 3B baskı), çok kriterli değerlendirme kapsamında en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. Bunu sırasıyla A3 (PLA ile 3B baskı), A1 (enjeksiyon kalıplama), A4 (ABS ile 3B baskı) ve A2 (metal döküm) takip etmektedir. Bu sonuçlar, düşük karbon ayak izi ve çevresel uyumluluğun öncelikli olduğu karar ortamlarında, 3B baskı temelli üretim alternatiflerinin sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada değerlendirilen beş üretim alternatifine ait karbon ayak izi değerleri, çevresel sürdürülebilirlik açısından belirgin farklılıklar sergilemiştir. Geri dönüştürülmüş PLA ile üretilen 3B baskı yöntemi, 0,85 kg CO₂-eq/kg ile en düşük emisyon değerine ulaşarak karbonsuzlaşma hedefleriyle en yüksek uyumu göstermiştir. Buna karşılık, metal döküm (2,20 kg CO₂-eq/kg) ve ABS ile 3B baskı (2,10 kg CO₂-eq/kg) yöntemleri, karbon emisyonu açısından en olumsuz performansı sergileyerek geleneksel ve petrol türevi tekniklerin çevresel dezavantajlarını ortaya koymuştur. Orta düzey emisyon sunan PLA ile 3B baskı (1,18 kg CO₂-eq/kg) ve enjeksiyon kalıplama (1,02 kg CO₂-eq/kg) ise görece daha az çevresel etki göstermektedir (Şekil 4). Bu dağılım, üretim yöntemlerinin karbon nötrlüğü politikalarıyla teknik uyum düzeyini net biçimde yansıtmaktadır.



Şekil 4. Üretim yöntemine göre karbon ayak izi değişimi

TOPSIS analizinde en yüksek skoru alan alternatifin geri dönüştürülmüş PLA ile 3B baskı ($C = 0,799$) olması, düşük karbonlu ve döngüsel üretim çözümlerinin çevresel ve teknik açıdan bütünleşik avantaj sunduğunu doğrulamaktadır. Diğer 3B baskı seçenekleri (örneğin PLA filament, $C^* = 0,746$), hem maliyet hem de üretim esnekliği açısından rekabetçi seviyelerde konumlanmıştır. Mevzuat uyumu açısından, enjeksiyon kalıplama yöntemi halen RoHS ve ISO 14001 gibi çevresel standartlara en yüksek düzeyde uyum gösteren yöntem olarak öne çıkarken, geri dönüştürülmüş filamentlerin bu alandaki eksiklikleri nedeniyle genel skoru görece sınırlanmıştır. Ancak bu eksikliklerin giderilmesi, çevresel regülasyonlarla tam uyumlu karbon nötr üretim için stratejik bir fırsat sunmaktadır.

Normalize karar matrisi üzerinden yapılan kriter bazlı hassasiyet analizi, özellikle C1 (Karbon Ayak İzi) ve C3 (Üretim Maliyeti) kriterlerinin karar modeline etkisinin yüksek olduğunu göstermiştir. C2 (Mevzuat Uyumu) kriterinde ise geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemi en yüksek uygunluk skorunu alırken, geri dönüştürülmüş filament tabanlı 3B baskı sistemlerinin RoHS ve ISO 14001 gibi çevresel regülasyonlarla kısmen uyumsuz olduğu görülmüştür. Bu durum, alternatifin çevresel avantajına rağmen genel TOPSIS skorunu düşürmüştür. Ancak bu regülasyonel eksikliklerin giderilmesi durumunda, 3B baskı tabanlı döngüsel üretim yapıları, çevresel ve teknik açılardan ideal çözüme en yakın seçenekler olarak öne çıkmaktadır. MC-AHP ve TOPSIS'in entegre kullanımı, teknik ve çevresel değişkenleri istatistiksel güvenilirlikle modelleyerek, karar vericilere sürdürülebilir enerji altyapılarında uygulanabilir, karşılaştırılabilir ve politika uyumlu bir karar destek çerçevesi sunmaktadır.

4. TARTIŞMA VE SINIRLILIKLAR

Bu çalışmada değerlendirilen PLA ve ABS gibi yaygın polimer malzemeler, EA besleme sistemlerinde kullanılan bileşenlerin çevresel etkilerinin analizinde temel alınmıştır. Bununla birlikte, son yıllarda literatürde öne çıkan karbon fiber takviyeli polimerler (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) ve geri dönüştürülmüş hibrit kompozitler, özellikle 3B baskı teknolojileriyle entegre kullanıldığında hem mekanik dayanım hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. CFRP gibi malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde taşıyıcı parçalarda daha ince ve hafif yapıların tasarlanmasına olanak tanırken, geri dönüştürülmüş içeriklerin kullanımıyla da döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlayabilmektedir. Ancak bu malzemelere ilişkin LCA verilerinin ve üretim sürecine ait sayısal girdilerin sınırlı oluşu, karar modeline bütüncül entegrasyonlarını kısıtlamaktadır. Bu malzemelere ilişkin yeterli LCA verisi ve üretim parametresi bulunmadığından, mevcut çok kriterli karar modeline entegrasyonu yapılamamıştır. İlerleyen çalışmalarda bu tür ileri kompozitlerin değerlendirilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada üretim maliyeti kriteri çok kriterli karar modeline dâhil edilmiş olsa da 3B baskı teknolojilerinin seri üretim ölçeğinde maliyet etkinliğine ilişkin kapsamlı yaşam döngüsü verileri ve teknik/ekonomik analizler literatürde sınırlı düzeydedir. Bu nedenle, maliyet parametresi daha çok özelleştirilmiş düşük hacimli üretim bağlamında değerlendirilmiştir [58].

Literatürde, 3B baskı teknolojilerinin EA uygulamalarında baskı hızı, kalite kontrol süreçlerinin standardizasyonu ve uzun vadeli çevresel dayanıklılık gibi operasyonel zorluklar taşıdığı vurgulanmaktadır [59]. Ancak Türkiye bağlamında, bu teknolojilerin hâlen prototipleme ve düşük hacimli üretim düzeyinde uygulanması ve şarj altyapısı bileşenlerinde endüstriyel seri üretim düzeyine geçilmemiş olması nedeniyle, bu çalışmada söz konusu mühendislik sınırlılıklar öncelikli değerlendirme kapsamına alınmamıştır.

Ayrıca, literatürde 3B baskı teknolojilerinin elektrikli araç uygulamalarında yaygınlaşmasının önünde bazı yapısal zorluklar bulunduğu da belirtilmektedir. Özellikle üretim hızının düşük olması, kalite kontrol süreçlerinin otomatikleştirilememesi ve üretim çıktılarının uzun vadeli dayanıklılık açısından sınırlı saha verisine dayanması gibi etkenler, bu teknolojinin seri üretim ölçeğinde uygulanabilirliğini azaltmaktadır. Bununla birlikte, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda hurda plastik parçaların geri kazanımı ve 3B baskı yoluyla yeniden değerlendirilmesi, sürdürülebilir üretim stratejileri açısından gelecek vadede bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, batarya ve güç elektroniği sistemlerinin yeniden kullanımı ve parça bazlı üretimle entegre edilmesi gibi alternatif döngüsel çözümler de elektrikli araç teknolojilerinin sürdürülebilirliği açısından tamamlayıcı potansiyel sunmaktadır [59-60].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma, elektrikli araç besleme sistemlerine yönelik üretim teknolojilerinde yalnızca çevresel etkilerin değil, aynı zamanda teknik uygunluk, ekonomik sürdürülebilirlik ve mevzuat uyumunun birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Karar destek sürecine

entegre edilen LCA tabanlı karbon ayak izi verileri, üretim alternatifleri arasında önemli farklılıkları ortaya koymuş; özellikle geri dönüştürülmüş PLA ile 3B baskı yöntemi, en düşük karbon salımı (0,85 kg CO₂-eq/kg) ile sürdürülebilir üretim adına en yüksek uyumu göstermiştir. Buna karşın, metal döküm (2,20 kg CO₂-eq/kg) ve ABS ile 3B baskı (2,10 kg CO₂-eq/kg) gibi yüksek emisyonlu yöntemler, geleneksel tekniklerin çevresel dezavantajlarını açıkça ortaya koymuştur. Enjeksiyon kalıplama ve PLA bazlı 3B baskı ise orta düzeyde emisyon sunarak çevresel sürdürülebilirlik açısından alternatif çözümler olarak konumlanmıştır.

TOPSIS analizinde, en yüksek skoru alan alternatifin geri dönüştürülmüş PLA ile 3B baskı (C = 0,799) olması, düşük karbonlu ve döngüsel üretim çözümlerinin teknik ve çevresel açılardan bütünsel avantaj sunduğunu doğrulamaktadır. Mevzuat uyumu bakımından enjeksiyon kalıplama yöntemi, RoHS ve ISO 14001 gibi çevresel standartlara en yüksek uygunluk gösteren alternatif olarak öne çıkmış; buna karşın, geri dönüştürülmüş filamentlerin henüz tam mevzuat uyumu sağlayamaması, bu seçeneğin genel skorunu sınırlamıştır. Bununla birlikte, çevresel regülasyonlarla uyum eksikliklerinin giderilmesi durumunda, 3B baskı tabanlı döngüsel üretim çözümleri, teknik ve çevresel kriterleri en yüksek düzeyde karşılayan stratejik seçenekler haline gelecektir.

Normalize karar matrisi üzerinden yapılan kriter bazlı hassasiyet analizleri, özellikle karbon ayak izi (C1) ve üretim maliyeti (C3) kriterlerinin karar modeli üzerindeki etkisinin yüksek olduğunu göstermiştir. MC-AHP ile belirsizlikleri minimize edilen kriter ağırlıkları ve TOPSIS ile belirlenen alternatif sıralamaları, enerji altyapısında dijital üretim teknolojilerinin seçiminde karar vericilere sistematik, istatistiksel temelli ve uygulamaya geçirilebilir yönlendirmeler sunmaktadır.

Politika önerileri, çalışmada ulaşılan bulgularla bütüncül biçimde uyumludur. Özellikle düşük karbon salımı sağlayan üretim alternatifleri arasında yer alan geri dönüştürülmüş PLA ve ABS filament kullanan yerli üreticilerin, stratejik üretim destek programlarına öncelikli olarak dahil

edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, EPD tabanlı karbon etiketleme uygulamalarının EVSE tedarik zincirinde zorunlu hale getirilmesi, çevresel şeffaflığı artırarak Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefleri ile yapısal uyumu güçlendirecektir. Düşük karbon ayak izine sahip üretim tekniklerinin sanayi destek mekanizmalarında öncelikli kriter olarak değerlendirilmesi ve 3B baskı tabanlı üretim altyapılarının yeşil kamu alımları ve stratejik yatırım teşvikleri kapsamında kurumsal düzeyde yaygınlaştırılması önem arz etmektedir. Bu doğrultuda önerilen çok kriterli karar destek yapısı, Avrupa Yeşil Mutabakatı, Türkiye'nin İklim Kanunu ve 2053 net sıfır emisyon hedefleriyle doğrudan uyumlu bir çerçevede kurgulanmıştır. Model; çevresel sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi ilkeleri, karbon ayak izinin azaltımı, üretim süreçlerinin mevzuatlara uygunluğu ve enerji verimliliği gibi çok boyutlu politika hedeflerini birlikte ele alabilen entegre bir karar mekanizması sunmaktadır. Bu çok kriterli yaklaşım, üretim teknolojileri bağlamında sadece çevresel etkileri değil, aynı zamanda ekonomik uygulanabilirlik, yapısal dayanıklılık ve düzenleyici uygunluk gibi parametreleri sayısallaştırarak politika yapıcılar için nesnel bir önceliklendirme ve senaryo analizi aracı işlevi görmektedir. Dolayısıyla önerilen model, hem sanayi aktörleri açısından sürdürülebilir üretim dönüşümüne yönelik teknik yol haritası oluşturmakta hem de kamu otoritelerine yönelik stratejik planlama ve mevzuat uyumluluğu için veri temelli bir karar altyapısı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Curran, S., Chambon, P., Lind, R., Love, L., Wagner, R., Whitted, S., Keller, M. "Big area additive manufacturing and hardware-in-the-loop for rapid vehicle powertrain prototyping: A case study on the development of a 3-D-printed Shelby Cobra", SAE Technical Paper, 2016-01-0328, 2016.
2. Kang, H. C., Kang, K. B., Ahn, H. K., Lee, S. H., Ahn, T. H., Jwa, J. W. "The smart EV charging system based on the big data analysis of the power consumption patterns", International Journal of Internet, Broadcasting and Communication, Cilt 9, Sayı 2, Sayfa 1-10, 2017.

3. Hachey, S. Q. "Prospects for sustainable micro-factory retailing in Canada: A case study of 3D printed electric vehicles" (Master's thesis, McMaster University). McMaster University Institutional Repository.2017.

4. Moon, I., Lee, G. M., Park, J., Kiritsis, D., von Cieminski, G. (Eds.). "Advances in production management systems. Production management for data-driven, intelligent, collaborative, and sustainable manufacturing: IFIP WG 5.7 International Conference, Proceedings, Part I", Cilt 535, Springer, 2018.

5. Tseng, T., Li, D. "Use of ANP and TOPSIS for the 3D printing on customized electrical vehicles", 2020 The 6th International Conference on E-Business and Applications, Sayfa 128-132, 2020.

6. Pallander, R. "Implementation of HomePlug Green Phy standard (ISO15118) into Electric Vehicle Supply Equipment", 2021.

7. Serohi, A. "Impact of 3-D printing technology in manufacturing supply lines to improve resilience during black swan events", International Journal of Supplementary Chain Management, Cilt 10, Sayfa 88, 2021.

8. Elavarasan, R. M., Pugazhendhi, R., Irfan, M., Mihet-Popa, L., Khan, I. A., Campana, P. E. "State-of-the-art sustainable approaches for deeper decarbonization in Europe- An endowment to climate neutral vision", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt 159, Sayfa 112204, 2021.

9. Zhang, T., Ran, F. "Design strategies of 3D carbon-based electrodes for charge/ion transport in lithium ion battery and sodium ion battery", Advanced Functional Materials, Cilt 31, Sayı 17, Sayfa 2010041, 2021.

10. Tarancón, A., Esposito, V., Torrell, M., Di Vece, M., Son, J. S., Norby, P., Pedersen, D. B. "2022 roadmap on 3D printing for energy", Journal of Physics: Energy, Cilt 4, Sayı 1, Sayfa 011501, 2022.

11. Jovanović, M., Mateo Sanguino, T. D. J., Damjanović, M., Đukanović, M., Thomopoulos, N. "Driving sustainability: Carbon footprint, 3D printing, and legislation concerning electric and autonomous vehicles", Sensors, Cilt 23, Sayı 22, Sayfa 9104, 2023.

12. Rosado, J., Cardoso, F., Silva, M. "A low cost and highly parameterizable energy meter", 2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Sayfa 1-6, 2023.

13. Rabih, M., Takruri, M., Al-Hattab, M., Alnuaimi, A. A., Bin Thaleth, M. R. "Wireless charging for electric vehicles: A survey and comprehensive guide", *World Electric Vehicle Journal*, Cilt 15, Sayı 3, Sayfa 118, 2024.
14. Hussein, H. M., Ibrahim, A. M., Taha, R. A., Rafin, S. S. H., Abdelrahman, M. S., Kharchouf, I., Mohammed, O. A. "State-of-the-art electric vehicle modeling: Architectures, control, and regulations", *Electronics*, Cilt 13, Sayı 17, Sayfa 3578, 2024.
15. Kumar, P., Channi, H. K., Kumar, R., Stević, Ž., Singh, S., Bhattacharjee, A., Bhowmik, A. "Optimizing electric mobility: A multi-criteria decision-making approach for sustainable future of electric vehicles through smart motor choices", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Cilt 57, Sayı 6, Sayfa 1825, 2024.
16. Kumar, B. V., Farhan, A. "Optimal simultaneous allocation of electric vehicle charging stations and capacitors in radial distribution network considering reliability", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Cilt 12, Sayı 5, Sayfa 1584-1595, 2024.
17. Prasittisopin, L. "How 3D printing technology makes cities smarter: A review, thematic analysis, and perspectives", *Smart Cities*, Cilt 7, Sayı 6, Sayfa 3458-3488, 2024.
18. Sama, A. "Introducing graphene-enhanced technologies to the regulated market to mitigate carbon emissions", *Environmental Progress Sustainable Energy*, Cilt 43, Sayı 1, Sayfa e14338, 2024.
19. Singh, B. J., Sehgal, R. "Applications of 3D printing, rapid prototyping, and digital manufacturing for low carbon development", *Sustainability in smart manufacturing*, Sayfa 37-60, CRC Press, 2024.
20. Shuker, S. "The role of emerging advanced technologies in facilitating the remanufacture and upgrade of end-of-use electro-mechanical and mechanical equipment, tooling and assets" [Doktora Tezi], University of Wales Trinity Saint David, 2024.
21. Marinkovic, D. "Sustainable composite materials for electric vehicle applications: A comprehensive review", *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2025.
22. Owen, A., Hayes, D. "Technological innovations in EV manufacturing", 2025.
23. Jaller, M., Pineda, L., Gueldas, Y., Alemi, F., Otay, I. "Fostering the use of zero and near zero emission vehicles in freight operations", 2020.
24. Avrupa Parlamentosu. "Elektrikli ve elektronik ekipmanlarda belirli tehlikeli maddelerin kullanımının kısıtlanmasına ilişkin 2011/65/AB Direktifi (RoHS 2)", *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 174, Sayfa 88-110, 2011.
25. Avrupa Kimyasallar Ajansı. "Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması hakkında (EC) No 1907/2006 Tüzük (REACH)", *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 396, Sayfa 1-849, 2010.
26. Avrupa Parlamentosu. "Atık elektrikli ve elektronik ekipmanlara ilişkin 2012/19/AB Direktifi (WEEE)", *Avrupa Birliği Resmi Gazetesi*, L 197, Sayfa 38-71, 2010.
27. Uluslararası Standardizasyon Örgütü. "ISO 14001:2015 Çevre yönetim sistemleri, Kullanım kılavuzlu şartlar", 2015.
28. Uluslararası Standardizasyon Örgütü. "ISO 14040:2006 Çevre yönetimi Yaşam döngüsü değerlendirmesi, Prensipler ve çerçeve", 2006.
29. Uluslararası Standardizasyon Örgütü. "ISO 14044:2006 Çevre yönetimi Yaşam döngüsü değerlendirmesi, Şartlar ve kılavuzlar", 2006.
30. Uluslararası Standardizasyon Örgütü ve ASTM International. "ISO/ASTM 52900:2021 Eklemeli imalat, Genel prensipler, Temeller ve terminoloji", 2021.
31. Uluslararası Standardizasyon Örgütü ve ASTM International. "ISO/ASTM 52910:2019 Eklemeli imalat, Tasarım, Şartlar, kılavuzlar ve öneriler", 2019.
32. Uluslararası Standardizasyon Örgütü ve ASTM International. "ISO/ASTM 52915:2020 Eklemeli imalat dosya formatı (AMF) şartnamesi", 2020.
33. Uluslararası Standardizasyon Örgütü ve ASTM International. "ISO/ASTM 52901:2017 Eklemeli imalat, Genel prensipler, Satın alınan AM parçaları için şartlar", 2017.
34. Türk Standardları Enstitüsü. "TS EN 62196-1:2022 Elektrikli araçlar için fişler, prizler ve araç konnektörleri-Bölüm 1: Genel kurallar", 2022.

35. Türk Standardları Enstitüsü. "TS EN IEC 61851-1: Elektrikli araçlar için iletken (kablolu) şarj sistemi", 2023.
36. Türk Standardları Enstitüsü. "TS 13912: Elektrikli araç şarj istasyonları için güvenlik kuralları – Muayene, deney ve yeterliliğin değerlendirilmesi", 2022.
37. Türk Standardları Enstitüsü. "TS EN IEC 61439-7: Alçak gerilim anahtarlama düzeni ve kontrol düzeni panoları - Bölüm 7: Marinalar, kamp alanları, pazar yerleri ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi özel uygulamalar için panolar", 2023.
38. Avrupa Komisyonu. "Avrupa Yeşil Mutabakatı", Sayfa 1-24, 2019.
39. "Sayısal Hizmetler için Tek Pazar ve 2000/31/EC Direktifinin Değiştirilmesi Hakkında (AB) 2022/2065 Tüzük (Sayısal Hizmetler Yasası)", AB Resmi Gazetesi L277/1, 19 Ekim 2022.
40. "Doğal kişilerin kişisel verilerinin işlenmesi ve bu verilerin serbest dolaşımı hakkında ve 95/46/EC Direktifinin yürürlükten kaldırılmasına ilişkin (AB) 2016/679 Tüzük (Genel Veri Koruma Tüzüğü)", AB Resmi Gazetesi L119/1, 27 Nisan 2016.
41. Kanyılmaz, A., Demir, A. G., Chierici, M., Berto, F., Gardner, L., Kandukuri, S. Y., Razavi, N. "Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector", Additive Manufacturing, Cilt 50, Sayfa 102541, 2022.
42. Barzaghi, L. "Sensors' Architecture Definition for Energy Consumption Reduction in Urban Battery Electric Vehicles" [Doktora Tezi], Politecnico di Torino, 2023.
43. Ataei, M., Shahsavany, H., Mikaeil, R. "Monte Carlo Analytic Hierarchy Process (MAHP) approach to selection of optimum mining method", International Journal of Mining Science and Technology, Cilt 23, Sayı 4, Sayfa 573-578, 2013.
44. Jing, L., Chen, B., Zhang, B., Li, P., Zheng, J. "Monte Carlo simulation-aided analytic hierarchy process approach: case study of assessing preferred non-point-source pollution control best management practices", Journal of environmental engineering, Cilt 139, Sayı 5, Sayfa 618-626, 2013.
45. Díaz, H., Teixeira, A. P., Soares, C. G. "Application of Monte Carlo and Fuzzy Analytic Hierarchy Processes for ranking floating wind farm locations", Ocean Engineering, Cilt 245, Sayfa 110453, 2022.
46. Saaty, T. L. "The analytic hierarchy process (AHP)", The Journal of the Operational Research Society, Cilt 41, Sayı 11, Sayfa 1073-1076, 1980.
47. Hwang, C. L., Yoon, K. "Multiple attribute decision making: Methods and applications", Springer, 1981.
48. Jovanović, M., Mateo Sanguino, T. D. J., Damjanović, M., Đukanović, M., Thomopoulos, N. "Driving sustainability: carbon footprint, 3D printing, and legislation concerning electric and autonomous vehicles", Sensors, Cilt 23, Sayı 22, Sayfa 9104, 2023.
49. Prasittisopin, L. "A Review and Thematic Analysis of How 3D Printing Technology Makes a City Smarter", 2024.
50. Herrmann, I. T., Moltesen, A. "Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - a comparative assessment of SimaPro and GaBi", Journal of Cleaner Production, Cilt 86, Sayfa 163-169, 2015.
51. Olanrewaju, O. "Data Quality Assurance in Construction Environmental Product Declarations for Whole Building Life Cycle Assessment" [Doktora Tezi], Open Access Te Herenga Waka-Victoria University of Wellington, 2025.
52. Ansah, N. B., Adinyira, E., Agyekum, K., Aidoo, I. "Systematic Review of Environmental Product Declarations (EPDs) Towards Construction Emission Mitigation in the African Region", International Conference on Infrastructure Development in Africa, Sayfa 41-54, 2023.
53. Benke, K. K., Steel, J. L., Weiss, J. E. "Risk assessment models for invasive species: uncertainty in rankings from multi-criteria analysis", Biological Invasions, Cilt 13, Sayfa 239-253, 2011.
54. Akaa, O. U. "Balancing stakeholder goals in structural fire design of steel-framed buildings" [Doktora Tezi], University of Canterbury, 2017.
55. Jalao, E. R., Wu, T., Shunk, D. "A stochastic AHP decision making methodology for imprecise preferences", Information Sciences, Cilt 270, Sayfa 192-203, 2017.

56. Banzon, M. J. R., Bacudio, L. R., Promentilla, M. A. B. "Application of Monte Carlo analytic hierarchical process (MCAHP) in the prioritization of theme park service quality elements", 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Sayfa 1241-1252, 2016.
57. Tinoco, M. P., de Mendonça, É. M., Fernandez, L. I. C., Caldas, L. R., Reales, O. A. M., Toledo Filho, R. D. "Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of cementitious materials for 3D concrete printing: A systematic literature review", Journal of building engineering, Cilt 52, Sayfa 104456, 2022.
58. Choudhuri, B., Uddin, M. F., Sen, R. "Review on 3D printing technology in automotive industry and electric vehicle". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 09544070251337273, 2025.
59. Ruiz, L.E.; Pinho, A.C.; Resende, D.N. "3D Printing as a Disruptive Technology for the Circular Economy of Plastic Components of End-of-Life Vehicles: A Systematic Review". Sustainability 14, 13256., 2022.
60. Fereydoonian, M., Lee, K., Kiriella, C., Moon, J., Lee, W. "Closing the Loop on Circular Economy in Transportation Electrification: Reuse, Repurposing, and Recycling of Batteries, Power Electronics, and Electric Machines". IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2025