

## HAVACILIKTA SÜRDÜRÜLEBİLİR GELİŞME GÖSTERGELERİ

Emre ALPMAN<sup>1</sup>, A. Yalçın GÖĞÜŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emre ALPMAN, Makine Mühendisliği Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, [emre.alpman@marmara.edu.tr](mailto:emre.alpman@marmara.edu.tr)

<sup>2</sup> A. Yalçın GÖĞÜŞ, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara, [yogus@metu.edu.tr](mailto:yogus@metu.edu.tr)

DOI: [10.23890/SUHAD.2017.0101](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2017.0101)

### ÖZET

Genel sürdürülebilir gelişme indeksi, kendisini belirleyen üç indeksten özellikle toplumsal sürdürülebilir gelişme indeksi dolayısıyla, politik kararlar için önem taşımaktadır. Eksergoekonomik ve çevresel sürdürülebilir gelişme indeksleri ise teknolojik gelişme için ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, birleşik eksergoekonomik - çevresel indeksi oluşturan göstergelerden havacılık sektörünü ilgilendirenler irdelenmiştir. Göstergeleri normalleştirme ve aritmetik, geometrik birleştirme yöntemlerine ilişkin geliştirme önerileri sunulmuştur. Çok sayıdaki benzer eksergoekonomik göstergelerden, havacılık alt sektörlerinin ihtiyacı doğrultusunda temel olanlar üzerinde durulması teknolojik iletişim için kolaylık sağlayacaktır. Sürdürülebilirlik analizinin uygulanması yararlı olacak başlıca alt sektörler: Uçak gövdesi ve uçuş; uçak itki sistemleri, uçak yardımcı enerji sistemleri, hava meydanları, hava trafiği kontrolü ve uçak yer hizmetleri, uçak dışı hava araçları, askeri havacılık, havacılıkta geri dönüşümdür. Beyaz eşya ve binalar için uygulanmakta olan enerji sertifikasyonuna benzer olarak eksergoekonomik - çevresel gelişme indeksi ve sertifikasyonu, sanayi tesislerine ve havacılık alt sektörlerine, geniş bir zaman çerçevesi içinde, uygulanmalıdır. Çalışmada uçuş sırasında çevre şartlarının değişiminin etkisi ve Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi yöntemi hakkında bilgilere de yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilirlik indeksi, Sürdürülebilir gelişme indeksi, eksergoekonomik - çevresel indeks, eksergoekonomik sürdürülebilirlik indeksi, çevresel sürdürülebilirlik indeksi, sürdürülebilirlik göstergeleri, sürdürülebilir havacılık göstergeleri.

### INDICATORS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN AVIATION

#### ABSTRACT

General sustainable development index is very important for making a political decision especially thanks to the social sustainable development index, which is one of the three indices that define it. Exergoeconomic and environmental sustainable development indices, however, become important for technological development. Among the indicators that form the aggregated exergoeconomic-environmental sustainability index and related to the aviation sector are analyzed in this study. Remarks have been made on normalization of the indicators, and arithmetic and geometric aggregation methods. Among the many similar exergoeconomic indicators, emphasizing the basic ones for aviation subsectors will be beneficial for technical communication. The primary sub-sectors which will benefit from sustainability analysis are: airplane fuselage and flight, airplane propulsion systems, airplane auxiliary energy systems, airports, air traffic control and ground services, air transportation other than aircraft, military aviation and recycling in aviation. Similar to the energy certifications applied for home appliances and buildings, an exergoeconomic environmental sustainability index and its certification should also be applied for industrial facilities and aviation subsectors in the long run. Study also contains remarks on the effect of the variation of environmental conditions during flight, and Extended Exergy Accounting method.

**Keywords:** Sustainability index, sustainable development index, exergoeconomic-environmental index, exergoeconomic sustainability index, environmental sustainability index, sustainability indicators, sustainable aviation indicators.

## 1. GİRİŞ

Sürdürülebilirlik kavramı İkinci Dünya Savaşı sonrasında dünya kaynaklarının uzun dönemde tükenmesi endişesinden kaynaklanan Roma Kulübü bildirgesiyle ön plana çıkmıştır. 1973 petrol krizi enerji kaynaklarının, 1996 Roma Bildirisi ise gıda kaynaklarının önemine dikkatleri çekti. Çevre konusundaki uluslararası işbirliğinin başlangıcı olarak BM (Birleşmiş Milletler) Çevre ve Kalkınma Konferansı (1972 Stockholm) ve UNEP'in (United Nations Environmental Program) kuruluşu sayılabilir. Yenilenemez enerji kaynaklarının ve diğer doğal kaynakların tükenmesi ve çevre kirliliği ülke sınırlarını aşan sorunlar olarak uluslararası işbirliğini gerektirmektedir ve insanlığın tüm eylemleri için sınırlayıcı olarak göz önünde tutulmalıdır.

Dünya Çevre ve Gelişme Konseyine göre “Bir gelişmenin sürdürülebilir olması, şimdiki kuşağın gelişme ihtiyaçlarını karşılarken, gelecek kuşakların kendi gelişme ihtiyaçlarını karşılama tehlikeye sokmamasıdır” (Frangopoulos, 2006).

Genel anlamda söz konusu olan, toplumsal gelişmenin sürdürülebilirliğidir. BM 2000 yılındaki Zirve Toplantısında 8 madde olarak “21. Yüzyıl Hedefleri” ile bir uluslararası gelişme doğrultusu önerdi; 2015 yılına kadarki deneyime dayanarak o yıl yapılan Zirve toplantısında ise 17 maddelik “Sürdürülebilir Gelişme Amaçları”nın bu öneriler yerine geçmesi kararlaştırıldı.

Amaçların Toplumsal (sosyal) Sürdürülebilir Gelişmeyle ilgili olanları: Yoksulluğun giderilmesi, Sağlık iyileştirilmesi, Eğitimin iyileştirilmesi, Kadın eşitliği, Gelir dağılımının iyileştirilmesi, Kurumsallaşma, Sürdürülebilirlikte işbirliği.

Amaçların çevresel ve ekonomik sürdürülebilir gelişmeyle ilgili olanları: Gıda güvenliği, Su güvenliği, Enerji güvenliği, Altyapıların iyileştirilmesi, Ekonomi, Tüketim – Üretim dengesinin sağlanması, Barınma gereksiniminin giderilmesi, İklimin korunması, Deniz eko sistemi, Eko sistem.

Bu amaçların gerçekleşmesi için 169 hedef ve gerçekleştirme ölçütü olarak 304 göstergeler belirlendi fakat henüz uygulamaya konulamadı. BM bazı ülkelerle özel anlaşmalara vararak bu konuda ilerlemeye çalışmaktadır.

Sürdürülebilir gelişme kavramı kurumların, sektörlerin, hatta kişilerin bile, eylemleri için uygulanabilir. Sürdürülebilir gelişmenin toplumsal düzeydeki birinci temelini yukarıdaki birinci grup, çevresel ve ekonomik düzeydeki ikinci ve üçüncü temellerini ise yukarıdaki ikinci grup amaçlar oluşturmaktadır. Sık kullanılan “uzaydaki dünya gemisindeyiz” sözüyle (Sciubba ve Frankl, 2006) toplumsal sürdürülebilirliğin yanı sıra dünya kaynaklarının sınırlılığı ve temiz tutulması, dolayısıyla fiziki-kimyasal-biyolojik, kısaca Çevresel Sürdürülebilir Gelişmenin önemi de anlatılmaktadır ve bu sürdürülebilir gelişmenin ikinci temelidir.

Sürdürülebilir gelişmenin üçüncü temelini, toplumsal etkileşimlerle fiziki-biyolojik çevrenin arakesiti olarak ekonomik sürdürülebilirlik oluşturur (Liu, 2014). Ekonomi bir bakıma toplumsal bir gelişme mekanizmasıdır, toplumsal eylemleri yönlendirir. Öte yandan ekonomi fiziki-biyolojik çevrenin değişmesine sebep olan teknolojik eylemleri de belirler. Ancak gelişme söz konusu olduğuna göre, bilime dayalı teknolojik gelişme olmaksızın ekonomi yalnız başına sürdürülebilirlik için yeterli olamaz; sürdürülebilirliğin üçüncü temelini teknolojik-ekonomik sürdürülebilirlik olarak kabul edilmelidir. Teknolojinin itici gücü, eylemleri oluşturan enerji, daha doğru adıyla ekserjidir (= ısı ve iç enerjinin işe dönüştürülebilir bölümü). Bu nedenle toplumsal gelişme uzmanlarının yaygın olarak “ekonomik sürdürülebilir gelişme” adlandırdıkları üçüncü temelini Eksergoekonomik Sürdürülebilir Gelişme olarak adlandırmalıdır (Sciubba, 2013). Her ne kadar birçok araştırmacı sürdürülebilir gelişmenin bu üç temele dayandığı görüşünde iseler de bu kesinleşmiş bir kural değildir; bazı araştırmacılar inceledikleri sektörün etkisiyle dört, hatta dokuz kriteri temel saymışlardır (Kılıkış ve Kılıkış, 2016b; Grimley, 2006).

Genel sürdürülebilir gelişmeyi belirleyen büyüklüğü sürdürülebilir gelişme indeksi, bunun temelini oluşturan kriterlerin büyüklüklerini ise toplumsal, çevresel ve eksergoekonomik sürdürülebilirlik indeksleri olarak adlandırmak uygun olacaktır. Temel sürdürülebilirlik indekslerini birleştirme yaklaşımına zayıf sürdürülebilirlik yaklaşımı denmektedir (Sciubba ve Frankl, 2006). Ancak üç indeksin her birinin, ayrı ayrı büyük öneme sahip olduğu gerçeği göz önünde tutulduğunda bunları birleştirerek birinin fazlalığı ile diğerinin eksikliğini telafi etmenin doğru olmayacağı, her bir kriteri kendi başına önemsemek düşüncesini ağır basar ki buna kuvvetli sürdürülebilirlik yaklaşımı denmektedir (Sciubba ve Frankl, 2006).

Bir faaliyetin toplumsal, çevresel ve eksergoekonomik sürdürülebilirlik indeksleri, bir takım parametrelere bağlıdır. Bu parametrelere “göstergeler” adı verilir. Göstergeler uygun yöntemlerle birleştirilerek indeksler bulunur. Ölçülebilirlik bakımından biri birine yakın olan çevresel ve eksergoekonomik sürdürülebilirlikleri belirleyen göstergelerin Eksergoekonomik - Çevresel İndeks (EÇİ) adıyla birleştirilmesi, bir orta yol yaklaşımıdır ve güvenliği göstergelerin doğru belirlenmesi yanı sıra birleştirilme yöntemine de bağlıdır. Eksergoekonomik - çevresel sürdürülebilir gelişme indeksini oluşturan, parasal, ekserjik ya da normleştirilmiş göstergelere EÇİ göstergeler adı verilebilir. Bu göstergelerin kabul edilebilir sınırları kuvvetli sürdürülebilirlik yaklaşımıyla belirlenmeli hatta önemlileri yasalarla zorunlu kılınmalıdır (Kjelstrup vd., 2015). Beyaz eşyaların enerji verimi ve binaların yalıtımı konularında uygulanan sertifika zorunluluğu önerilen yasal gelişme için iyi örneklerdir.

Alman Enerji sektörünün sürdürülebilir gelişmesinin ölçülmesi konusundaki makalede Schlör vd. (2011) göstergesi, karakteristik bir büyüklüğün olması istenilen değeri ile güncel değeri arasındaki fark olarak tanımlamakta ve göstergelerden indeksi belirleme yöntemlerini de tartışmaktadır. Çevresel etkiler Birleşmiş Milletler tarafından 1993 de Çevresel Temel Etkiler olarak önerilmiştir, UNEP ve başka kuruluşlar tarafından geliştirilmektedir. Örneğin hava kirliliği göstergesi, başlıca kirletici miktarlarının telafi fiyatlarıyla çarpılarak toplanmasından oluşan maliyet, bunun normalleştirilmiş ve önem katsayı ile çarpılmış değeridir, eksergoekonomik değerlerle birleştirilebilir. Teknolojik-ekonomik sürdürülebilirlik, kaynak tüketiminin ve enerji dönüşümü sırasında oluşan etkilerin azaltılmasına bağlıdır.

Bu makalede EÇİ göstergelerinin havacılığı ilgilendirenleri ve bunların birleştirilmesi üzerinde durulacaktır. Yalnızca sürdürülebilir gelişme gösterge ve indisleri söz konusu olduğundan tüm “gösterge” ve “indeks” kelimelerinin yanında “sürdürülebilir gelişme” tekrarlanmayacak ve var kabul edilecektir. Terim ve simgeler Türkçeye öncelik vererek seçilecek, literatürde karşılaşılan diğer şekilleri köşeli parantez [ ] içinde verilecektir. Bir eylemin ya da devamlı sistemin sürdürülebilir gelişmesi incelenirken, o eylemin oluşumunu başından sonuna, eylem için gerekli sistemlerin tasarımını, üretimini, eylem sırasında çevreyle ve toplumla tüm etkileşimleri, eylem tamamlandığında sistemin ortadan kaldırılmasını ve onu takip edecek eylemin ön hazırlığını da içererek, beşikten – beşiğe, ömür çevrimini incelemek gerekir. Teknolojinin gelişmesi, eylemlerin daha hızlı gerçekleşmesine ve hareketliliğin artmasına imkan sağladıkça havacılık sektörünün önemi ve hacmi hızla büyümektedir. Bugün her biri onbinlerce kişi çalıştıran ve çevreyi, ekonomiyi önemli ölçüde etkileyen şu alt sektörlerin sürdürülebilirlik sorunlarını, ayrı ayrı ve etkileşimleriyle incelemekte yarar vardır: Uçak gövdesi ve uçuş; uçak itki sistemleri, uçak yardımcı enerji sistemleri, hava meydanları, hava trafiği kontrolü ve uçak yer hizmetleri, uçak dışı hava araçları, askeri havacılık, havacılıkta geri dönüşüm. Bu alt sektörlerin sürdürülebilirliğinin incelenmesi, ilgili özel ve kamu kuruluşlarının sürdürülebilirliğini önemli ölçüde iyileştirecektir.

## 2. HAVACILIKTA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HAKKINDAKİ ÖNCÜ BAZI ÇALIŞMALAR

Grimley (2006) havacılık sektöründe sürdürülebilirliği incelemiş ve toplumsal, ekonomik, çevresel ve kurumsal indeksler için sırasıyla 7, 8, 9, 5 gösterge önermiştir. Aynı indeksler için İngiliz ve Avrupa Birliği gösterge sayıları sırasıyla 6, 6, 3, 2 ve 7, 9, 3, 0 olarak açıklanmıştır. Görüldüğü gibi teknoloji bu değerlendirmelerde ikinci planda kalmaktadır. Kılış ve Kılış, (2016a) çeşitli büyük hava alanlarını sürdürülebilirlik açısından karşılaştırabilmek amacı ile

bir (havaalanları için genel) sürdürülebilirlik indeksi geliştirmiştir. Benzer şekilde bu indeksleri hava yolları için elde ettikleri indeksler ile birleştirerek bir sürdürülebilir havacılık indeksi tanımlamışlardır (Kılış ve Kılış, 2016b). Çalışma yalnız toplumsal göstergelerin aydınlığa kavuşturulması bakımından değil, birleşik indeksin ilgili kurumlara yol göstermesi bakımından da önemli katkılar içermektedir. Liu (2014) bir yenilenebilir enerji sisteminin sürdürülebilirliğinin belirlenme yöntemi üzerine yapmış olduğu çalışmada üç temel sürdürülebilirliği vurgulamış ve karmaşık bir sistem için bulanık mantık uygulamasını açıklamıştır. Romero ve Linares (2014) ekserji verimliliğini artırmanın her zaman sürdürülebilirlik açısından yeterli olmayacağını savunmuş ve analizlerde ekserji verimliliğine ek olarak tersinirlik derecesi ve ekserjik yıkım katsayısı gibi ekstra göstergeler kullanılabileceğini belirtmiştir. Aydın ve çalışma arkadaşları bir turboprop (Aydın vd. 2013) ve bir turbofan (Aydın vd. 2015) motorunun kısımlarının ekserji analizini yapmıştır. Bu analizler sonucunda motorun çeşitli kısımlarındaki kayıplar ve en verimsiz bölgeler tespit edilebilmiştir. Çalışmalarda motorlar altı adet gösterge için incelenmesine rağmen bu göstergeler aslında birbirleri ile yüksek derecede örtüşmektedirler. Ayrıca makalelerde de (Aydın vd. 2013; Aydın vd. 2015) belirtildiği gibi motorların egzoz gazları direk atmosfere atıldığından, barındırdıkları ekserjinin geri kazanılması mümkün değildir. Dolayısı ile uçak motorlarının ekserjik sürdürülebilirlik analizlerinde geri kazanılabilir ekserji oranının çok büyük önem taşımadığı düşünülmektedir. Önceki paragrafta da belirtildiği gibi Romero ve Linares (2014) ekserji verimliliğini artırmanın iyi bir şey olduğunu ancak bunun her zaman sürdürülebilirlik açısından yeterli olmayabileceğini savunmuştur. Örneğin bir motorun ekserji verimini artırma motorun ilk yatırım maliyetlerini yüksek miktarda artırırsa bu eksergoekonomik sürdürülebilirlik için olumlu olmayacaktır (Bejan, v.d., 1996). Bu sebeple ekserji analizlerine ek olarak yapılacak eksergoekonomik analizler gereklidir; bu analizler maliyetin ne kadarının verimsizliklere ne kadarının da ilk yatırım ve bakıma bağlı olduğunun tespit edilmesini sağlayacaktır (Bejan vd, 1996; Ballı ve Hepbaşlı, 2014). Analizlerin güvenilir sonuçlar verebilmesi bakımından referans çevrenin doğru bir şekilde belirlenmesi, özellikle analizler kimyasal ekserji içeriyorsa, büyük önem taşımaktadır (Romero ve Linares, 2014; Gadreau vd. 2012). Tona v.d. (2010) tarafından bir turbofan motoru için yapılan ekserji ve termoekonomik analizler sırasında kullanılan farklı referans çevre koşullarının motor verim hesaplarını çok etkilemediği ancak motorun kısımları arasındaki tersinmezliklerin dağılımını değiştirdiği görülmüştür. Bu da bileşen bazlı iyileştirme çalışmalarını etkileyebilecektir. Ayrıca bir uçuşun evreleri sırasında uçak motoru çok farklı çevre şartları içerisinde bulunacağından, analizlerin sabit çevre şartları yerine zamana bağlı olarak değişen şartlarda yapılması

(Göğüş v.d. 2002) sonuçları daha güvenilir hale getirebilecektir. Ancak, Gadreau v.d. (2012) e göre her durumda da çevrenin sonsuz olması ve sistemden etkilenmediği varsayımı, atık ekserjinin çevreye etkisini değerlendirmede ve özel durumlarda hatalı sonuçlar doğuracaktır. Bu da ekserjinin sürdürülebilirlik göstergesi olarak kullanılmasındaki etkinliğini düşürebilecektir.

Hava meydanlarının terminal binalarındaki iklimlendirme sistemleri, yolcuların konforu açısından çok önemlidir. Ancak bu sistemler ciddi enerji sarfiyatına da sebep olabilmektedir (Zhang vd., 2013). Binalarda düşük ekserjili iklimlendirme sistemleri konusunda çok detaylı bir çalışma Hepbaşlı (2012) tarafından ortaya konmuştur. O çalışmada iklimlendirme sisteminin ekserji temelli değerlendirilmesi için pek çok parametre tanımlanmıştır. Bu parametreler arasından sürdürülebilirlik indeksi ve ekserji kaynağının yenilenebilir bölümünün oranı dikkat çekmektedir. Bunlardan birincisinin eksergoekonomik gösterge, ikincisinin yenilenebilirlik göstergesi olarak adlandırılmasını önermekteyiz.

Sewalt, vd. nin (2001) yenilenebilir kaynaklardan gelen ekserji girdisinin kaybının çevreye zararı olmadığını savunduğu düşünüldüğünde, ikinci göstergenin daha önemli olabileceği kanısına varılabilmektedir. Ayrıca sistemden çıkan ekserjinin bir kısmı faydalı işe dönüştürülemediği kayıp olacaktır (Sciubba, 2005) ve bu ekserjinin en azından bir kısmının geri kazanılabilmesi önemlidir. Bu sebeple Midilli ve Dinçer (2009) tarafından tanımlanmış geri kazanılabilir ekserji oranı terminal binaları için önemlidir. Ayrıca, Rocco vd. (2014) atıkların belirlenen çevre şartlarına göre pozitif ekserjiye sahip olmasının bu atıkların çevrede değişiklik yapma potansiyelini gösterdiğini ve böylece atık ekserji miktarının çevresel etki için (zehirlilik gibi durumlar haricinde) kullanılabileceğini belirtmiştir.

### 3. GÖSTERGELERİN ÖZELLİKLERİ, NORMALİZASYONU VE BİRLEŞTİRİLMESİ

#### 3.1. Göstergelerin Genel Özellikleri

Sürdürülebilirlik analizi için tanımlanacak göstergeler ölçülebilir olmalı ve sürdürülebilirlik kavramının birçok yönünden birini, bir etkiyi, olabildiğince gerçekçi yansıtmalıdır (Romero ve Linares, 2014). Sürdürülebilir gelişmenin temel (toplumsal, çevresel, eksergoekonomik) indekslerinin her biri birden çok etkiyi içermekte olduğundan bir indeks için seçilen göstergelerle o indekse dahil etkilerin tamamının kapsanması istenilir.

Özellikle toplumsal sürdürülebilirlik indeksi ancak çok sayıda göstergenin hesaba katılmasıyla gerçeğe

yakın belirlenebilir. Bu farklı göstergeleri gruplar halinde birleştirip bileşik göstergeler ve bazı kapsamlı göstergelerin ise alt göstergeleri oluşturulabilir. Toplumsal indeksi belirlemede bazı önemli göstergelerin zamana göre türevi de, türetilmiş göstergeler olarak kullanılabilir. Örneğin Kalkış ve Kalkış (2016a) hava alanlarının ağaçlandırılma durumunu ve ileriye yönelik ağaçlandırma projelerinin varlığını ayrı göstergeler olarak değerlendirdiler.

Boyutsuz büyüklükler birimsizdir ve genelde olduğu gibi mühendisliğin bu dalında da göstergeler için tercih edilmelidir. Fakat boyutsuzlaştırmada kullanılan referans büyüklüğünün sistemin karakteristik bir büyüklüğü olması ve boyutsuzlaştırılan büyüklükle aynı mertebeden seçilerek sayısal hesaplar sırasında değişimlere duyarlılığın kaybolmaması sağlanmalıdır. Boyutlu **göstergelerden de** genel ve kullanışlı olanları arasından **yaygın değil özgül** olanlar (birim alana, hacime, zamana, kütleyle indirgenmiş olanlar) tercih edilmelidir.

Eksergoekonomik göstergeler sistemin temel fiziksel büyüklükleri ve farklı ekonomik parametrelerin birleştirilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Temel birkaç büyüklükten yola çıkarak biri birine çok yakın fakat farklı göstergeler oluşturulabilir. Seçilen göstergelerin birbirleri ile fazla örtüşmeleri zaman kaybına sebep olacağından bundan kaçınılmalıdır. Sınırlı amaçlı özel göstergeler ve yalnız tek bir göstergenin basit bir fonksiyonu olan türetilmiş göstergeler de kullanılabilir; ancak uzun vadede önemini kaybetmeyecek temel göstergelerin belirlenmesine, bunlara öncelik verilmesine ihtiyaç vardır. (Liu, 2014)

**3.2. Göstergelerin Kök Değerleri, Normalleştirme**  
Göstergeler, ölçme ya da analiz sonucu bulunan verilere dayanır. Verilerin istatistiki yöntemler ya da basit ortalamalarla elde edilen ve bir ( $G_i$ ) göstergesini belirleyen sonuç, kök değer ( $G_{i,k}$ ) olarak adlandırılabilir. Farklı tür göstergeler, (örneğin uçakların çevreye gürültüyle ve CO<sub>2</sub> salınımıyla olan iki etkisi) karşılaştırılacaksa ya da birleştirilecekse “büyüklük türünün farkı” ve “etkinin öneminin ifadesi” iki ayrı sorun oluşturur. Birinci sorun boyutsuzlaştırarak ve sayısal büyüklüğü 0 ile +1 arasına dönüştürerek, bilinen adıyla normalleştirerek (normalization), ikinci sorun ise izleyen altbölümde açıklanan yolla çözümlenir.

Bir göstergenin ölçülen kök büyüklüğü farklı sistemlerde ve farklı şartlarda, sıfır ile bir referans büyüklüğü  $G_{i,ref}$  arasında kalıyorsa, normalleştirmek için  $G_{i,ref}$  ile bölmek yeterlidir:

$$G_{i,nor} = G_{i,k} / G_{i,ref}; \quad 0 \leq G_{i,k} \leq G_{i,ref} \quad \rightarrow \quad 0 \leq G_{i,nor} \leq 1,0 \quad (1)$$

Eğer bu şartı sağlayan anlamlı bir referans değeri bulunamıyorsa,  $G_{i,k}$  kök büyüklüğünün değişik

şartlarda ulaşması ihtimali sınırdaki en küçük  $G_{i,min}$  ve en büyük  $G_{i,maks}$  değerleri seçilerek

normalleştirilmiş gösterge şu şekilde tanımlanır (gelişmiş min-maks yöntemi):

$$G_{i,nor} = \left\{ \frac{G_{i,maks} - G_{i,k}}{G_{i,maks} - G_{i,min}} \right\}^p \quad (2a)$$

$$G_{i,k} < G_{i,min} \text{ için } G_{i,nor} = 0; \quad G_{i,k} > G_{i,maks} \text{ için } G_{i,nor} = 1,0 \quad (2b)$$

Tanımdaki üs  $p$  parametresi genellikle 1.0 dır. Özel durumlarda, etkileyen değişkenin ( $G_{i,k}$ ), etkisini belirleyen ( $G_{i,nor}$ ) ile ilişkisi doğrusallıktan saparsa,  $p$  parametresi 1.0 dan büyük ya da küçük alınır.  $G_{i,min}$  ve  $G_{i,maks}$  değerlerinin seçiminde, ortalamaya yakın bölgedeki duyarlılığı azaltmamak amacıyla, veri kümesinin en uç değerleri yerine Eş. (2b) göz önünde tutularak uç değerlere yakın fakat iç bölgeden değerler seçilebilir.

Toplumsal hatta bazı çevresel incelemelerde etkenlerin kök değerlerinin doğruluğuna az güvenilir. Böyle durumlarda bulanık mantık yöntemlerinin geliştirdiği normalleştirme türleri kullanılmalıdır. (Liu, 2014)

### 3.3. Göstergelerin Birleştirilmesi

Bir ülke, kurum ya da sektör için normalleştirilmiş göstergeleri, toplumsal, çevresel, eksergoekonomik ya da eksergoekonomik - çevresel indeksleri oluşturmak amacıyla birleştirirken her göstergenin eşit önemli olduğunu varsaymak basit bir yaklaşımdır. Zayıf ve en basit yaklaşımla, bu temel indeksler eşit önemli varsayılarak genel sürdürülebilir gelişme indeksi oluşturulabilir. Yine çok basit bir zayıf yaklaşımda temel indekslerin tüm göstergeleri eşit önemli varsayılarak doğrudan genel indeks hesaplanabilir (Schlör, 2013). Ancak aşağıda açıklanan yöntemlerden biriyle gösterge önemi farklarını göz önünde tutmak, fazladan çalışma gerektirse de tercih edilmelidir.

$$\sum_{k=1}^p w_k \cdot n_k = 1,0; \quad w_{k+1} = \alpha_k w_k, \quad k = 1, \dots, p-1 \quad (5a) \quad (5b)$$

Her gösterge için ait olduğu grubun önem çarpanı  $w_k$  kullanılarak Eş. (3) uygulanır. Göstergeler yalnız iki önem grubuna ayrılırsa ve bu gruplardaki gösterge

$$w_1 \cdot n_1 + w_2 \cdot n_2 = 1,0 \quad w_1 / w_2 = \alpha \quad (5c) \quad (5d)$$

Göstergelerin ağırlığını belirlemek için önerilen bu yöntem, oluşturulan grupları araştırmacının ayırt etme yöntemi izin verdiği derecede kendi içinde bölerek de derinleştirilebilir. Önerilen bu yöntem uygulamada henüz sinanmamıştır.

### 3.3.3 Ağırlıklı geometrik birleştirme

Bir göstergenin gelişmiş normalleştirilmesinde  $p$  üssünün 1.0 dan farklı alınması, etkisinin indekste meydana getireceği değişimi gerçeğe uygun olarak modelleyebilir, fakat yetersiz de kalabilir.

### 3.3.1. Ağırlıklı aritmetik birleştirme

Normalleştirilmiş farklı göstergeler  $G_{i,nor}$  bir indeksi  $I_j$  belirlemek amacıyla birleştirilecekse ya da karşılaştırılacaksa her bir gösterge önemini ifade eden  $w_i$  katsayısıyla çarpılır. Diğer indekslerin göstergelerinden ayırt etmek amacıyla  $j$  indeksine ait olanlara  $j$  altgöstergesi ilave edilir (burada  $nor$  altgöstergesi gerekmez, çünkü yalnız normalleştirilmiş göstergeler birleştirilir).

$$I_j = \sum_i G_{i,j} \cdot w_{i,j} \quad (3)$$

İndekslerin normalize olmaları ( $0 < I_j < 1.0$ ) için önem çarpanlarının toplamı 1.0 olmalıdır. Bir seçenek tüm göstergeleri eşit önemli varsaymaktır:

$$\sum_i w_i = 1,0 \quad w_i = 1,0/n \quad (4)$$

Bu en basit yaklaşımdır, fakat genellikle tavsiye edilmemektedir (Liu, 2014) çünkü en azından birkaç tanesi diğerlerinden farklı önemli olmaktadır.

### 3.3.2 Genel basitleştirilmiş ağırlıklı aritmetik birleştirme

Bir indeksi oluşturan göstergelerin önem dereceleri hassas olarak belirlenemiyorsa bunlar 2, 3, .. veya  $p$  grupta toplanarak  $\alpha_1 (=w_2/w_1) \dots \alpha_k (=w_{k+1}/w_k) \dots \alpha_{p-1} (=w_p/w_{p+1})$  önem oranları tahmin edilir ve her gruptaki gösterge sayısı  $n_1 \dots n_k$  belirlenir. Her grubun önem çarpanı  $w_k$  şu doğrusal denklem takımının çözümü ile bulunur:

sayıları  $n_1, n_2$ , önem oranı  $\alpha$  olursa  $w_1$  ve  $w_2$  için denklem takımı:

Psikolojideki, hissetme derecesinin etkenin logaritmasıyla orantılı olmasına benzer, bazı sürdürülebilirlikte etkiler etkenlerle logaritmik ilişkidir, göstergelerin logaritmalarının toplamı indeksin logaritmasına eşit olmaktadır. Burada da önem çarpanları kullanılabilir:

$$\ln(I_j) = \sum_i w_i \ln(G_{i,nor}) \quad (6)$$

Böyle durumlarda göstergelerin çarpımı indeksi meydana getirir; önem katsayıları da göstergelerin üssü olur:

$$I_j = \prod_i (G_{i,nor})^{w_i} \quad (7)$$

Önem çarpanları  $w_i$  ağırlıklı aritmetik toplama yöntemi için açıklanan yöntemle belirlenebilir.

Literatürde açıklanan ve özel şartlar için geliştirilmiş diğer birleştirme yöntemlerine Liu (2014) çalışmasında yer vermiştir.

## 2. HAVACILIK SEKTÖRÜ EKSERGOEKONOMİK - ÇEVRESEL GÖSTERGELERİ VE İNDEKSİ

Giriş Bölümünde vurgulandığı gibi genel sürdürülebilirlik açısından toplumsal sürdürülebilirlik, dolayısıyla toplumsal göstergeler büyük önem taşımaktadır. Ancak bu makalenin kapsamı havacılık

sektöründe kullanılması uygun eksergoekonomik - çevresel indeksi oluşturan göstergeler ve onların alt göstergeleriyle sınırlanmıştır.

Bağıntılar ömür çevrimi analizinin birim zamandaki akışları içindir. "E", ekserji akısını göstermektedir.

### 4.1 Ekserjik Göstergeler

Havacılık sektörünün bel kemiği olan uçakların kalbi itki sistemidir. İtki sistemlerinin performansı (kaynak olan yakıtın tükenmeye gidişi ve yanma ürünlerinin çevreye olan etkisi nedeniyle) sürdürülebilirlik açısından çok büyük önem taşımaktadır. Kabin ve terminal binası konfor düzenekleri, yer hizmetleri de enerji tüketimi bakımından itki sistemlerin ardından gelir. Aşağıdaki performans göstergeleri hem tüm motor, tüm iklimlendirme tesisatı gibi toplam (sistem) için "to", hem de bunları meydana getiren bileşenler için "i" geçerlidir:

---


$$\text{Ekserjik verim} = \text{Ürün ekserji} / \text{Kaynak ekserji: } \varepsilon = E_{\text{Ü}} / E_{\text{K}} \quad (7)$$

$$\text{Aradaki fark, tüketilen ekserji } E_{\text{tü}} \text{ olarak adlandırılır: } E_{\text{tü}} = E_{\text{K}} - E_{\text{Ü}} \quad (8)$$

$$\text{Bu fark yıkım ekserji } E_{\text{y}} \text{ ile kayıp ekserjiden } E_{\text{k}} \text{ oluşur: } E_{\text{tü}} = E_{\text{y}} + E_{\text{k}} \quad (9)$$

Kaynak olarak kullanılan **ekserji**  $E_{\text{K}}$  ikinci önemli göstergedir ve genellikle diğer türetilmiş göstergeler için referans olarak alınır.

Söz konusu göstergeler "y" simgesiyle gösterilen, sırasıyla şu oranlardır, (Bejan vd. 1996)

**Ekserji yıkım oranı:**

$$y_{\text{y}} = E_{\text{y}} / E_{\text{K}}, \quad y_{\text{y,i}} = E_{\text{y,i}} / E_{\text{K,to}} \quad [= \delta = f_{\text{y}} = \text{yıkım faktörü}] \quad i = 1, n; \quad (10a,b)$$

$$\text{Ekserji kayıp oranı: } y_{\text{k}} = E_{\text{k}} / E_{\text{K,to}} \quad [= r_{\text{r}}], \quad y_{\text{k,i}} = E_{\text{k,i}} / E_{\text{K,to}} \quad (10c,d)$$

**Ekserji tüketim oranıdır:**(Şöhret Y.,v.d. 2015)

$$y_{\text{tü}} = [ \alpha = 1 - \varepsilon ] = E_{\text{tü}} / E_{\text{K}}; \quad (11a)$$

$$y_{\text{tü,i}} = E_{\text{tü,i}} / E_{\text{K,to}} \quad [= \alpha_i = 1 - \varepsilon_i ] \quad (11b)$$

Diğer sistem göstergeleri: (Aydın, v.d., 2013)

$$\text{Çevre etki faktörü: } f_{\text{ce}} = E_{\text{tü}} / E_{\text{Ü}}, \quad (12a)$$

$$\text{Ekserjik sürdürülebilirlik indeksi: } \theta_{\text{esi}} = 1 / f_{\text{ce}} = E_{\text{Ü}} / E_{\text{tü}}, \quad (12b)$$

$$\text{Geri kazanılabilir ekserji oranı } r_{\text{gk}} = E_{\text{gk}} / E_{\text{k}} \quad (12c)$$

Bileşenler için, sürdürülebilirliği etkileyen, türetilmiş diğer parametreler, homojen notasyonlarla, şunlardır: (Van Gool, W. 1997)

$$\text{Bileşen ekserji verimi: } \varepsilon_i = E_{\text{Ü,i}} / E_{\text{K,i}} \quad (13a)$$

$$\text{Görece ekserji yıkımı: } Y_{\text{y,i}} = E_{\text{y,i}} / E_{\text{y,to}} \quad [= \chi_i ] \quad (13b)$$

$$\text{Üretim eksiltme oranı: } Y_{\text{tü,i}} = E_{\text{tü,i}} / E_{\text{Ü,to}} \quad [= \beta_i ] \quad (14a)$$

$$\text{Görece ekserji kaybı: } Y_{\text{k,i}} = E_{\text{tü,i}} / E_{\text{Ü,to}} \quad (14b)$$

$$\text{İyleştirebilir potansiyeli: } \text{İP}_i = (1 - \varepsilon) E_{\text{tü,i}} \quad (15)$$

Yukarıda tanımlanan parametreler bir sistemin ekserji verimliliğini artırmak için sistem bileşenlerinin daha iyi tanınmasına yardımcı olmak amacıyla güder. (Aydın H.,v.d. 2013)

Ekserji kaynağının bir bölümü yenilenebilir ( $E_{\text{YE}}$ ) ise şu iki parametre sürdürülebilirlikle yakından ilgilidir: (Hepbaşlı, A. 2012)

$$\text{Ekserjik yenilenebilirlik oranı: } R_{\text{YE}} = E_{\text{YE}} / E_{\text{K}} \quad (16)$$

$$\text{Sürdürülebilirlik indeksi: } R_{\text{S}} = E_{\text{K}} / E_{\text{YE}} \quad (17)$$


---

Bazı araştırmacılar yukarıdaki birkaç örnekte görüldüğü gibi, ekserji tüketimini, yenilenebilir ekserjinin oranını ya da ekserjik verimi sürdürülebilirlik ile doğrudan, bire bir ilişkilendirmeyi önermektedirler. Gerçekten de tersinirlik sürdürülebilirliğe önemli katkı sağlayacaktır. Fakat seçilen göstergenin tüm sürdürülebilirliği içermediği verilen addan belli olmalıdır.

#### 4.2. Ekonomik Göstergeler

Doğayı koruyacak önlemler, ekserji verimini artıracak yatırımlar dolayısıyla ucuz olmaya gerektirmektedir, bu da faiz oranının düşük olmasına bağlıdır. O halde faiz oranı ekonomik göstergelerin en önemlilerinden biridir. Bir diğer önemli gösterge yaygın olarak kullanılan elektrik, akaryakıt, kömür gibi kaynakların ekserji birim fiyatıdır. Tabii ki devlet dolaylı olarak bunlara ilaveten vergilerle ekonomiyi etkilemektedir. Saatlik indirgenmiş maliyetlerin altı adımdan oluşan hesaplama yöntemi ve gerekli parametrelerin formülleri Ballı vd. (2008) tarafından açıklanmıştır. Dikkat çekmeye değer bir kısım parametreler aşağıdaki Eksergoekonomik göstergeler bölümünde verilmiştir

Bu ekonomik göstergeler sürdürülebilirliği sağlamakla görevli mühendislerin çalışma alanlarını sınırlarlar; sanayileşmiş ülkelerde sanayileşmeyi teşvik edecek ve sürdürülebilirliğe engel olmayacak düzeydedir. Şartlar elverişsiz de olsa mühendis çözüm yolları bulacaktır, yeter ki devlet çarkları şeffaf, öngörülebilir, keyfilikten uzak olarak dönsün.

#### 4.3. Eksergoekonomik Göstergeler

Bu alt bölümde ekserjiler gibi maliyetler ( $C_i$ ) de birim zaman içindir, sistem bileşenleri arasında akar. Özgül Maliyetler ( $c_i$ ) birim ekserji içindir.

$$c_i = C_i / E_i \quad (18)$$

Sistem bileşenlerinden birine giren ekserji akışı, sistemdeki tersinmezliklerden dolayı bir kısmı tüketilerek sistemden çıkmaktadır; maliyet akışlarında ise bunun tersi bir durum vardır: bir bileşene ( $j$ ) giren maliyet akışı, o bileşendeki hem ekserji tüketiminin bedeli ( $C_{tü,j}$ ), hem de yatırım ve işletme giderlerinin bedeli ( $Z_j$ ) kadar artmış olarak o bileşenden çıkar. Tüm sistem ya da bileşenler için maliyet bilançoları yapılarak giren maliyetlerden ( $C_{g,j}$ ) çıkan maliyetler ( $C_{tü,j}$ ) bulunur.  $C_{tü,j}$  ve  $Z_j$  ikiye bileşenden oluşur, birincisi yıkım ve kayıp ekserjilerin maliyetinden, ikincisi ise **yatırım** ( $Z^y$ ) ve **işletme-bakım** ( $Z^i$ ) maliyetinden. Toplam sistem ve her bileşen için geçerli olan bilanço:

$$C_g + c_g \cdot (E_y + E_k) + (Z^y + Z^i) - C_c = 0 \quad (19)$$

Yerleşik eksergoekonomik analizde ve bileşenlerin eniyilemesinde (optimizasyon) kullanılan iki önemli gösterge Bejanv.d. (1996) tarafından verilmiştir.

**Görece Özgül Maliyet (ÖM) Artışı** = (ürün ÖM – kaynak ÖM)/(kaynak ÖM);

$$r_i = (C_{ü,i} - C_{K,i}) / C_{K,i} \quad (20)$$

Bir bileşendeki özgül maliyet artışının kaynak özgül maliyetine oranı, o bileşenin mali performansı hakkında bilgi verir.

#### Eksergoekonomik faktör

$$f_i = (Z^y + Z^i) / ((Z^y + Z^i) + c_g \cdot (E_y + E_k)) \quad (21)$$

Bir bileşendeki yatırım ve işletmenin sebep olduğu maliyet artışını toplam maliyet artışı ile karşılaştıran bu faktör bileşende giderlerin dengeli olup olmadığına bir ölçütüdür.

Bu göstergeler havacılığın enerji sistemlerinde ekserji tüketimini azaltarak çevreye olan olumsuz etkilerin de azalmasına yardımcı olacaktır. Ekserji yıkımını azaltma çalışmalarında son yıllarda geliştirilmiş bir yöntem, yıkımın azaltılabilir olduğu bileşenleri bulmaya dayanmaktadır. Sistem bileşenlerinin ekserji yıkımını, içsel ve dışsal olarak ikiye parçaya ayırmak eniyilemede kolaylık sağlamaktadır: Sistemin belirli bir bileşeni normal performansında çalışırken onun dışındaki tüm diğer bileşenleri ideal, yıkımsız çalışması durumunda o belirli bileşenin ekserji tüketiminde artış meydana gelir. Bu artış, o belirli bileşenin dışsal ekserji yıkımıdır ( $E^d$ ). Bileşenin toplam ekserji yıkımından dışsal ekserji yıkımı çıkarılarak içsel ekserji yıkımı ( $E^i$ ) bulunur. Şöhret vd. (2015) bu yöntemi açıkladılar ve geliştirerek bir uçak motoruna uyguladılar. Bu yöntem kabin içi iklimlendirmede ekserji kaybını azaltma amacıyla da uygulanabilir (Ordenez, 2003).

#### 4.4. Çevresel Göstergeler

Tüm havacılık sektörünün çevresel göstergeleri için Kılıkış ve Kılıkış (2016) üç ana grupta şu 15 göstergeyi önermiş ve kullanmışlardır:

CO<sub>2</sub> salımı ve azaltma çalışmaları:

1. CO<sub>2</sub> salımı
2. Yolcu başına salım
3. Enerji birimi başına salım
4. ACA düzeyi (1, 2, 3, 4)
5. CO<sub>2</sub> nötrlük hedefi

Çevre yönetimi ve biyo-çeşitlilik:

1. Su kullanımı
2. ISO 14001 sertifikası
3. Çıkarı atık
4. Atığın geri dönüşüme gireninin oranı
5. Korunan alan

Atmosfer ve düşük salımlı taşımacılık:

1. PM10 a göre hava kirlenme
2. Gürültü azaltma
3. Düşük salımlı kara araçları
4. Toplu taşımanın oranı
5. Havacılıkta biyoyakıt

Hava meydanları ve Havayolları için bu göstergelerin hepsi önemli olmakla beraber bazı göstergelerin farklı alt sektörlerden bir kısmıyla hiç ilgisi yoksa diğer ilgisi olanların ağırlığı artar. Örneğin Uçak itki sistemleri alt sektöründe biyo-çeşitliliğin ağırlığı olmayınca kendiliğinden gürültünün, atmosfer kirlenme salınımı ve ekserji veriminin önemi artacaktır. Bu konu altbölüm 4.5 Eksergoekonomik - Çevresel Göstergeler ve Birleştirme’de ele alınıyor.

#### 4.5. Eksergoekonomik Çevresel Göstergeler ve Birleştirilmesi

Her ne kadar kuvvetli sürdürülebilirlik anlayışına göre ekolojik koruma ayrıca önemsenirse de, bu sürdürülebilirliğin tamamını değil ama enerji ve basit çevresel yönlerini birleştiren bir eksergo-çevresel indeks arayışını tamamen engellemelidir.

Bir yandaki “ekserji verimliliği-yenilenebilir enerji” yaklaşımı ve öte yandaki “çevre kirliliğini azaltma-kaynakları koruma” yaklaşımı uygun ağırlıkla birleştirilmelidir.

Bu birleşme doğrultusunda kapsamlı çalışmaların sonuçlarına ulaşmak zaman alacağından, son zamanda önerilmiş eldeki “sürdürülebilirlik indeks” lerini tanımlamakta yarar vardır.

1. Romero ve Linares (2014) ekserjetik verimin sürdürülebilirlik ölçüsü olarak kullanılmasının önemli gerekçelerini sıralamakla beraber bu yaklaşımın zayıf noktalarına da dikkat çekmektedirler. Buna karşılık Kjelstrup vd. (2015) ekserji kayıplarının sürdürülebilirliği azaltıcı etkilerine daha büyük önem vermekteler ve hükümetlerin sürdürülebilirlik çalışmalarını tamamen ikinci yasaya dayandırmalarını önermektedir
2. Sewalt v.d. (2001) ekolojik verimi, ekserji maliyeti yöntemiyle hesaplamayı ve bir bakıma sürdürülebilirlik ölçüsü olarak kullanmayı öneriyorlar. Ekolojik verim, sistemin ürün ekserjisinin, ürün artı yenilenemeyen kaynak ekserji toplamına oranıdır. Ekolojik verimin bilinen ekserji veriminden farkı, kaynaktaki yenilenebilir ekserji hesaba katılmamaktadır. Çünkü bu doğal kaynakları tüketmemektedir.
3. Rosen v.d. (2008), Ballı ve Hepbaşlı (2014) bir sistem bileşeninin ürününün o bileşenin ekserji tüketimine oranını (ekserjik verimin tersini) sürdürülebilirlik indeksi olarak kabul ediyorlar. Ballı ve Hepbaşlı (2014) ayrıca çevre kirliliğine sebep olan gazların verdiği zararın maliyetini de hesaplamakta ve bunu eksergoekonomik maliyet

ile birleştirmektedirler. Ancak ikinci maddede de belirtildiği gibi Sewalt (2001) yenilenebilir kaynaklardan gelen ekserji kaybının çevreye zarar vermeyeceği için bu hesapların dışında tutulması gerektiğini savunmaktadır. Bu doğrultuda ekolojik ve ekserjik verimin aritmetik ortalamasının da bir sürdürülebilirlik indeksi olarak kullanmak düşünülebilir.

4. Frangopoulos (2006) çevresel etkilerin parasal değerini eksergoekonomik analizin sonucu olan ekserjinin parasal değeriyle birleştirilmesini önermekte, dolayısıyla bu alt bölüm başlangıcındaki görüşlere katılmaktadır.

#### 5. EKSERGOEKONOMİK ANALİZ İÇİN İKİ TAMAMLAYICI BİLGİ

##### 5.1. Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi

Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi fikri Sciubba tarafından (Sciubba, 2005) eksergo-ekonomik analizler için ortaya atılmıştır. Bejan vd. (1996) tarafından tanımlanan eksergo-ekonomik analizlerinde, bir sistemin ekserji analizi tamamlandıktan sonra her bir ekserji akımı için bir özgül maliyet (\$/kJ) hesaplanmakta ve bu ilgili ekserji akış oranı ile çarpılarak o akımın maliyeti bulunmaktadır. Burada sermaye ve iş gücü gibi ekserji analizine doğrudan katılmayan maliyetler ise ekstra olarak eklenmektedir. Sciubba (2005) bu yaklaşımın iki adet zayıflığı olduğunu belirtmiştir. Birinci zayıflığın ekserji ile para gibi çok farklı iki göstergenin birleştirilmeye çalışılması, ikinci zayıflığın ise birinciye bağlı olarak çevresel etkilerin bu analizler ile çok doğru bir şekilde değerlendirilemediği olarak belirlemiştir. Ballı ve Hepbaşlı (2013), Bejan vd. (1996) tarafından tanımlanan eksergo-ekonomik analiz yöntemini bir turboprop motor için yaptıkları sürdürülebilirlik analizinde kullandıklarında; ekserji dışı masraflar olarak yatırım ve işletim – bakım maliyetlerini analizlere eklemiş, çevreye olan etkiyi ise ayrıca “çevre zarar maliyeti (environmental damage cost rate)” ile göstermişlerdir. Bu maliyeti, atık gazların kütle debilerini her gaz için belirlenmiş birim maliyet ile çarparak elde etmişlerdir.

Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi’nde ise ekserji akımları için parasal maliyetler tanımlamak yerine bütün maliyetler ekserji cinsinden tanımlanmaya çalışılmıştır. (Sciubba, 2005, 2013, Rocco vd. 2014). Burada ilk yatırım maliyetlerini, iş gücünü ve çevresel etkileri ekserji analizlerine ekserji cinsinden eklemek yoluna gidilmiştir. Seçilen kontrol hacminin kendisinin ve onun tarafından kullanılacak kaynakların ham madde olarak temininden başlayarak, süreç sonrasında oluşan atıkların doğaya zarar vermeyecek şekilde salınabilmesi için gerekli proseslere harcanacak ekserji hesaplanması düşünülmüştür (Rocco vd. 2014). Sermaye ve iş gücünün ekserjik olarak tanımlanması için toplam bir sistem olarak düşünülmüş ve “Bir topluma giriş yapan



ekserji kaynağının bir kısmının iş gücü yaratmak için kullanılacağı” varsayımı ve “İş gücü için kullanılan ekserjinin bir kısmının da parasal dolaşım yaratmak için gerekeceği” varsayımları kullanılmıştır (Rocco vd. 2014). Bu bağlamda iki adet ekonometrik katsayı tanımlanmış ve bu katsayılar çeşitli ülkeler için hesaplanmıştır (Sciubba, 2011). Çevresel etkiler için ise atıkları doğaya yasal limitler içerisinde salılabilmek için gerekli bir prosesin (örneğin bir arıtma tesisi) ekserji-ekonomik analizi de genişletilmiş kontrol hacmi içerisinde eklenmiştir (Rocco vd. 2014). Sciubba (2013) Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi'nin doğru ekserji analizleri için, yeterli ve “ayrıştırılmış” veri tabanları kullanıldığı takdirde, küçük ve büyük ölçekli sistemlere rahatlıkla uygulanabileceğini göstermiştir. Bu yöntem bilinen eksergo-ekonomik analizi, genişletilmiş bir kontrol hacmi için ekserji analizi haline getirmektedir ve Sciubba tarafından tanımlanmış (Sciubba, 2013) ekserji maliyetleri aslında genel ve yerel ekserji verimlerinin tersidir. Midilli ve Dinçer'in (2009) “proton değişim membranlı yakıt hücreleri” için tanımladıkları sekiz adet ekserjetik sürdürülebilirlik göstergesinin Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi yöntemiyle eksergo-ekonomik sürdürülebilirlik göstergeleri olarak da kullanılabileceği düşünülmektedir.

## 5.2. Değişen Çevre Şartlarında Hareket Eden Sistemin Ekserji Bilançosu

Söz konusu şartlarda bilançoya farklı terimlerin katılması gerekmektedir. Göğüş v.d. (2002) den

$$(\dot{E}_{q,R} - \dot{E}_{q,c}) - (\dot{E}_{w,+} + \dot{E}_{w,c}) + (\dot{B}_{in,+} + \dot{B}_{in,c}) - (\dot{E}_d + \dot{E}_L) = \dot{A} + \dot{A}_c \quad (22)$$

$$\dot{E}_{q,R} = \dot{Q}_b \cdot (1 - T_{0,m}/T_R); \quad (22a)$$

$$\dot{E}_{q,c} = \dot{Q}_b \cdot (T_{0,m}/T_b - T_{0,m}/T_R) \quad (22b)$$

$$\dot{E}_w = \dot{W}_{u,m} = (P_s - P_0)\dot{V}_s + \bar{F}_s \bar{V}_s + \dot{W}_{sh} + \dot{W}_{oth} \quad \dot{E}_{w,c} = \dot{W}_D = C_D \rho_0 (\bar{V}_s^2/2) \cdot \bar{V}_s \cdot \bar{A}_p \quad (22c)$$

$$\dot{B}_{in} = \dot{m}_{in} b$$

$$b = b^{TM} + b^{CH}$$

$$b^{TM} = (h_t - T_{0,m} \cdot s) - \sum_i (\dot{N}_i / \dot{m}) \cdot \mu_i^* \quad (22d)$$

$$b^{CH} = \sum_i (\dot{N}_i / \dot{m})_i (\mu_i^* - \mu_{i,0}) \quad (22e)$$

$$\dot{B}_{in,c} = \bar{V}_s \cdot \bar{A}_{in} (P_{in} - P_0)$$

$$\dot{E}_L = \dot{m}_L (h_L - T_{0,m} \cdot s_L) + \dot{Q}_L (1 - T_{0,m}/T_{bL}) \quad (22f)$$

$$\dot{E}_d = T_{0,m} \dot{S}_{gen} \quad (22g)$$

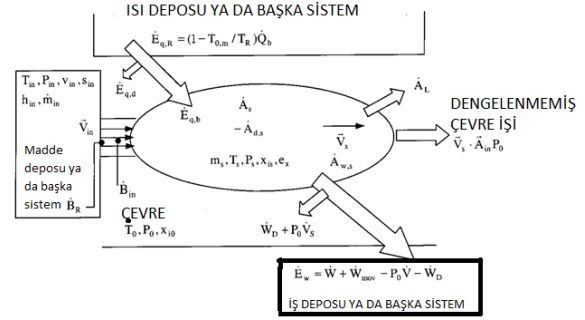
$$\dot{A} = \dot{A}^{TM} + \dot{A}^{CH} \quad (22h)$$

$$\dot{A}^{TM} = d[(E_{ts} + P_0 V_s - T_{0,m} S_s) - (\sum_i N_{i,s} \mu_{i,s}^*)] / dt \quad (22i)$$

$$\dot{A}^{CH} = d \left[ \sum_i N_{i,s} \mu_{i,s}^* - \sum_i N_{i,s} \mu_{i,0} \right] / dt \quad (22j)$$

$$\dot{A}_c = S_s \dot{T}_0 - V_s \dot{P}_0 + \sum_i N_{i,s} \dot{\mu}_{i,0} \quad (22k)$$

aktarılan bilgilerle bu konunun açıklanması amaçlanmaktadır. Değişen çevre şartlarında hareket eden genel bir sistemin ekserji etkileşimi bilançosu Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1: Değişen çevrede hareketli bir sistem için genel ekserji bilançosu (Göğüş v.d. (2002) den uyarlanmıştır)

Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını birleştirerek, çevre basıncının dengelenmeyen basınç işini ve ısı, iş, akış ve sistem ekserjilerinin ( $E_q$ ,  $E_w$ ,  $B$ ,  $A$ ) tam diferansiyele dönüşme düzeltmelerini (indeks c) göz önünde tutarak elde edilen ekserji bilançosu ve simgelerin açıklaması Göğüş v.d. (2002) den uyarlanan aşağıdaki denklemler ile yapılmaktadır. Buradaki denklemlerde (‘) üst indisi pozitif yönü normal yönün (sistem içine) tersinde (sistem dışına) olan büyüklükleri göstermektedir.

Denklem 22’de üstteki “ \* ” reaksiyonsuz ölü (=çevreyle dengeli) durumu göstermektedir, alt indis “ 0 “ ise reaksiyonlu (=çevreyle kimyasal da dahil) dengede durumu göstermektedir. TM ve CH termomekanik ve kimyasal ekserjiyi göstermektedir. Bu eşitliklerde “c“ indisi bulunduran terimler değişen çevre koşulları dolayısı ile denklemlere eklenmesi gereken düzeltme terimidir. Detaylar ve ilgili bazı uygulamalar Göğüş v.d. (2002)’de bulunmaktadır.

### 3. BULGULAR

Genel sürdürülebilirlik indeksi, kendisini belirleyen üç indeksten özellikle toplumsal sürdürülebilir gelişme indeksi dolayısıyla, politik kararlar için önem taşımaktadır. Eksergoekonomik ve çevresel indeksler ise teknolojik gelişme için ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, birleşik eksergoekonomik - çevresel indeksi oluşturan göstergelerden havacılık sektörünü ilgilendirenler tartışılmıştır.

Ekserji analizleri ile bir sistemdeki kayıplar, kullanılmayan potansiyel ve iyileştirilebilecek bileşenler açık bir şekilde görülebilir. Ekserji kullanılarak tanımlanan göstergeler eksergoekonomik-çevresel indeksi belirlemede birinci derecede önemlidir. İndeks ve göstergelerin tanımlanması konusunda ekserji analizi içermeyen çalışmaların (örneğin Kılış ve Kılış, 2016a,b) sürdürülebilirlik konusunda karşılaştırmalar yapılması, birleşik bir indeks tanımlanması ve bu birleşik indeksin ilgili kurumlara yol gösterilmesi bakımından önemli katkılar içermesine rağmen, incelenen sistemlerdeki zayıf noktaları ve iyileştirme potansiyeli yüksek yerleri göstermede yetersiz olduğu düşünülmektedir.

Göstergeleri normalleştirme ve aritmetik, geometrik birleştirme yöntemlerine ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur. Bazı süreçler için önemli olabilecek göstergelerin bazı diğer süreçlerde kullanışsız olmasından dolayı (örneğin uçak motorları için geri kazanılabilir ekserji oranı) çok sayıdaki benzer eksergoekonomik göstergelerden temel ve kullanışlı olanların kullanımına ağırlık verilmesi teknolojik iletişim için kolaylaştırıcı olacaktır. Hepsini “sürdürülebilirlik indeksi” adını almak isteyen üç farklı büyüklüğe, özelliklerine göre farklı gösterge adları verilmesi uygun olacaktır. Çalışmada Bejan vd. (1996) tarafından tanımlanmış ve yaygın olarak uygulanmış eksergoekonomik analizlere alternatif olan Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi (Extended Exergy Accounting, (Sciubba, 2005, 2011)) yöntemine ve uçuş sırasında değişen çevre şartlarının ekserji hesaplarını nasıl etkileyeceğine de yer verilmiştir.

### KAYNAKÇA

Aydın, H., Turan, Ö., Karakoç, T. H., Midilli, A., (2013), Exergo-Sustainability Indicators of a

Turboprop Aircraft for the Phases of a Flight, Energy, cilt 58, sayfa 550 – 560.

Aydın, H., Turan, Ö., Karakoç, T. H., Midilli, A., (2015) Exergetic Sustainability Indicators as a Tool in Commercial Aircraft: A Case Study for a Turbofan Engine, International Journal of Green Energy, cilt, 12, sayfa 28 – 40.

Ballı, Ö., Aras H., Aras N., Hepbaşlı, A., (2008), Exergetic and exergoeconomic analysis of an aircraft jet engine (AJE), Int. J. Exergy, cilt, 5., sayfa 567 – 581.

Ballı, Ö., Hepbaşlı, A., (2013), Energetic and Exergetic Analysis of T56 Turboprop Engine, Energy Conversion and Management, cilt, 73, sayfa 106 – 120.

Ballı, Ö., Hepbaşlı, A., (2014), Exergoeconomic, Sustainability, and Environmental Damage Cost Analyses of T56 Turboprop Engine, Energy, cilt, 64, sayfa 582 – 600.

Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., (1996) Thermal Design and Optimization, John -Wiley&Sons, Inc. Frangopoulos, C., (2006), Exergy, energy system analysis, and optimization, in Encyklopedia of Life Supporting System.

Gadreau, K., Fraser, R. A., Murphy, S., (2012) The Characteristics of Exergy Reference Environment and Its Implications for Sustainability Based Decision Making, Energies, cilt 5, sayfa 2197 – 2213.

Göğüş, Y. A., Çamdalı, Ü., Kavsaoglu, M. Ş., (2002) Exergy Balance of a General System with Variation of Environmental Conditions and Some Applications, Energy, cilt 27, sayfa, 625 – 646.

Grimley, P. M., (2006) Indicators of sustainable development in civil aviation, Ph.D. Thesis, Loughborough University.

Hepbaşlı, A., (2012) Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, cilt 16 sayfa 73– 104.

Liu, G., (2014) Development of a General Sustainability Indicator for Renewable Energy Systems, A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, cilt, 31, sayfa, 611 – 621.

Kılış, Ş., Kılış, Ş., (2016a) Benchmarking Airports Based on a Sustainability Ranking Index, Journal of Cleaner Production, cilt, 130, sayfa, 248 – 259.

Kılış, Ş., Kılış, Ş., (2016b) Multicriteria Analysis of Integrated Airline – Main Hub Airports Based on a Sustainable Aviation Sector Index, International Symposium on Sustainable Aviation, 29 Mayıs – 1 Haziran 2016, İstanbul, Türkiye.

Kjelstrup, S., Dewulf, J., Norden, B., (2015) A Thermodynamic Metric for Assessing Sustainable use of Natural Resources, International Journal of Thermodynamics, cilt 18, sayfa 66 – 72.

Midilli, A., Dinçer, İ., (2009) Development of Some Exergetic Parameters for PEM Fuel Cells for Measuring Environmental Impact and

- Sustainability, International Journal of Hydrogen Energy, cilt, 34, sayfa 3858 – 3872.
- Ordonez, J. C., Bejan, A., (2003) “Minimum power requirement for environmental control of aircraft, Energy, cilt 28, sayfa 1183–1202.
- Rocco, M.V., Colombo, E., Sciubba, E., (2014) Advances in exergy analysis: a novel assessment of the Extended Exergy Accounting Method, Applied Energy, cilt 113 sayfa 1405–1420.
- Romero, J. C., Linares, P., (2014) Exergy as a Global Energy Sustainability Indicator. A Review of the State of the Art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, cilt, 33, sayfa, 427 – 442.
- Rosen, M.A., Dinçer, İ., Kanoğlu, M., (2008) Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. Energy Policy, 36 (1), 128-137.
- Sciubba, E., (2005) Exergo-economics: Thermodynamic Foundation of a Rational Resource Use, International Journal of Energy Research, cilt 29, sayfa 613 – 636.
- Sciubba, E., Frankl, P. (2006), Life-cycle, environmental and social considerations – sustainability, in Encyclopedia of Life Supporting Systems.
- Sciubba, E., (2011) A Revised Calculation of the Econometric factors and for the Extended Exergy Accounting Method, Ecol Model, cilt 222, sayfa 1060 – 1066.
- Sciubba, E., (2013) Can an Environmental Indicator, Valid Both at the Local and Global Scales, be Derived on a Thermodynamic Basis; Ecological Indicators, cilt 29, sayfa 125 – 137.
- Schlör H., Fischer W., Hake J.-F., (2013) Methods of measuring sustainable development of the German energy sector, Applied Energy 101 (2013) Sayfa 172–181.
- Sewalt, M. P. G., Toxopeus, M. E., Hirs, G. G., (2001) Thermodynamics Based Sustainability Concept, International Journal of Applied Thermodynamics, cilt 4, sayfa 35 – 41.
- Şöhret, Y., Açikkalp, E., Hepbaşlı, A., Karakoç, T. H., (2015) Advanced Exergy Analysis of Aircraft GasTurbine Engine: Splitting Exergy Destructure into parts, Energy, cilt 90, sayfa 1219 – 1228.
- Tona, C., Raviolo, P. A., Pellegrini, L. F., Junior S. de O. (2010) Exergy and Thermoeconomic Analysis of a Turbofan Engine during a Typical Commercial Flight, Energy, cilt 35, sayfa 952 – 959.
- Van Gool W. (1997) Exergy policy: fairly tales and factuallities, Innovation and technology strategies- and policies, Dordrecht, Kluwer.
- Zhang, T., Liu, X., Zhang, L., Jiang, J., Zhou, M., Jiang, Y., (2013), Performance analysis of the air-conditioning system in Xi’an Xianyang International Airport, Energy and Buildings, cilt 59, sayfa 11–20.