HAVAALANI TERMİNAL BİNALARINDA EKSERJİ AKILCILIĞI VE KÜRESEL ISINMA

Birol KILKIŞ¹

¹ [Başkent Hacettepe](#) Üniversitesi

DOI: [10.23890/SUHAD.2019.0203](#)^{10.23890/SUHAD.XXXXX.XXXXX}

ÖZET

Bu makalede terminal binalarının ekserji-düzeltili yolcu başına sarf edilen enerji miktarını uçak yolculuklarında sarf edilen ekserji-düzeltili enerji ile karşılaştıran yeni ölçütler tanıtılmaktadır. Söz konusu enerji tüketimlerinin toplam CO₂ salım sorumluluklarına ve küresel ısınmaya nasıl yansıdığı ise akılcı ekserji yönetim modeli (REMM) ile incelenmektedir. Bu ölçütlere göre verimsiz terminaler yolcu başına 12 ila 15 kW-h/yıl enerji tüketmektedirler. Toplamda EP olarak adlandırılan terminallerde yolcu-başı enerji, ısı, soğuk, sıcak servis suyu ve buhar gibi değişik birim ekserji kırımlarını içermediğinden yeni ekserji-düzeltili yolcu başına enerji tanımı getirilmiştir. Böylelikle terminalerin gerçek zamanda CO₂ salım sorumlulukları ve sürdürülebilir çevreye olumsuz etkileri birebir incelenebilmektedir. Yolcu-başı enerji, ekserji eş bazına getirildiğinde bu tür terminalerin birincil enerji talebi 80 ila 100 kW-h/yolcu olmaktadır. Makalede CO₂ salımları yanı sıra soğutma kulelerinin ve yoğunlaşma kazanlarının bilinenin aksine daha fazla su buharının atmosfere salınmasından sorumlu olmaları nedeni ile sera etkilerinin fazla olduğu da göz önünde tutularak küresel ısınma ve ozon tabakası seyreltim potansiyelleri incelenmektedir. Makalede Amsterdam Schiphol ve İstanbul IGA havaalanları yeni ölçütlerle mukayese edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: akılcı ekserji yönetim modeli, ekserji, CO₂ salımı

EXERGIS RATIONALITY IN AIRPORT TERMINAL BUILDINGSAND GLOBAL WARMING

ABSTRACT

This article introduces new benchmarks that compare the amount of exergy-corrected energy consumed per terminal building with the exergy-corrected energy consumed in air travel. How these energy consumptions reflect on total CO₂ emission responsibilities and global warming is examined with a rational exergy management model (REMM). According to these criteria, inefficient terminals consume 12 to 15 kW-h / year energy per passenger. Since the terminals named as EP in total do not contain different unit exergy breaks such as energy per passenger, heat, cold, hot service water and steam, a new definition of exergy-corrected passenger is introduced. Thus, the responsibilities of the terminals to release CO₂ in real time and their negative effects on the sustainable environment can be examined. When passenger-head energy is brought to exergy level, the primary energy demand of such terminals is 80 to 100 kW-h / passenger. In addition to CO₂ emissions, the article examines global warming and ozone layer dilution potentials, considering that cooling towers and condensing boilers are responsible for the release of more water vapor into the atmosphere, contrary to what is known. In the article, Amsterdam Schiphol and Istanbul IGA airports are compared with new criteria.

Keywords: rational exergy management model, exergy, emission

1. GİRİŞ

Havaalanları günlük toplumsal yaşamın ve kentlerin bölünmez birer parçası olmaya başlamış ve her yıl milyonlarca yolcunun gelip geçtiği birer mega mekân olmaya başlamışlardır. Giderek genişleyen bu terminallerin enerji giderleri sadece maliyet açısından artmakla kalmayıp çevresel etkileri de giderek olumsuzlaşmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir terminal binaları için aşağıdaki konular giderek önem kazanmaktadır (Pedro et al., 2010; Kılıç, 2019):

- Sürdürülebilir havaalanı konum seçimi ve doğal ortamın mutlak korunması
- Su tasarrufu
- Enerji verimi ve enerji tasarrufu (Termodinamiğin 1. Yasasına göre)
- Ekserjinin akılcı kullanımı (Termodinamiğin 2. Yasasına ve REMM Modeline göre)
- En az gömülü enerji, ekserji ve CO₂ salımı olan malzeme seçimi
- İç çevre kalitesi ve hijyen
- Emniyet
- Atık yönetimi ve biyogaz üretimi
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının havaalanları sınırlamalarına uygun şekilde kullanımı
- Bölge enerji sisteminin uygulanması
- Düşük-ekserjili terminal binalarının tasarımı ve uygulanması

Bu gerekleri önemli ölçüde karşılayabilen güzel bir örnek ilk kez LEED Platin sertifikasını 2014 yılında almaya hak kazanan San Diego Havaalanıdır. Bu havaalanında 1 MW güneşten elektrik gücü elde eden sistem, su ve enerji tasarruf önlemleri, insan sağlığına, bulaşıcı ve salgın hastalıklara özel önlemler içeren hijyenik sistemler, ısıyı yansıtan çatı, malzemelerde düşük uçucu organik madde ve düşük gömülü enerji, ekserji ve CO₂ içeren yapı ve dekorasyon malzemeleri kullanılmıştır. Çevreci tasarlanan birçok terminalde tüm bu tür alınması gerekli önlemlere karşın enerjinin nitelik ve niceliğine ve enerji arz ve talep noktalarında enerji niteliğinin dengesine yeterli özen gösterilmemektedir. Bunun sonucu olarak da terminallerde birim yolcu başına enerji tüketimi azaltılsa bile çevresel avantajlar ve CO₂ salımlarındaki azaltım aynı oranda gerçekleşmemektedir. Bu sorunu gidermek üzere ekserji-düzeltili performans metrikleri geliştirilmiştir.

2. EKSERJİ-DÜZELTİLİ PERFORMANS MODELİ

Herhangi bir havaalanında **faal-çalışır durumdaki vaziyetteki** tüm terminal binalarının yolcu başına yıllık ortalama enerji gideri, E_p enerjinin ne denli verimli ve tasarruflu kullanıldığı konusunda ön bir

bilgi verse de bu toplam enerjinin ne kadar akılcı ve birincil enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte yerinde kullanıldığı konularında bilgi vermediği gibi somut çözümler de üretmez. E_p değeri sadece yolcu hizmetlerini içerdiğinden tüm ticari, askeri ve kamusal hizmet binalarına ve ilintili hizmetlere ilişkin enerji tüketimleri bu enerji bilançosunun dışında tutulmuştur. Bir havaalanında yılda yolcu başına net terminal gideri olarak, örneğin 12 kW-h/yolcu-yıl enerjinin tüketiliyor olması bu tesisteki terminal binalarının çok da verimli tasarlanmadığını ve işletilmediğini göstererek enerji tasarrufu ve verimliliği konularında genel bir eylem içerse de bu değer atmosferde olumsuz etkileri, ozon tabakasının seyreltisi, enerjinin akılcı kullanılıp kullanılmadığı, oluşan ekserji yıkımlarının çevresel etkileri ve önlenilebilir CO₂ salımları ile olan sayısal ilişkilerinde ve özellikle hangi enerji türünün hangi talepleri karşıladığı ekserji bağlamında açıklanamamaktadır. Ne yazık ki literatürde sadece E_p değeri geçerli ölçüt olarak kullanılmaktadır.

Bu eksikliği giderecek ilk adım olarak tüketilen enerjinin (1. Yasa) yanı sıra bu enerjinin kaynaktan itibaren ne denli akılcı kullanıldığını sorgulamak üzere Eşitlik 1 geliştirilmiştir. Bu eşitlikte E_p , 1. Yasayı temsil ederken paydadaki ψ_R ise 2. Yasa uyarınca enerji niteliğinin ne denli akılcı değerlendirildiğini simgeler.

$$E_{XP} = \frac{E_p}{\psi_R} = \frac{12}{0.15} = 80 \text{ kW-h/yolcu-yıl} \quad (1)$$

Bu eşitlikle tüketilen enerjinin kaynağı ve güç dönüşüm sistemlerinin uygunluğu gibi parametreler de hesaba katılmış olmaktadır. Örneğin, akılcı ekserji verimi, ψ_R 0.15 ise, ekserji-düzeltili E_{XP} değeri 80 kW-h/yolcu-yıl olmakta ve ulusal enerji ve çevre bilançosunda bu örnek terminalin topluma ve çevreye olan gerçek maliyetini ortaya çıkarmaktadır. Dolayısı ile, sadece enerjinin niceliği değil niteliği de bu bağlamda önem kazanmaktadır. Eşitlik 1 ise hala tüketilen enerjinin ekserji kırılımlarını vermemekte olup aslında 1. Yasa ve 2. Yasa pay ve paydada birbirine karışmış durumdadır. Bu sorunu gidermek üzere E_p de ekserjiye dönüştürülmelidir:

$$E_{XP} = \frac{\sum_{i=1}^m E_{pi} \epsilon_i}{\psi_R} \quad (2)$$

Bu eşitlikte, ideal Karno çevrimi tabanında değişik ekserjilere sahip enerji türleri, örneğin elektrik (0.95 kW/kW), buhar (0.80 kW/kW), 90°C ısı (283 K referans sıcaklığında 0.22 kW/kW), 60°C ısı (0.15 kW/kW), 45°C döşemeden ısıtma ısısı (0.11

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik, Alt simge

Biçimlendirdi: Alt simge

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik, Alt simge

Biçimlendirdi: Alt simge

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik, Alt simge

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik, Alt simge

Biçimlendirdi: Alt simge

Biçimlendirdi: Alt simge

Biçimlendirdi: Türkçe (Türkiye)

Biçimlendirdi: Alt simge

kW/kW), 7°C klima soğucu (303 K referans sıcaklığında 0.08 kW/kW), 18°C soğutulmuş kiris soğucu (0.04 kW/kW) gibi kırılımlar tanımlanabilmektedir. Örneğin, toplam E_p değerleri 10 kW-h/yolcu-yıl şeklinde eşit olan iki ayrı havaalanındaki (A ve B) terminallerin ekserji kırılımları Çizelge 1 de gösterilmiştir. Çizelge 1'den görüldüğü üzere literatürdeki tanıma göre E_p değeri eşit olması nedeni ile aynı enerji performansına sahip gibi gözükse A ve B havaalanlarındaki terminal binaları aslında birbirinden enerjinin niteliksel ve niceliksel yönlerden akılcı kullanımı ve paylaşımı, düşük ekserjili sistemlerin kullanımı gibi ayrıcalıkları nedenlerle E_{XP} değeri B havaalanı terminalleri için 5.3, A havaalanı terminalleri için 28.2 dir. Bu farkın oluşmasında ekserjinin akılcı yönetimini gösterir ψ_R değerinin de 0.15 (A Terminali) ile 0.65 (B Terminali) olmasıdır.

Çizelge 1. İki Değişik Havaalanı Terminal Binalarında Ekserji Kırılımı. $E_p = 10$ kW-h/yolcu-yıl.

Hava Alanı	Parametre	Terminal Binaları Enerji Kullanım kW-h/yolcu-yıl						E_p	E_{xp}
		Elektrik	Buhar	30°C Isı	60°C Isı	45°C Isı	18°C Soğuk		
A	E_{tu}	3	0.5	2.5	1.5	-	2.5	10	28.2
	ψ_R	0.95	0.80	0.22	0.15	0.11	0.08		
B	E_{tu}	2.5	0.5	-	1.5	3	0.5	10	5.3
	ψ_R	0.95	0.80	0.22	0.15	0.11	0.08		

Öte yandan, literatürdeki E_p değeri de yeni bir yaklaşımla ve REMM Modeli uyarınca yararlı ve karar verici yeni bir parametreye dönüştürülmüştür. Bu S ölçütü 1 kg CO₂ salımı karşılığında terminalde kaç yolcunun ağırlandığını belirler.

$$S = \frac{1}{\Sigma CO_2} = [E_p \{a(2 - \psi_R) + b\}]^{-1} \quad (3)$$

Enerji-verimsiz bir terminalde ($E_p=10$, $\psi_R=0.15$), a ve b katsayıları sırası ile 0.07 ve 0.67 ise S değeri sadece 0.12 yolcu/kg CO₂ olur. Bunun anlamı, söz konusu terminalde atmosfere salınan toplam (önlenebilir ve doğrudan salım olarak) her bir kg CO₂ gazı karşılığında terminalde yolcuların geçirdiği ortalama bir süre içerisinde sadece 0.1 yolcunun ağırlanabileceğidir. Daha gerçekçi ve somut bir deyişle, her bir yolcu için 10 kg CO₂ salınmaktadır (1/ S). İlk fazında yolcu kapasitesi yılda 90 milyon yolcu olarak planlanan IGA hava alanındaki CO₂ salımı bu hesaba göre yılda 0.9 milyon ton olacaktır. Bu salıma şehirden terminale geliş ve gidişler, havaalanı yapımı sırasında kesilen ağaçlarla kaybedilen CO₂ salımlarını yutum potansiyeli, inşaat sırasında ve kullanılan malzemelerdeki gömülü CO₂ salımları dahil değildir. Öte yandan, inen ve kalkan tarifeli ve tarifesiz uçakların ortalama uçuş menzilleri, R 600 km olan bir havaalanında uçuş sırasında ortalama olarak 1.22 kW-h/yolcu/km, enerji tüketimi, E_F olduğunda (Pedro et al., 2010) jet yakıtı kullanan uçak türbin motorlarının akılcı ekserji verimi, ψ_R yaklaşık 0.40 olduğundan (Kılıkç, 2019), ekserji-

düzeltili, E_{XF} değeri 1830 kW-h/yolcu olur. Bunun anlamı, her bir yolcunun toplam uçak yolculuğundaki enerji sarfiyatının %4.4 ü terminallerde oluşmaktadır. Bu makalede söz konusu oran yer-hava oranı GAR (Ground-to-Air Ratio) olarak tanımlanmış olup bu oran en az düzeyde örneğin, sürdürülebilir terminallerde %1 den az olmalıdır.

$$GAR = \frac{E_{XP}}{E_{XF}} \times 100 = \frac{80}{1830} = 4.4\% \quad (4)$$

Böyle bir oranı yakalayabilmek için üçlü üretim sistemleri, yerinde biyogaz tesisi, ısı pompaları, sıcaklık kademeli enerji depolama sistemleri (değişik sıcaklıklarda ısı, buz ve soğuk su olarak), düşük ekserjili ısıtma ve soğutma sistemleri, atık ısısın geri kazanımı, atık ve su yönetimi gibi sistem ve ekipmanların yanı sıra rüzgâr, güneş ve varsa jeotermal enerji sistemleri FAA yönergelerinin kurallarına tam uyum sağlamak kaydı ile kullanılmalıdır. Bu bağlamda, FAA kurallarına göre güneş panelleri pilotların gözlerini kamaştırmamalı, elektromanyetik etki yaratmamalıdır. Rüzgâr türbinleri esas olarak ICAO Annex 14'deki genel yüksek manialar kısıtlamalarına tabidir. CNS ekipmanları ve benzeri sistemler içinde özel koşullar vardır. Bununla birlikte genelde rüzgâr türbinleri hava alanından en az 7 km (20000 ft) yarıçaplı dairenin dışında olmalı ve iniş ve kalkış güzergahlarında çalkantı (Türbülans) ve elektromanyetik etki yaratmamalıdır. Bu bağlamda örneğin, IGA havaalanına çok yakın kurulmuş bulunan rüzgâr tarlası tamamen sökülme durumundadır (Şekil 1).

Şekil 1: IGA Pistlerine Yakın Rüzgâr Türbinleri (Foto: Birol Kılıkç, 2019)

Jeotermal santrallerin ise H₂S gazı ve CO₂ salımları da mutlak biçimde ve tamamen tutulmalı ve mümkün olduğunca bu zararlı gazlar yakıt ve soğutucu gaz olarak kullanılmalıdır. Öte yandan, havadan-havaya ısı geri kazanımlarında tüketilen ek elektrik gücünün birim ekserjisi ile elde edilen ön ısıtma veya soğutma ısısı, Q değerinin ekserji kazancından fazla olabilir. Bu nedenle, havadan-havaya ısı değiştiricilerinin ekserji kazancı, sisteme eklenen veya bu amaçla büyütülmüş fan ve

motorlarının çekecekleri ek güç, P karşılığı ekserji, aşağıdaki eşitliğe uygun olmalıdır.

$$Q \left| 1 - \frac{T_0}{T_i} \right| > 0.95P \quad (5)$$

$$COP > \frac{0.95}{\left| 1 - \frac{T_0}{T_i} \right|} \quad (6-a)$$

Aynı bağlamda ısı pompalarının COP değerleri de ısıtmada en az 8, soğutmada ise en az 15 olmalıdır ki bu da günümüz teknolojisiye oldukça zordur. Bu bağlamda, şebeke elektriği ile tahrik edilen ısı pompalarında birincil enerji oranı olan BEO 1 değerini ancak bu değerlerle geçebilmektedir:

$$BEO = \eta_r COP \quad (6-b)$$

Bu eşitlikte η_r yakıttan-prize elektrik gücü üretim, nakil ve koşullandırma toplam verimi olup Ülkemizde 0.27 dolayındadır ve bu gücün yaklaşık %60 ı termik santrallerde üretilmektedir.

Bazı durumlarda terminal binaları yoğuşmalı kazanlar ile ısıtılmaya çalışılmaktadır. Bu durumda soğutma işlevi de elektrik gücüne dayalı soğutma gruplarına kalmaktadır. Böylelikle de elektrik tüketimi arttığı gibi çoğu kez yoğuşmalı kazanlar beklenenin aksine atmosfere dayalı da olsa daha çok su buharı atılmasına neden olmaktadır. NASA tarafından yapılan son açıklamalara göre su buharı atmosferde CO_2 den iki kat daha fazla sera etkisine

sahiptir. Şekil 2 de yoğuşmalı kazanın ekserji yıkımları ve su buharı atım sorumlulukları izlenmektedir. Şekil 3 de ise terminalin ısı ihtiyaçlarında tepe yükleri törpülemek üzere ekserji kırılımlı ısı depolamasının aşamaları görülmektedir. Isı pompalarının COP değerinin yüksek olmasını teminen kojenerasyondan (Birlikte Isı ve Güç: BIG) üretilen elektrik gücü ile gün boyu sürekli olarak taban yükte fakat sadece düşük sıcaklık taleplerine cevaben (Döşmeden ısıtma gibi) çalıştırılır. Daha üstte yenilenebilir enerji ve atık ısı gelmektedir. Kojenerasyon ise aslında tüm evrelerde arka planda sürekli çalışmaktadır. Tepe yüklerde ise yüksek sıcaklıkta çalışabilen yoğuşmasız kazanlar kullanılmaktadır. Görüldüğü üzere yoğuşmalı kazanlar hem Şekil 2 ve 3 de görülen gerekçelerle genellikle kullanılmamalıdır. Şekil 4 de ise bir doğal gaz kazanının akılcı ekserji verim çizgesi görülmektedir. Akılcı ekserji verimi sadece %6.7 dir. Bu nedenle yoğuşmasız biçimde sadece en tepe yüklerin olduğu dar zaman dilimleri içerisinde yedek olarak çalıştırılır. Soğutma işlevleri için ise kkojenerasyon sisteminin ürettiği ısı ile çalışan edilen ABS ve ADS sistemleri tandem olarak çalışır. Buz tankı için derin çiller grupları destek olur.

Şekil 2: Bir Yoğuşmalı Kazanın Ekserji Yıkımları ve Gerçek Su Buharı Atım Sorumlulukları

edilmekte idi. Şekil 7 de ise ilk kez somut biçimde gösterildiği üzere, stratosfer ve troposfer tabakalarındaki aylık sıcaklık değişimlerinin tam bir simetri oluşturduğu görülmektedir. Temmuz ayında tepe ve dip sıcaklıklar (minimum ve maksimum) eş zamanlı ve karşılıklı olarak gerçekleşmekte, küresel sıcaklık artarken ozon tabakası soğumaktadır. Bu da göstermektedir ki iki tabakanın sıcaklık değişimindeki simetri kapsamında *GDW* ve *ODP* birbirleri ile doğrudan ilintilidir.

Şekil 7: Küresel Sıcaklık ve Ozon Tabakası sıcaklıklarının aylık değişimleri.

Bu simetrik ilinti 7 sayılı eşitlik kullanılarak dikkate alınmıştır. Ayrıca soğutma kuleleri ve benzeri sistemlerden atmosfere atılan fazla su buharı CO_2 salımlarından iki kat daha sera gazı etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Bu etki de (*t*) üssü ile göz önünde bulundurulmaktadır. Bir sürdürülebilir terminalde toplam *ODI* değeri 0.05 den az olmalıdır.

$$ODI = \frac{SGWP^t}{(1-ODP)} \left(\frac{ALT}{1} \right)^u \{ODP < 1\} \quad (7)$$

Şekil 8 de görüldüğü üzere, *ODI* değerinin artmasını tetikleyen ve giderek artan CO_2 ve su buharı salımları sonucu olarak troposferde artan küresel ısınma ile birlikte soğuyan stratosfer sıcaklıklarına bağlı birim ekserjilerinin sabit bir oranda kalma gereği, ekserji denge çizgisi (Sıcaklık Kesmesi: Temperature Shear) daha yere yakın irtifalarda oluşarak giderek yer yüzüne yaklaşmaktadır. Bu nedenle ileride belki de uçaklar stratosferde uçmak zorunda kalarak daha değişik risklere maruz kalacaklardır.

Şekil 8: Stratosfer ve Troposfer Arasındaki Sıcaklık Kesme Çizgisi.

5. TERMİNAL YAPILARINA ÖRNEKLER

İki ayrı havaalanı terminali enerji performansı açılarından mukayese edilmektedir. Bunlardan birisi Amsterdam Schiphol Havaalanı diğeri ise IGA havaalanıdır.

IGA Terminali

Bu havaalanının ön analizi daha önce yapılmıştır (Kılıç, 2014). Bu makalede ise IGA hava alanındaki çevresel etki dışında kalan birlikte ısı ve güç sistemlerinin gerekliliği ile üçlü üretim bağlamında teknik konular özetlenmiştir. Bu havaalanında üçlü üretim yoktur ve 54 MW ısı güç kapasiteli yoğunmalı kazanlar ve şebeke elektriği tüketilmektedir (154 MW transformatör kapasitesi). Soğutma ise ulusal şebeke elektriği ile çalışan gaz sıkıştırma soğutma grupları ile sağlanmaktadır. Bunların ozon tabakasını seyreltici etkileri (Soğutucu akışkan sızıntıları nedeni ile) yanı sıra, tüm elektrik güç talebinin şebekeden sağlanmasının neden olduğu *GWP*, hava alanındaki tüm diğer elektrik güç talebi olan sistemlerle birlikte büyük bir oranda mevcuttur. Ülkemizde şu anda elektrik gücünün yaklaşık %65 i termik santrallerden sağlanmaktadır ve CO_2 salımları özellikle kömür santrallerinde çok yüksektir. IGA terminallerinde enerji depolaması da bulunmamaktadır. Şekil 9 da IGA havaalanının elektro-mekanik seçenekleri ve şu andaki çevresel kısır döngüsü gösterilmektedir. Kazan sisteminin Akılcı Ekserji Verimi, ψ_R sadece 0.067 dir.

Şekil 9: IGA hava alanı Elektro-Mekanik seçenekler.

Yıllık 250 GW-saat/8000 saat = 31.35 MWe trafo yükünden (soğutma çiller yükleri dahil) yaklaşık bir tahminle 6 MWe kadar bir güç talebi kargo servisi ve benzeri amaçlar için çıkarılırsa terminal kompleksindeki pik güç talebi yuvarlatılmış hali ile 25 MWe olarak kabul edilebilir. Bu durumda 25 MWe/54 MWh kurulu ısı güç hesabı ile tahmini güç ısı oranı, Y 0.46 olarak bulunur. Bu oran birlikte ısı ve güç sistemleri için oldukça düşüktür. Ayrıca birlikte ısı ve güce bağlı ABS ve ADS sistemleri ile soğutma yüklerinin önemli bir bölümü karşılanacağından elektrik güç talebi daha da azalacaktır. Bu oran toprak kaynaklı ısı pompalarının Eşitlik 6-a göz önünde tutulmak kaydı ile düzeltilebilir. Ancak pik ısı ve elektrik değerleri zaman içerisinde çakışmaz ve yük profilleri sürekli değişir ve oranlar da devamlı değişir. Bunun ısı depolaması ile dikkate alınması gerekir. Terminal kompleksinde soğutmadan arındırılmış, birim ısı (1 kW-saat) ve doğal gaz eş bazında olmak üzere aşağıdaki eşitlik geliştirilmiştir.

$$\Delta CO_2 = c \left\{ \frac{1}{\eta_B} (2 - \psi_{RB}) + \frac{Y}{\eta_T} + \frac{Z}{COP \cdot \eta_T} \right\} - c \left\{ \frac{1}{CHPH\eta} (1 - \psi_{RCHP}) + \frac{Z}{COP \cdot \eta_T} \right\} \quad (8)$$

Yukarıdaki eşitliğin iki parantezi içerisindeki son terimler birbirini götürmektedir, çünkü bu eş taban çalışmasında ısı ve elektrik talepleri ele alındığından BIG sisteminde soğutma yükleri gene soğutma gruplarına atanmış bulunmaktadır. Ancak ısı yüklerinin az elektrik güç yüklerinin fazla olduğu sürelerde üretilen fazla ısıнын absorpsiyonlu ve/veya adsorpsiyonlu sistemler kullanılarak soğutma amaçlı değerlendirilmesi yapılabilir. Bu amaçla soğutma yüklerini de aşmayacak bir kapasitede bu sistemler de seçilebilir. Ancak ek ithal kalemi olan bu sistemlerin döviz maliyetleri göz önünde tutulmak ve kendi içlerinde bir döviz geri dönüşü hesaplanmak kaydı ile ek CO₂ salım azaltımı ve parasal getiri mümkün olacaktır.

Yukarıdaki eşitlikte tahmini ve ortalama değerler yerlerine konulduğunda ısı üretimi (kazanlar), şebeke elektrik talepleri ayrı ayrı karşılanması durumuna (Mevcut durum) oranla kojenerasyon fırsatının ne kadar CO₂ salımında azaltma yapabileceği şu şekilde hesaplanabilir: Toplam 54 MW kurulu ısı güç tabanında %70 yıllık ortalama baz yük ve 8000 saat çalışma/yıl hesabı ile ve Ülkemizdeki elektrik üretiminde ortalama doğal gaz payı 0.36 ve 0.46 kurulu güç elektrik ısı oranı, Y 0.46 alındığında, CO₂ salımlarındaki azaltma potansiyeli ΔCO₂ bulunur: kg CO₂/kW-saat

Böylelikle de CO₂ salımında azaltma oranının da $0.559/0.748 = \%74.7$ olduğu görülür.

Üçlü üretim sisteminin tercih edilmeyişinin bir nedeni de bu sistemlerin ithalata dayalı olması gösterilmişse de bu sistemlerin gene şu anda büyük ölçüde ithalata dayalı doğalgaz ile olan işletmedeki maliyet dengesi göz ardı edilmiştir. Şekil 10 da döviz geri dönüşü gösterilmiştir. Üçlü üretim sistemlerinin yerlilik oranı oluştuğunda bu süre daha da kısalmaktadır.

Şekil 10: Üçlü Üretim Sisteminin Döviz Geri Ödeme Süresi

Çizelge 2: Tahmini IGA Enerji Karnesi

Yıllık Yükler	GW-h	CO ₂ Salımları*
Isı	230 GW-h	50000 ton/yıl
Soğuk	100 GW-h	110000 ton/ yıl
Elektrik	800 GW-h (Soğutma Grupları ile)	880000 ton/ yıl
Toplam		1040000 ton/yıl

* Kazan ve ulusal şebekeden beslenen çiller in neden oldukları dolaylı salımlar hariç.

Bu çizelgenin tahminine göre yılda 90 Milyon yolcu kapasiteli terminal kompleksi 1040000 ton/yıl CO₂ salacaktır. Bu değer Eşitlik 3 kapsamında bulunan 0.9 milyon ton/yıl değeri ile örtüşmektedir. 1040000 ton/yıl 90 Milyon yolcuya bölündüğünde terminalden geçen yolcu başına CO₂ salımı 11.55 kg CO₂/yolcu/yıl olmaktadır ki bu değer oldukça fazladır ve terminalin aslında çevre dostu olmadığını göstermektedir. Yukarıda özetlenen bütüncül performans değerlendirmelerinden esinlenerek, yeşil bir terminal kompleksi inşa etmek ve işletmek istendiğinde aşağıdaki maddelerin hepsine riayet edilmesi gerekmektedir.

Yeşil Terminal Koşulları

- o BIG ve Üçlü Üretim Sistemlerinin ilk seçenek olarak kullanımı,
- o Gerekirse ısı pompası teknolojisi ile desteklenmesi,
- o Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı (FAA ve ICAO kuralları dahilinde),
- o Atık enerjinin geri kazanımı, depolanması ve akılcı kullanımı
- o Soğutma kulelerinin en alt düzeye indirilmesi,
- o Atıklardan biyogaz eldesi ve BIG sisteminde yardımcı yakıt olarak kullanılması,
- o Yakın çevredeki göl, gölet ve yeraltı suları ile yerleşim bölgeleri ile ısı irtibat kurulumu
- o Düşük ekserji taleplerine sahip cihazların kullanımı,
- o Ekserji tabanlı kontrol algoritmalarının geliştirilip uygulanması
- o Havaalanı elektromekanik tesisat ve cihazların toplamında TIER 4 emniyet sistemi
- o Sıfır değerine yakın ODI.
- o $\psi_R \geq 0.70$
- o Alternatif Enerji Oranı, AER katsayısının en az %10 olması (Biyogaz dahil)
- o GAR < 0.01
- o Isı Pompalarının Birincil Enerji Oranı, BEO katsayısının 1'den büyük olması
- o Minimum elektromanyetik ve akustik etki
- o Emniyet ve minimum görünürlük açılarından ısı ve güç sistemleri toprak altına yerleştirilebilir. Toprak altındaki ısı ve güç merkezlerinde yerleşim planı yuvarlak olabilir. Böylelikle çevre ve taban tavan yüzey alanları belirli bir

kapasite için minimum olur. Bu yöndeki bir öneri Şekil 11 de verilmiştir.

Şekil 11: 12 Adet Üçlü Üretim Sisteminin Minimum Alanda Dairesel Yerleşimi.

Böylelikle hafriyat, kazı, inşaat ve yalıtım masrafları ve işletim riskleri de azaltılmış olur. Yer altı uygulamalarında BIG ve klasik su soğutma grupları (Çiller) gibi gürültülü çalışan tüm birimler ses yalıtım kabinleri içerisinde olmalı, BIG ve Jeneratör egzozları da ses ve ısı yalıtımlı olmalıdır.

- o Kapalı Enerji ve Ekserji Çember Yönetimi
- o Alternatif ve karşılıklı yakıt kullanım seçenekleri
- o Tier4+ güvenlik

Amsterdam Schiphol Terminali

Bu terminal kompleksi 2020 ve ötesi yıllar için büyük gelişimlere sahne olmaktadır. Bu bağlamda yapılan bir çalışmada ortaya çıkan enerji merkezinin ana başlıkları Şekil 12 de gösterilmiştir (Kılış and Kılış, 2017). Bu sistemin genel ekserji akıcılığı da Şekil 13 de verilmektedir. Akılcı ekserji verimi 0.85 olup yeşil terminal eşiği olan 0.70 değerinden çok daha yüksektir. Bu kavrama net-sıfıra yakın Ekserji terminali adı verilmiştir (nZEXT). Gene ekserji tabanında ve ulusal enerji bilançosu kapsamında yakıt tasarrufu %52 dir. Yolcu başına CO₂ salımı ise sadece 2 kg CO₂/yolcu-yıl olmaktadır.

Bicimlendirilmiş: Girinti: Sol: 0 cm, Aslı: 0,75 cm

Şekil 12: nZEXT Schiphol Havaalanının Elektro-Mekanik Tasarımı (Kılış and Kılış, 2017)

Biçimlendirilmiş: Sola

Şekil 13: Schiphol Isı ve Güç Sistemi Ekserji Çizgesi.

$$\psi_R = 1 - \frac{\varepsilon_{des1} + \varepsilon_{des2}}{\varepsilon_{sup}} = \frac{\left(1 - \frac{370}{400}\right) + \left(1 - \frac{283}{300}\right)}{\left(1 - \frac{283}{2200}\right)} = 0.85$$

$$PES_g = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{0.45}{0.85} + \frac{0.10}{0.75} + \frac{0.35}{0.52} \right) \times \frac{(2-0.211)}{(2-0.85)}} \right] \times 100 = 52\%$$

Yerinde Biyogaz

Şekil 14 de havaalanından geçen yolcu sayıları aylara göre verilmiştir (Günlük ortalama yaklaşık 160000). Bu tür büyük yapılarda insanların ve restoran atıklarının biyogaz kapasiteleri hesaplanabilmektedir. Schiphol havaalanındaki biyogazdan elde edilebilecek ısı iyimser tahminle 2.6 MW_i kötümser tahminle 1.1 MW dır (Taşeli and Kılıç, 2016).

Şekil 14: 2015 Yılı Aylık Yolcu Hareketi (Schiphol Group, 2015).

Güneş Enerjisi

Havaalanında FAA ve ICAO sınırlamalarına uyum için yıl-boyu güneş ışınlarının uçaklara yansımaya riskler analiz edilerek sadece uygun görülen yerlere uygun aç ve konumlarda güneş enerjisi sistemleri öngörülmüştür.

Şekil 15. Güneş Işınlarnın Pilotlara Yansıma Çözümü (<https://www.forgesolar.com/accounts/signup/sub/>)

Çizelge 3. PV ve Türevlerinin Tasarım Ekserjileri.

SİSTEM	Kapasite MW _{ex}
Mevcut Paneller	0.5
Cephelerde Saydam PV Panelleri	0.2
Gelişmiş PVT Paneller	0.35
Çatı Uygulamaları	2.5
TOPLAM	3.55

Ekserji girdileri sadece bir terminal bölümü için şu şekildedir:

- Doğal Gaz (1.5 MW) + Biyogaz (2.5 MW): 4 MW
- Yer Isısı: 0.1 MW
- Güneş Enerjisi: 3.55 MW (Elektrik)
- Güneş Enerjisi: 4 MW (Isı)
- Atık Isı: 0.5 MW

Bu durumda fosil yakıt girdisi sadece %14 dür. E_p değeri 4 kW-h/yolcu/yıl olarak hesaplandığında $E_{xp} = 4/0.85 = 4.7$ (IGA da 80) ve $GAR = 0.02$ olur (IGA için henüz yeterli veri yoktur).

Güvenlik ve yolcuların ibadet gereksinimlerini optimize eden genel amaçlı (Interfaith) ibadet salonlarından birisi de bu havaalanında bulunmaktadır. Yılda milyonlarca yolcunun geçtiği uluslararası havaalanlarında yolcuların bu gibi gereksinimlerinin de çoğulcu biçimde göz önünde tutulması gerekmektedir. Ancak bazı yabancı havaalanları bu yerlerde toplu ibadetlere son günlerde az da görünen şiddet gösterileri nedeni ile kısıtlama getirmektedirler.

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik, Alt simge

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik, Alt simge

Biçimlendirdi: Alt simge

Biçimlendirdi: Yazı tipi: İtalik

6. SONUÇ ve TARTIŞMA

Her ne kadar yolcuların terminal binalarında geçirdikleri süre zarfındaki enerji, ekserji ve çevre sorumlulukları havada geçirilen süre içerisindeki sorumluluklara oranla küçük bir pay olarak gözükse de yılda dünyada yaklaşık 4.5 milyar yolcu taşındığı göz önüne alındığında ve bu yolcuların seyahat başlangıcında ve sonunda olmak üzere iki kez ayrı terminallerden geçtiğine ve bu yolculardan % 30'unun en az bir aktarma yaptığı düşünülürse terminallerin yıllık toplam yolcu yükü 10 milyarın üzerindedir. Terminallerin ortalama CO₂ salımları iyimser bir tahminle ve 1. Yasa uyarınca 5 kg CO₂/yolcu-yıl alındığında yıllık toplam CO₂ salımı 50 Milyon ton/yıl eder. Bu sayıya ekserji yıkımlarından oluşan önlenebilir CO₂ salımları (2. Yasa) dahil değildir. Bu salımlar genelde doğrudan salımlarla aynı miktardadır. Dolayısı ile, terminallerin çevreye olumsuz etkileri azımsanmayacak boyutlardadır ve terminaller bu sorumluluğunun azaltılması yönünde bu makalede verilen on adet metrik kullanılarak çevre ile daha yakından ve bütüncül bir biçimde ilişkilendirmek üzere baştan tasarlanmalı ve mevcut terminaller de büyük değişimlerden geçirilmelidir. Bu bağlamda üçlü üretim sistemlerini bu çözümün temeli olduğu da unutulmamalıdır. Daha da önemlisi alış-veriş reyonları gibi, CIP ve VIP salonları gibi göz kamaştırıcı üst yapılar ve mimari her ne kadar yolcuya olumlu yönde hitap etse de yolcuların dikkat etmesi gereken esas konu altyapı teknolojisi, gerçek iç çevre kalitesi, hijyen ve ülke, çevreye ve küresel ısınmaya karşı olumlu katkıları veya zararlarıdır.

SİMGELER

a, b	Eşitlik 3 çarpanları
AER	Terminallerde tasarım değeri olarak kullanılan-toplam alternatif enerjinin tüketilen toplam enerjiye oranı
ALT	Bir sera gazının atmosferde kalış süresi, yıl
BEO	Birincil enerji oranı
c	Doğal gazın birim CO ₂ içeriği, kg CO ₂ /kW-saat (0.2 kg CO ₂ /kW-saat)
$CHPH\eta$	Kojenerasyon (BIG) sisteminin kısmi ısı verimi
CO_2	Karbondiyoksit salımı, kg
ΔCO_2	Önlenebilir CO ₂ , kg CO ₂ /kW-saat
COP	Isı pompası tesir katsayısı
E_f	Bir yolcunun uçuş sırasında ortalama olarak enerji tüketimi, kW-h/yolcu/km
E_{xf}	Ekserji-düzeltili E_f , kW-h/yolcu/km
E_p	Terminal binalarının yolcu başına yıllık ortalama enerji gideri, kW-h/yolcu-yıl

E_{xp}	Ekserji-düzeltili E_p , kW-h/yolcu-yıl
GAR	Bir yolcunun terminalde ve havada tükettiği enerji oranı (Ground-to-Air Ratio)
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli (Global-Warming Potential)
ODI	Ozon seyretme endeksi (Ozon-Depleting Index)
ODP	Ozon seyreltme potansiyeli (Ozone-Depleting Potential)
P	Havadan-havaya ısı değiştiricileri için sisteme eklenen veya büyütülmüş fan ve motorlarının çekecekleri ek güç, kW
PER	Birincil enerji tasarruf yüzdesi
Q	Havadan-havaya ısı değiştiricilerden elde edilen taze havanın ön soğutma (Yazın) veya ısıtma (Kışın) gücü, kW
R	Bir havaalanındaki hava trafiğinin ortalama uçuş menzili, km
s, t, u	Eşitlik 7 deki çarpan ve üs katsayıları
S	1 kg CO ₂ salımı karşılığında terminalde ağırlanan yolcu sayısı
T_o	Dış hava sıcaklığı (Kuru Termometre)
T_i	Isı geri kazanım cihazından iç ortama çıkıştaki sıcaklığı (Kuru Termometre)
Y	Terminal kompleksinin ortalama elektrik-ısı yükleri oranı
Z	Terminal kompleksinin ortalama soğutma-ısı yükleri oranı
ϵ	Karno çevrim tabanlı birim ekserji, kW/kW
η_B	Yoğuşmalı kazanın yıllık ortalama verimi (iyimser senaryo)
η_T	Yakıttan-prize elektrik gücü üretim, nakil ve koşullandırma toplam verimi
ψ_R	Akılcı Ekserji Yönetim Verimi
ψ_{RB}	Kazan sisteminin Akılcı Ekserji Yönetim Verimi
ψ_{RCHP}	Kojenerasyon Sisteminin Akılcı Ekserji Yönetim Verimi

Alt Simgeler

des	Yıkılan (Destroyed) ekserji
E	Elektrik üretiminden çıkış
EX	Ekserji
F	Yakıt
R	Akılcı Ekserji Verimi ile ilgili
ret	Dönüş
ref	Referans
ST	Stratosfer
sup	Isı arzı
TR	Troposfer

Kısaltmalar

ABS	Absorpsiyon
AD	Biyogaz tesisi
ADS	Adsorpsiyon
BIG	Birlikte Isı ve Güç (Kojenerasyon)
CHP	Combined Heat and Power (BIG)
CNS	Communications, Navigation, and Surveillance
CWT	Soğuk su tankı
EPA	USEnvironmental Protection Agency
FAA	Federal Aviation Administration
GSHP	Toprak kaynaklı ısı pompası
HE	Isı değiştirici
HWT	Sıcak su tankı
ICAO	International Civil Aviation Organization
IGA	İstanbul Grand Airport
IT	Buz tankı
NASA	National Aeronautics and Space Administration
nZEXT	Net-sıfıra yakın ekserji terminali
PV	Foto-voltaik
PVT	Foto-voltaik ve ısı
PVTC	Foto-voltaik ısı ve soğuk
REMM	Rational Exergy Management Model
T	Sıcaklık, K

KAYNAKÇA

- Kılış, B., 2014. Energy Consumption and CO₂ Emissions Responsibility of Airport Terminal Buildings: A Case Study for the Future Istanbul Airport, Energy and Buildings, 76: 109-118.
- Kılış, B., 2019. Holistic View of Sustainable Aviation, Chapter 2.4, Sustainable Aviation, Springer, ISBN 978-3-030-14194-3.
- Kılış, B., Kılış, Ş., 2017. New Exergy Metrics for Energy, Environment, and Economy Nexus and Optimum Design Model for Nearly-Zero Exergy Airport (nZEXAP), Energy, 140. Pt.2 1329-1349.
- Pedro, J. P-M. and Sorba, I.A., 2010. Energy Consumption of Passenger Land Transport Modes, Energy & Environment 21(6): 577-600.
- Taşeli, B. and Kılış, B. 2016. Ecological Sanitation, Organic Animal Farm, and Cogeneration: Closing the Loop in Achieving Sustainable Development-A Concept Study with On-site Biogas Fueled Trigeneration Retrofit in a 900 Bed University Hospital, Energy and Buildings, 2016, 129, pp: 102-119

[Kılıç, B., Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi \(2019\), 4-1, 26-39](#)