



HİDROJEN DÖNGÜLÜ, SIFIRA YAKIN CO₂ SALIMLI SÜRDÜRÜLEBİLİR YAVAŞ ŞEHİR-ÇİFTLİK BİLEŞKESİ

Bırol Kılış¹

1.GİRİŞ VE KURAM

Küresel ısınmanın çok büyük bir bölümünün yapıları çevredeki insan çalışmalarının bir sonucu olduğu bilinmektedir [1]. Binalarda tüketilen enerjinin küresel enerji tüketimine oranı %40 dolayındadır. Tarım ve hayvancılıkta ise bu oran, 2013 verilerine göre %11 dolayındadır [2] ve bu oran 2020 yılında % 12,72 olmuştur (5,87 GtCO_{2eş}) [3]. Dolayısı ile binaların yanı sıra, tarım ve hayvancılığın enerji tüketiminin küresel ısınmadaki toplam payının ortak bir sorun olduğu ve bu ortak soruna da, ortak çözümlerin bulunması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ortak sorunların ortak çözümlerinde ise en akılcı yaklaşım her ne kadar Avrupa Birliğinin dayatması söz konusu ise de özellikle son yıllarda yavaş kentlerin tanımında ve coğrafyasında tarım ve hayvancılık yan yana, hatta iç içe yer almaktadır [4]. Küresel ısınmada ise en büyük etmen karbondioksit salımlarıdır. Bu salımların iki ana boyutu bulunmaktadır. Bu boyutlardan birisi teori ve uygulamada göz ardı edi-

leduran önlenebilir salımlardır, ΔCO_2 . Bu salımlar termodinamiğin ikinci yasası çerçevesinde enerjinin yararlı iş potansiyelinin (ekserji, enerjinin niteliği) yeterli düzeyde değerlendirilmemesinden kaynaklanmaktadır. Şu anda dünya ortalaması olarak enerji niteliğinin değerlendirilebilir oranı yüzde yirmi dolayındadır. Değerlendirilmeyen bölüm ise önlenebilir salım olarak küresel ısınmayı tetiklemektedir. Bu salımlar termodinamiğin birinci yasası çerçevesinde yerinde ölçülebilir ve hesaplanabilen doğrudan salımların yaklaşık beş katıdır. Bu nedenle, sürdürülebilir enerji kullanımı, enerji tasarrufu gibi enerjinin niceliği ile ilgili çözümlerle küresel ısınmanın önlenemeyeceği ve Paris Anlaşması hedeflerine ulaşamayacağı bellidir, zira sorunun kaynağının sadece beşte birini görmek ve çözümler bu beşte birlik bölümde aranmaktadır. Dolayısıyla, küresel ısınmanın önlenmesinde termodinamiğin birinci yasası yanı sıra, ikinci yasa bu konuda çok daha önem ve aciliyet taşımaktadır.

Bu yazıda, sürdürülebilir yapıları çevre alanında yavaş bir

¹ Prof. Dr. OSTİM Teknik Üniversitesi - birol.kilis@ostimteknik.edu.tr

kent kavramı ile sifira yakın karbon dioksit salım sorumluluğu olan, hidrojen enerjisinin aynı konumdaki yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlandığı bir çiftlik modeli tümleştirilerek yeni bir model önerilmektedir. Bu model, termodinamiğin ikinci yasası ve uzantısı çerçevesinde değerlendirilmektedir. Ekserji yıkımlarının neden olduğu neredeyse önlenabilir karbon dioksit salım sorumlulukları da göz önünde tutularak, yenilenebilir enerji kaynaklarının akılcı ve çevreci değerlendirildiği yeni ölçütlerle hesaplanmaktadır. Bu modelde, enerji kaynaklarından elektrik gücü eldesi amacı ile yeni tür bir rüzgâr türbin sistemi, yeni nesil foto-elektrik-ısı güneş panelleri ve düşük entalpili jeotermal enerji kaynaklarının değerlendirildiği organik Rankine çevrimli sistem kullanılmaktadır. Tüm bu sistemlerden ısı güç de elde edilmektedir. Elektrik enerjisinden elektroliz yöntemi ile kapalı su döngülü elektroliz sistemi ile hidrojen elde edilerek depolanmaktadır. Hidrojen, isteme bağlı olarak, yakıt pillerinde yeniden elektrik gücüne dönüştürülmektedir. Sistemde ayrıca toprak kaynaklı ısı pompaları, adsorpsiyonlu soğutma cihazları, seralar ve hidrojen enerjili hareketlilik bulunmaktadır. Zira mekanizasyon için de, yeni bir ölçüt geliştirilmiş olup yazıdaki örnek sistemde bu ölçütün 12,3 ton buğday/hektar-kg CO₂/kW-h kadar yüksek olabileceği anlaşılmıştır. Yavaş kent ise, tarım ve hayvancılıkla bütünleşik biçimde doğal gaz-hidrojen karışımı bölge enerji ağına sahiptir. Yan ürün olarak biyogaz elde edilmektedir. Bölgedeki yapılar ise kendi üretir/tüketir şeklinde sifira-yakın ekserji binalarıdır. Örnek bir hesaplamada, böyle bir birleşimin ekserji kayıplarının en az düzeyde olması nedeni ile doğrudan karbon dioksit salımlarının sifir, ekserji yıkımlarının neden olduğu salım sorumluluklarının ise sifira çok yakın olduğu bulunmuştur. Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının ekserji yönetim akıcılık verimi ise yüzde doksandır.

1.1 İkinci Yasanın Küresel Isınmadaki Rolü

Termodinamiğin ikinci yasası enerjinin niteliği (yararlı iş potansiyeli), E_x ile ilgilidir. Birinci yasa ise enerjinin niceliği ile (Q) ilgilidir. Enerjinin niteliği ise ideal Carnot çevrimi ile tanımlanabilir. Bu eşitlikte T_{ref} çevre referans sıcaklığı, T_1 ise uygulamadaki sıcaklık veya kullanılan yakıt, adyabatik yanma sıcaklığıdır. Isıl olmayan enerji sistemlerinde ise Carnot çevrimi eşdeğeri, sanal bir sıcaklık, T_f kullanılır. Eğer sistem kapalı bir döngü içerisinde ise, örneğin ısıtma kazanından gidiş (T_1) ve dönüş sıcaklığı (T_2) söz konusu ise, o zaman Eşitlik 1, Eşitlik 2'ye dönüşür

$$E_x = \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f}\right) \times Q \quad (1)$$

$$E_x = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times Q \quad (2)$$

$$T_f = \frac{T_{ref}}{\left(1 - \frac{I_n \times 0.95}{TSI}\right)} \quad \{\text{Güneş Enerjisi}\} \quad (3)$$

$$T_f = \frac{T_{ref}}{(1 - 0.95 \times \eta_{IWT})} \quad \{\text{Rüzgâr Enerjisi}\} \quad (4)$$

Akılcı Ekserji Yönetim Modeline (REMM) göre, herhangi bir enerji akısındaki arz (ϵ_{sup}) ve talep (ϵ_{dem}) birim ekserjilerinin ne denli uyumlu olduğu küresel ısınmanın bir ölçütüdür [5]. Bu incelemeden hareketle *Akılcı Ekserji Yönetim Verimi* hesaplanır. Arz ve talep arasındaki ekserji uyumsuzluğundan doğan birim ekserji yıkımları ise (ϵ_{des}) önlenabilir ΔCO_2 salımlarına neden olur, zira kaybedilen birim ekserjiyi karşılamak üzere başka bir yerde, başka bir zamanda, başka bir sistemle ve yakıtla ek enerji kaynakları tüketilir ve ΔCO_2 salım sorumluluğu ortaya çıkar.

$$\psi_R = 1 - \frac{\epsilon_{des}}{\epsilon_{sup}} \quad (5)$$

100°C sıcaklıkların altındaki uygulamalarda bu denklem aşağıdaki biçimde de yazılabilir:

$$\psi_R = \frac{\epsilon_{dem}}{\epsilon_{sup}} \quad (6)$$

$$\Delta CO_2 = k \times \epsilon_{des} = k \times \epsilon_{sup} (1 - \psi_R) \quad \{Q=1\} \quad (7)$$

$$CO_2 = \frac{c_K}{\eta_I} \quad \{\text{Fosil yakıtlı sistemler, } Q=1\} \quad (8)$$

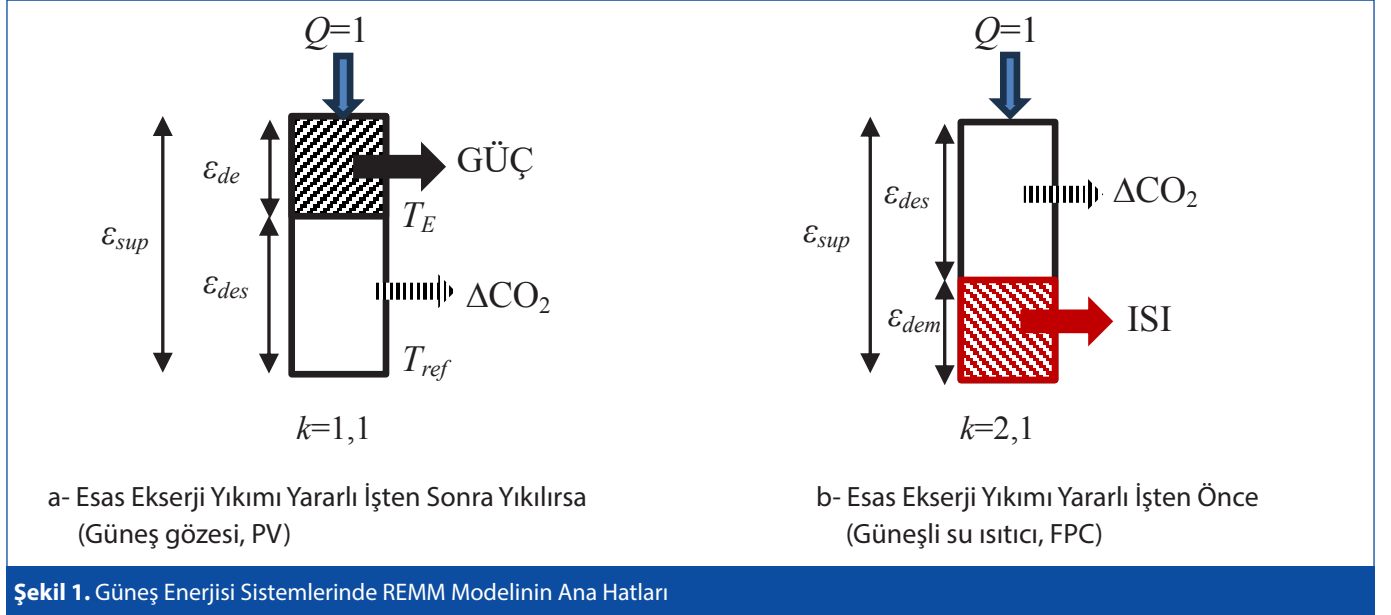
$$R = \left(\frac{\Delta CO_2}{CO_2}\right) = \frac{k \times \epsilon_{sup} (1 - \psi_R) \times \eta_I}{c_K} \quad \{c_K > 0\} \quad (9)$$

Eşitlik 9'a bakıldığında, yüksek nitelikli enerji kaynaklarında (ϵ_{sup}) R değeri daha yüksektir. Aynı bağlamda, ψ_R

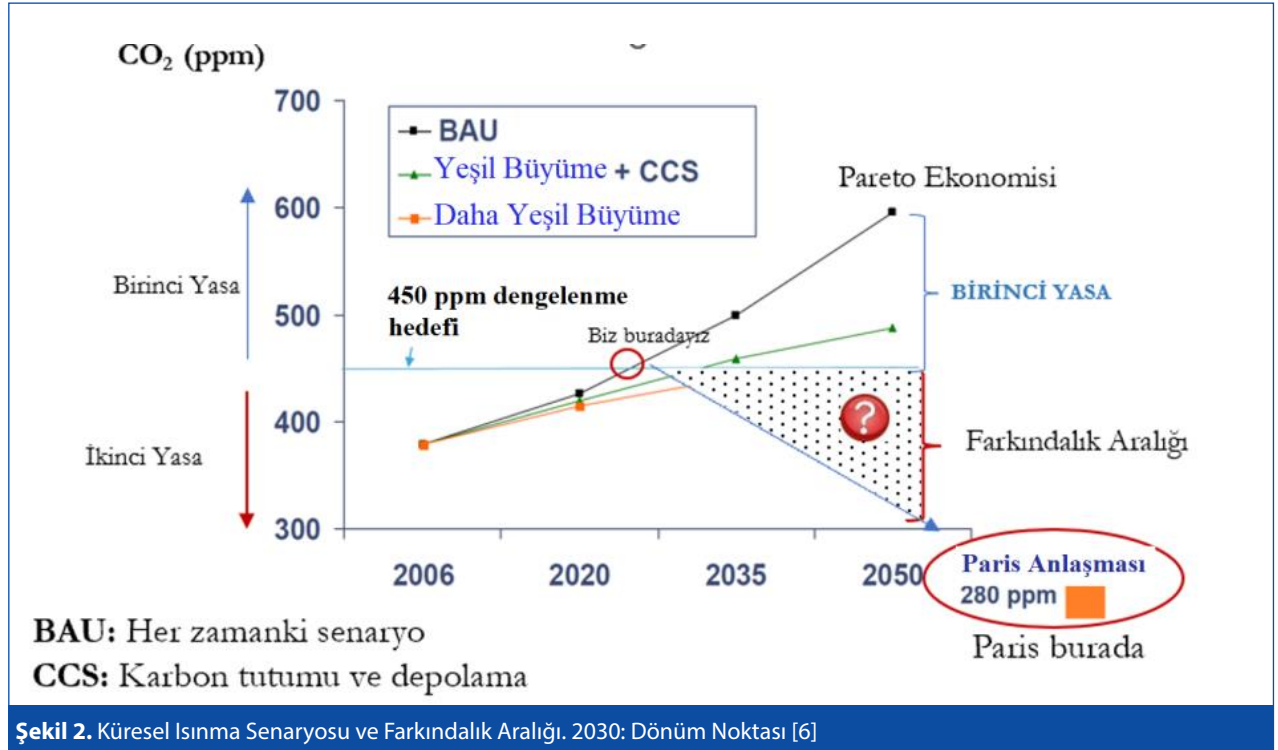
değeri ne denli az ise R değeri, dolayısı ile ΔCO_2 o denli yüksektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğrudan salımları olmadığından, Eşitlik 9 geçerli değildir. Şekil 1`de bu modelin ana hatları birim enerji akısında görülmektedir. Örneğin bir güneş enerji sistemi elektrik gücü üretiyorsa (PV) Şekil 1-a`da gösterildiği üzere hala ΔCO_2 salım sorumluluğu bulunmaktadır.

Değişik karbonsuzlaşma kestirimlerine göre atmosfer-

deki CO_2 salımlarının artışı Şekil 2`de gösterilmektedir. En iyimser tahmine göre (Daha yeşil büyüme+ karbon yakalama ve depolama) atmosferdeki toplam CO_2 derişimi 450 ppm değerinde sabit kalabilecektir. Halbuki Paris Anlaşmasında bunun 2050 yılında 280 ppm değerine inmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşmanın ise sadece birinci yasa bağlamında gerçekleşmeyeceği, toprak kaynaklı yeşil sera ve elektrik gücü ile tahrik edilen ısı pom-



Şekil 1. Güneş Enerjisi Sistemlerinde REMM Modelinin Ana Hatları

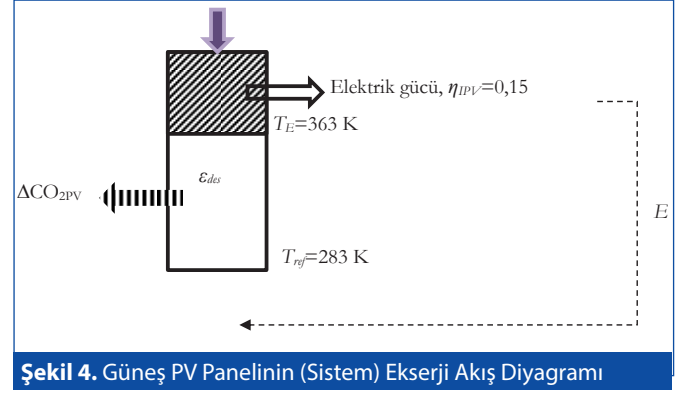


Şekil 2. Küresel Isınma Senaryosu ve Farkındalık Aralığı. 2030: Dönüm Noktası [6]

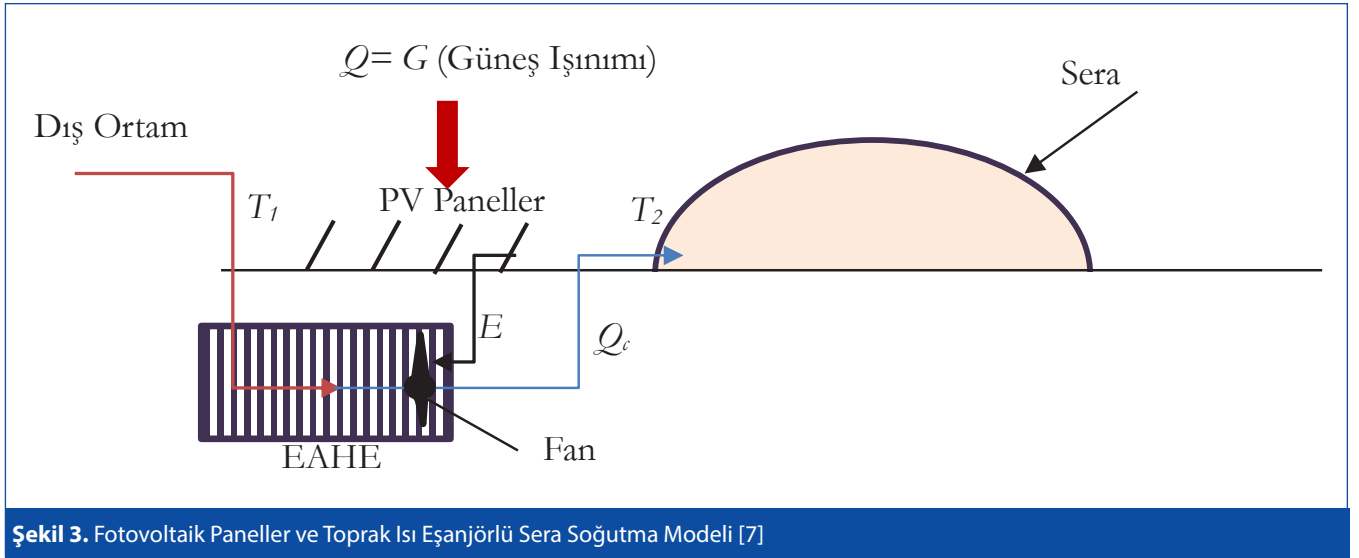
pası örneklerinde (Bölüm 1.2) görülmektedir. [6]. Mevcut yöntemlerle bu hedefe ulaşamayacağına göre, önemli bir farkındalık aralığı bulunmaktadır ve bu aralık ikinci yasanın küresel ısınmaya karşı yeterince değerlendirilmeyişine bağlıdır.

1.2 Örnek: Toprak Ortamı ve Güneş Enerjili Sera

Şekil 3'te yaz aylarında güneş gözeleri ile elde ettiği elektrik gücünü (E) hava hareketliği için fanlar kullanarak değerlendirmekte ve dış ortamdan aldığı taze fakat sıcak havanın yer altındaki bir labirentte (EAHE) ön soğutmasını gerçekleştirerek serayı serinletmektedir (Q_c) [7].



Şekil 4. Güneş PV Panelinin (Sistem) Ekserji Akış Diyagramı



Şekil 3. Fotovoltaik Paneller ve Toprak Isı Eşanjörlü Sera Soğutma Modeli [7]

Örnek veriler:

$$\eta_{IPV} = 0.15.$$

$$Q_c = 15 \text{ kW}, T_1 = 305 \text{ K}, T_2 = 295 \text{ K}, E = 1,2 \text{ kW}, G = 8 \text{ kW}, T_E = 363 \text{ K (PV panel kasa sıcaklığı)}, T_{ref} = 283 \text{ K}$$

1.2.1 Enerji Dönüşüm Aşaması (Sistem):

Bu aşama, güneş enerjisinden elektrik gücü eldesini içermektedir.

$$\Delta CO_{2_{sistem}} = 1,1 \times G \times (1 - \eta_{IPV}) \times \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_E}\right) = 1,65 \text{ kg CO}_2 / \text{kW-h}_{ex} \quad (10)$$

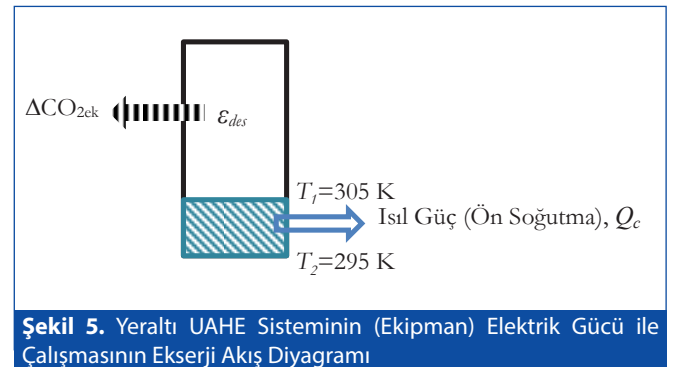
$$\psi_{R_{sistem}} = 1 - \frac{G \times (1 - \eta_{IPV}) \times \epsilon_{des}}{G \times \epsilon_{solar}} = 1 - \frac{(1 - \eta_{IPV}) \times \epsilon_{des}}{\epsilon_{solar}} \quad (11)$$

$$= 1 - \frac{(1 - 0,15) \times \left(1 - \frac{283 \text{ K}}{363 \text{ K}}\right)}{0,56} = 0,66$$

Burada, $0,56 \text{ kW-h}_{ex} / \text{kW-h}_{en}$; $0,8 \text{ kW/m}^2$ düzeyindeki ışınım yoğunluğuna karşılık gelmektedir [5].

$0,95 \text{ kW-h}_{ex} / \text{kW-h}_{en}$ elektrik gücünün birim ekserjisidir.

$$\epsilon_{solar} = \frac{I_n \times 0,95}{TSI} = \frac{0,8 \times 0,95}{1,367} = 0,56 \text{ kW-h}_{ex} / \text{kW-h}_{en} \quad (12)$$



Şekil 5. Yeraltı UAHE Sisteminin (Ekipman) Elektrik Gücü ile Çalışmasının Ekserji Akış Diyagramı

1.2.2 Enerji Tüketim Aşaması (Ekipman: Sera ön soğutması):

Bu aşamada ekserji talepten önce (Yararlı iş: ön soğutma) yıkıldığı işin (k) çarpanı $2,1$ 'dir.

$$\Delta CO_{2_{ek}} = 2,1 \times \left[0,95 \times E - Q_c \times \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \right] = 1,7 \text{ kg CO}_2/\text{kW-h}_{ex} \quad (13)$$

$$\psi_{R_{ek}} = \frac{Q_c \times \varepsilon_{dem}}{E \times 0,95} = 0,29 \quad (14)$$

İki aşamanın toplamı:

$$\sum \Delta CO_2 = \Delta CO_{2_{sistem}} + \Delta CO_{2_{ek}} = (1,65 + 1,75) \text{ kg CO}_2/\text{kW-h}_{ex} \quad (15)$$

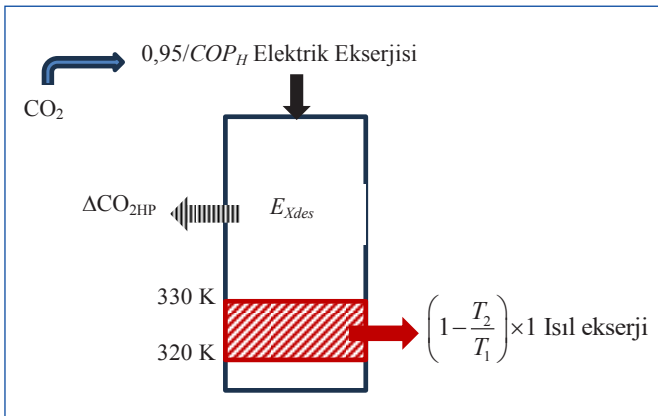
$$\bar{\psi}_R = \psi_{R_{sistem}} \times \psi_{R_{ek}} = 0,19 \quad (16)$$

Görüldüğü üzere bu sera uygulaması güneş enerjisini sadece %19 akılcılıkla kullanmaktadır. Eğer birden fazla sistem ve ekipman varsa:

$$\bar{\psi}_R = \left(\frac{\sum_{i=1}^s \psi_{R_{sistem}} \times S_i \times \varepsilon_{sistem}}{\sum_{i=1}^s S_i \times \varepsilon_{sistem}} \right) \times \left(\frac{\sum_{j=1}^e \psi_{R_{jek}} \times E_j \times \varepsilon_{jek}}{\sum_{j=1}^e E_j \times \varepsilon_{jek}} \right) \quad (17)$$

1.3 Isı Pompası (HP)

Şekil 6 da elektrik gücü ile çalışan bir toprak kaynaklı ısı pompasının ekserji akış diyagramı, birim elektrik gücü ve ısıtma evresi için gösterilmektedir. Isı pompasının ısıtma evresindeki COP_H değeri, tasarım koşullarında 5 olarak verilmiştir. Isı pompası yapıya 330 K (T_1) ve 320 K (T_2) sıcaklık aralığında sıcak su dolaşımı sağlamaktadır. Isı üretimini takip eden ekserji yıkımı dikkate alınmamıştır. Çev-



Şekil 6. Isı Pompasının Ekserji Akış Diyagramı

reci olarak bilinen ve tanıtilan ısı pompalarında bile ΔCO_2 değeri oldukça yüksektir. Bu örnekteki oran iki katıdır. Burada, $0,35$ termik santrallerde ortalama fosil yakıt birim CO_2 salımı ($\text{kg CO}_2/\text{kW-h}_{ex}$), PEF Avrupa ülkeleri ortalama birincil enerji oranıdır ($2,5$). Eğer elektrik gücü, yerinde kurulu PV güneş panellerinden sağlanacak olsa da ΔCO_2 değeri sıfır olmayacaktır (Şekil 4).

$$\Delta CO_2 = 2,1 \times \left[\frac{0,95}{COP_H} - \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \right] = 0,335 \text{ kg CO}_2/\text{kW-h}_{EX} \quad (18)$$

$$CO_2 = 0,35 \times PEF \times \left(\frac{0,95}{5} \right) = 0,167 \text{ kg CO}_2/\text{kW-h}_{EX} \quad (19)$$

$$R = \frac{\Delta CO_2}{CO_2} = \frac{0,335}{0,167} = 2 \quad (20)$$

2. UYGULAMA: TÜMLEŞİK KENT VE TARIM MODELİ

Ekserji tabanlı modelde geliştirilen örnek sistem Şekil 7 de görülmektedir. Şekilde gösterilen örnek bir yavaş kent ve tarım bileşke tasarımı üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar, sırası ile:

1. Yenilenebilir Enerji Sistemleri

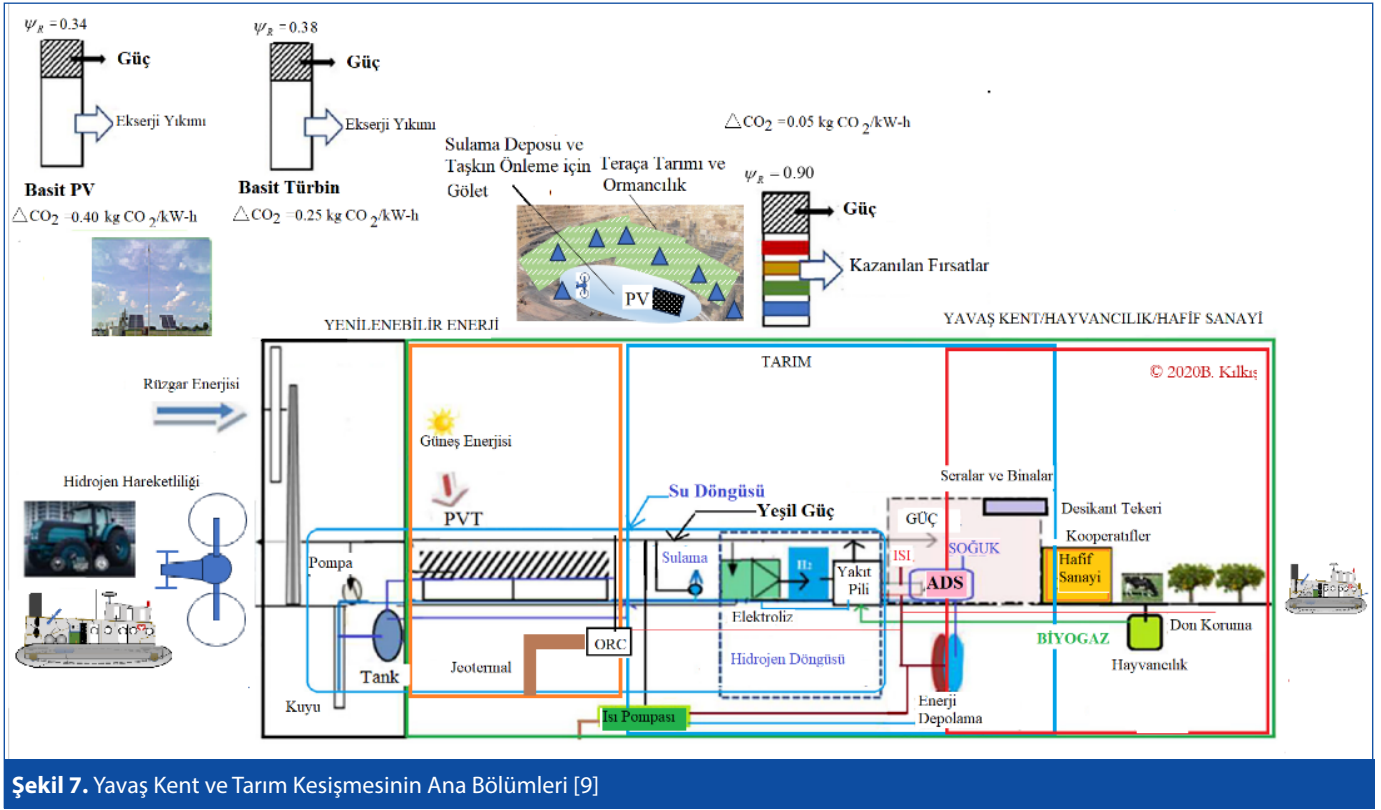
- Yenilikçi rüzgâr türbinleri (Şekil 9)
- Yeni nesil güneş enerjili güç ve ısı panelleri (PVT3) [8]
- Yörede varsa, jeotermal enerjili organik Rankine çevrimli (ORC) ısı ve güç sistemleri
- Sürdürülebilir enerji ile su çekimi ve pompaj
- Sulama deposu ve gölet
- Gölette balıkçılık seracılık, ormancılık

2. Tarımsal Mekanizasyonda Enerji Dönüştürüm ve Depolama Sistemleri

- Kapalı su döngülü hidrojen üretimi ve depolama (Elektroliz)
- Talep denetimli elektrik üretimi (YP: Yakıt Pili)
- Elektrik tahrikli, toprak kaynaklı ısı pompası,
- Adsorpsiyonlu soğutucu (ADS)
- Sıcak ve soğuk depolama

3. Yavaş Kent

- Seralar
- Yaşam binaları ve donatılar
- Hafif sanayi, tarımsal kurutma istasyonları
- Hayvancılık ve biyogaz üretimi
- Meyvecilik ve dondan koruma sistemleri



Şekil 7. Yavaş Kent ve Tarım Kesişmesinin Ana Bölümleri [9]

f. Hidrojen hareketliliği

- i. Traktör ve tarımsal aletler
- ii. Melez (tırtıllı ve hava yastıklı) çok amaçlı araç
- iii. İnsansız hidrojen helikopteri

Şekil 7'de yer alan tüm ana sistemlerin ve süreçlerin ekserji akış diyagramları (Şekil 6'da olduğu gibi) hazırlanarak ψ_R değerleri ve ΔCO_2 salım sorumlulukları hesaplanmıştır.

Şekil 7'de görüldüğü gibi, tarımsal sulama için gerekli su, kuyulardan sağlanmaktadır. Gerekli pompa enerjisi, doğru akım olarak güneş enerjili elektrik-ısı (PVT) panellerinden, yeni tip rüzgâr türbinlerinden ve yörede varsa, jeotermal enerjili ORC sistemlerinden elde edilir. Bu üç sistem de, yalnız elektrik gücü değil, düşük entalpili ($\sim 45^\circ C$) ısı güç de üretirler, diğer bir deyişle tüm yenilenebilir ekipman ve aygıtlar birlikte ısı ve güç (BIG) sistemleridir [10]. Yenilenebilir enerjilerden üretilen elektrik gücünün arta kalanı, Şekil 7'de görülen diğer bölümlerde değerlendirilir. Kuyudan çekilen serin su ile, PVT panellerin arkasından dolandırılarak PVT panellerin elektrik üretim verimlerinin -özellikle sıcak yaz aylarında- azalması önlenir. Sudaki az sıcaklık artışı, sayısal denetimli bir pompa devir sayısı yönetim sistemi ile sulamada fazla bu-

harlaşmaya neden olmayacak şekilde, buna karşılık PVT panellerin yeterince soğutulmasının en uygun işletimi, dış hava koşullarına da bağlı olarak yapay zekâ tabanlı bir mantıkla yapılır. PVT paneller güneş izlemeli olduğu gibi kum fırtınası, dolu gibi durumlarda yanlamasına baş aşağı çevrilebilir birer düzeneğe sahiptir. Ayrıca yükselteli konumdaki bu panellerin altlarında kalan tarıma elverişli alanlara yeterli gölgeleme sağlaması da optimizasyon algoritmasının bir parçasıdır. Yağmur suları bir gölette toplanır. Böylelikle, sel sularının ve taşkınların önlenmesi gerçekleştirildiği gibi gölet balıkçılığı, gölet çevresinde seracılık ve meyve ağacı kültürü yanı sıra, yangın söndürme ve havadan sulama için su rezervi olarak da görev yapar. Bu sistem, açık madencilikte terk edilen ve tarımsal potansiyeli yok edilen yörelerde ekonomik, çevresel ve biyoçeşitlilik iyileştirilmesi için önerilmiştir [11]. Gölet yüzeyinin bir kısmı yüzer PV panellerle değerlendirilerek ek elektrik gücü de üretilebilir. Ayrıca bu gölet veya göletler yavaş kentin bir parçası olarak eğlence ve dinlenme parkı da olabilir. Kapalı bir devrede su hidrolize edilerek hidrojen üretilir ve depolanır. İsteğe bağlı olarak yakıt pillerinde yeniden elektrik enerjisi ve ısı üretilir. Oluşan su tekrar elektrolize edilir. Su kayıpları kuyulardan karşılanır. Isıtma ve soğutma amaçlı ısı pompaları kullanılabilir de bunla-

rın COP değerlerinin ısıtmada 8, soğutmada 10 olmasına dikkat edilir [12]. Soğutma arzı, atık ısılarla çalıştırılan adsorpsiyonlu cihazlarla (ADS) sağlanır. Hayvancılıktan elde edilen ve tarım atıkları biyogaz tesisinde değerlendirilir. Gerekli ısı, atık ısılardan karşılanır. Meyve ve sebze alanlarında don ve benzeri aşırı soğuklarda ışınımsal ısıtma ve kök ısıtması yapılır.

Seracılıkta ise toprak ısısından yararlanılacak labirent tipi sistemlerde (EAHE) kullanılan fan güçlerinin (P_F) elde edilen ısı güçten ekserji tabanında oldukça az olması gerekir (Şekil 8). Bu koşul sağlanmadığında, tüketilen elektrik enerjisine ilişkin ΔCO_2 ve santral ΔCO_2 salımlarına ek olarak serada da $\Delta CO_{2\text{sera}}$ salım sorumluluğu ortaya çıkar. Eğer Eşitlik 21'deki ifade eksi ise, ki bu tercih edilir, o zaman sera ön ısıtmasında karbon azaltımı sağlanabilir. Ancak elektrik gücünün de nereden sağlandığına bakılmalıdır. Gerekli fan gücü yerinde yerleşik PV panellerle temin edilse bile $\Delta CO_{2\text{PV}}$ terimi vardır (Şekil 4) ve net toplam salım sorumluluğunu incelemek gerekir. Bu ekserji tabanlı kısıtlara genelde uyulmamaktadır [13].

Ön Isıtmada:

$$P_F \ll \frac{0,95 \times Q_H}{\left(1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}\right)} = \frac{0,95 \times \dot{m} C_p (T_{in} - T_{out})}{\left(1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}\right)} \quad (21)$$

$$\Delta CO_{2\text{sera}} = 2,1 \times \left[0,95 \times P_F - \dot{m} C_p (T_{in} - T_{out}) \times \left(1 - \frac{T_{in}}{T_{out}}\right) \right] \quad (22)$$

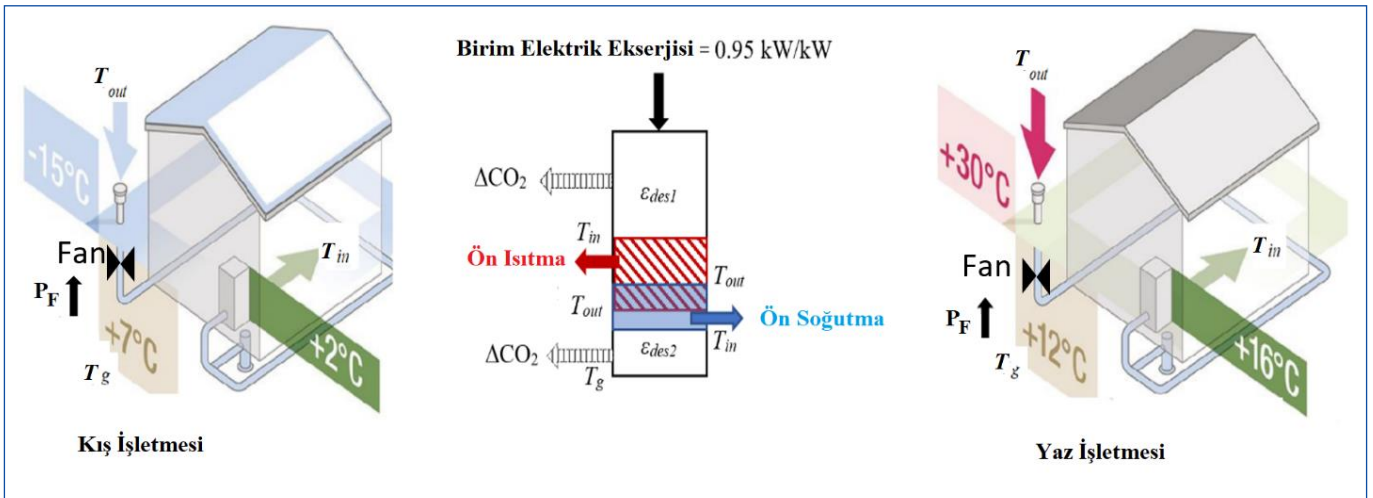
Ön Soğutmada:

$$P_F \ll \frac{0,95 \times Q_C}{\left(1 - \frac{T_{in}}{T_{out}}\right)} = \frac{0,95 \times \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{\left(1 - \frac{T_{in}}{T_{out}}\right)} \quad (23)$$

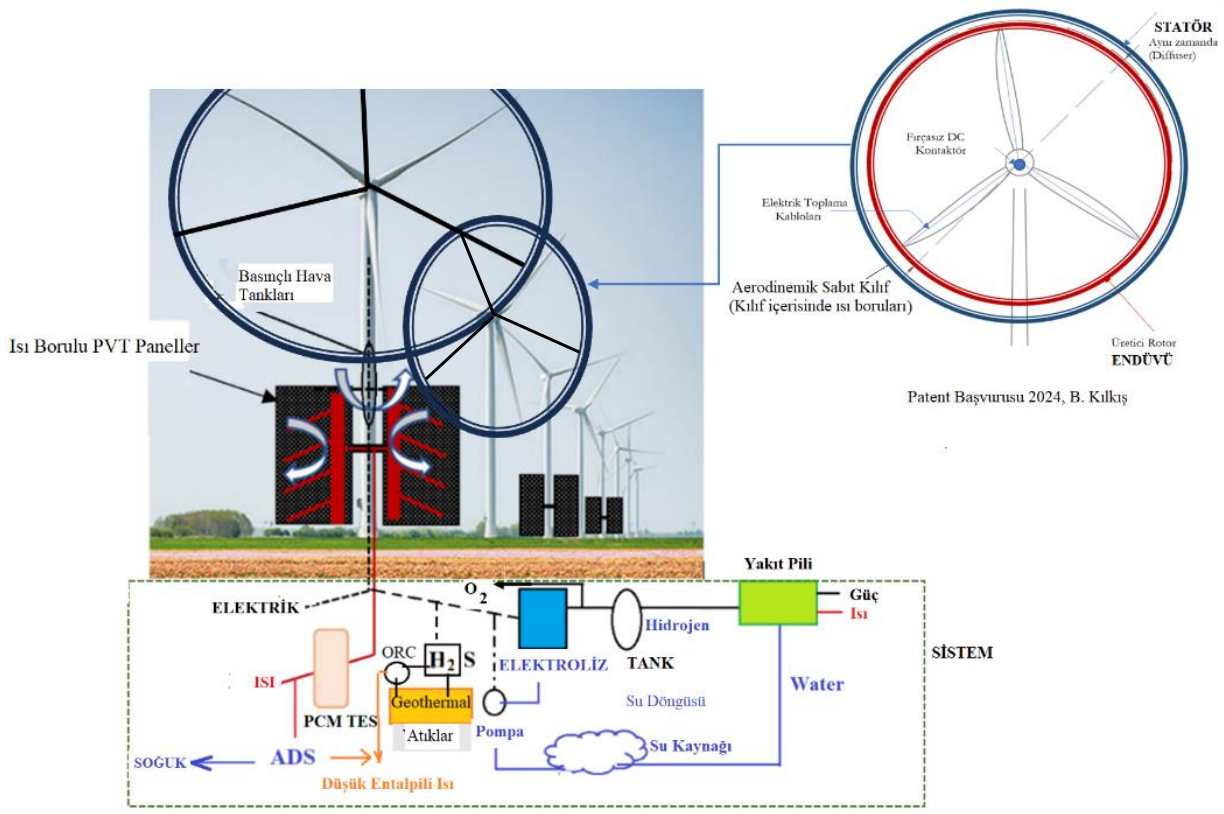
$$\Delta CO_{2\text{sera}} = 2,1 \times \left[0,95 \times P_F - \dot{m} C_p (T_{in} - T_{out}) \times \left(1 - \frac{T_{in}}{T_{out}}\right) \right] \quad (24)$$

Şekil 9'da yeni tür bir rüzgâr türbini görülmektedir. Bu türbinin ayrıcalığı, türbin mil çıktısını elektrik gücüne dönüştüren merkezi bir nacel (motor bölümü) olmayışıdır. Türbinin kendisi büyük bir elektrik jeneratörüdür. Bu amaçla türbin kanatlarının ucuna bakır sarılı ve endüvü görevi gören bir çember yerleştirilmiştir ve türbin kanatları ile birlikte döner. Bunun dışında, türbin direğine sabitlenmiş, aerodinamik geometrisi olan bir kılıf vardır ve statör görevini üstlenir. Bu kılıf ayrıca rüzgâr akışını düzenler. Kılıf içerisindeki ısı boruları, ortaya çıkan ısının toplanıp değerlendirilmesini sağlar. Dolayısı ile bu türbin, birlikte ısı ve güç sistemidir. Genelde boş duran türbin direklerinin türbin kanatçık uçlarından serbest kalan bölümleri, güneş izlemeli PVT sistemleri ile donatılır. Dolayısı ile tarım arazisi kullanılmamış olur. Türbin altlarında, yer altındaki bölmelere ise Şekil 7'de görülen diğer sistemler de yerleştirilebilir.

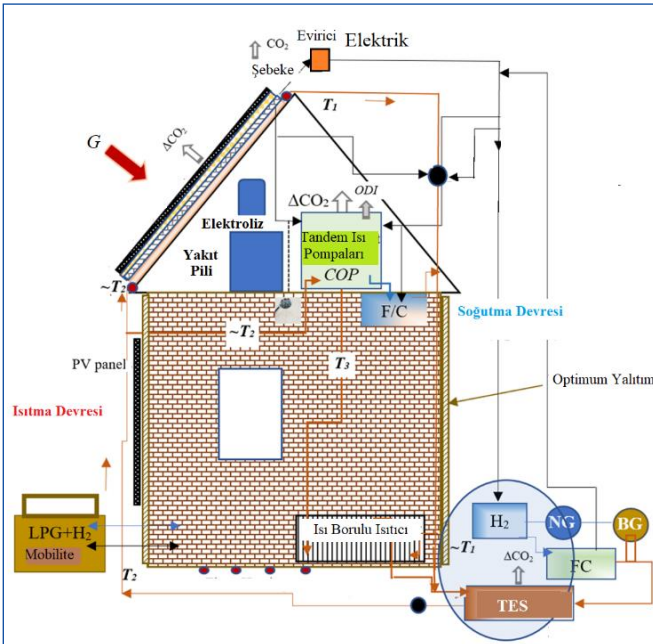
Şekil 10'da, hidrojen enerjisi tabanlı bir yapı görülmektedir. Bu yapılanma, hem tarımsal alandaki yapı ve donatılar, hem de yavaş kentte kullanılır. Yavaş kentte hidrojen boru hattı bulunmaktadır. Eğer doğal gaz hattı varsa, ge-



Şekil 8. Sera Ön Isıtması ve Ön Soğutmasında Labirent Tipi Toprak Kaynaklı Isı Eşanjörünün Fan Güçlerindeki Ekserji Kısıtları [8, 14]

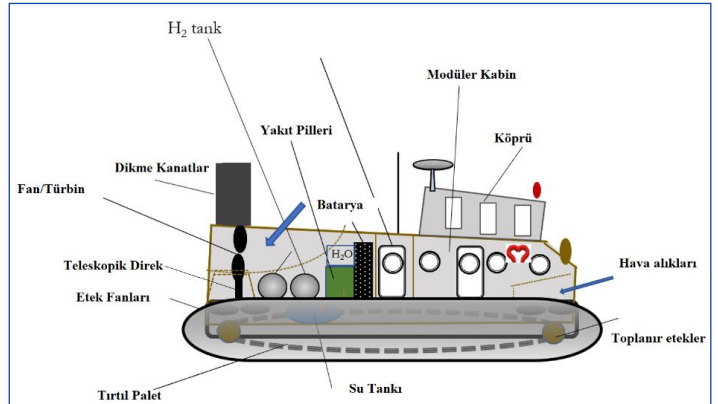


Şekil 9. Yeni Tür Rüzgâr Türbini ve PVT bileşimi. TPE başvuru no: 2023/018569



Şekil 10. Yavaş Kent ve Tarımsal Alan Donatılarında Hidrojen. ©2019 Birol Kılış

rekli iyileştirmelerden sonra aynen kullanılır ve hidrojen gazı en fazla %20 oranında karıştırılır.

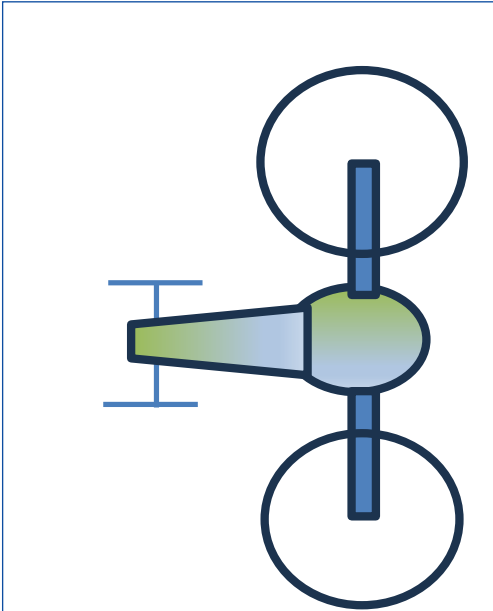


Şekil 11. Çok Görevli Hidrojen Taşıtı Rüçhan no: 2022/013909

Hidrojen Enerjili Taşıtlar: Şekil 11'de gösterilen bu özel tasarımı hidrojen enerjili taşıtın, hava yastıklı araç ve tırtıllı araç özellikleri bir aradadır. Bu aracın çoklu görevi olup, ana bölme modüler türde takılıp çıkarılabilir ve her göreve uygun bölme yerleştirilir. Görevleri arasında, tarla sürme, ilaçlama, gübreleme, kurakta sulama, taşımacılık, ambulans, yönetim ve güvenlik olabilir. Araçla güneş ve rüzgâr enerjisi hasadı yapılabilir. Hareket halinde iken yönlendirme görevi üslenen kanatlar, taşıtın durağan

konumunda teleskopik direkte yükselerek bu kez rüzgâr türbini olarak görev yapar. Uygun yüzeylerde PV veya PVT paneller bulunur. Hidrojen depo kaseti kolayca çıkarılabilir ve yakıt pilinin ısı ve su çıktısı da depolanır.

Ayrıca kentsel ve tarımsal bileşkedeki değişik görevler için insansız bir helikopter de tasarlanmıştır. Helikopter bu yazıda yer alan modeldeki hidrojen hareketliliğinin bir parçası olup, yangın gözetleme/önleme/söndürme ve zirai ilaçlama/sulama (kurak zamanlarda)/keşif, güvenlik, ambulans, havadan izleme, tohumlama ve benzeri işlevlere sahip olacaktır. Hidrojen gazı, yerdeki hidrojen üretimi bölümünden güvenli, kaset tipi depolarla helikoptere yüklenecektir. Yangın söndürme görevinde Şekil 7'de gösterilen göletlerden de su çekebilecek veya göletlere su taşıyabilecektir. Söndürme ve sulama görevinde helikoptere yüklü hidrojen kasetini kullanarak yakıt pilinde ürettiği elektrikle rotorları harekete geçirmektedir. Elektrik gücünü üretirken ortaya çıkan su atılmamakta, söndürme ve sulama amaçlı kullanılarak helikopterin su taşıma kapasitesini artırmaktadır. Bu tasarımla kent ve tarım bileşkesinde öngörülen hidrojen zinciri de tamamlanmaktadır.



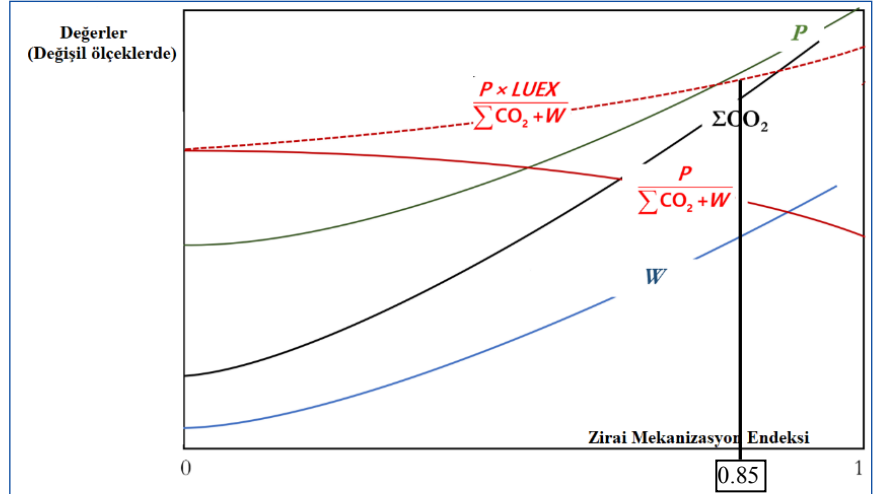
Şekil 12. Çok Görevli, İnsansız, Hidrojen Yakıtlı Helikopter. ©2019 Birol Kılıç

bir ölçüt de hektar başına traktör sayısıdır [15]. Bu ölçüt, traktörlerin ne ile çalıştığı, hangi amaçlarla kullanıldığı, ne kadarının işler olduğu (şu anda traktörlerin en az yüzde yirmi kadarının işlevsiz olduğu belirtilmektedir), yılda ne kadar kullanıldığı, verimlerinin ne olduğu, çevreye olan zararları, tarım ve hayvancılıkta su gideri ile olan ilişkisi gibi birçok değişkenden uzak bir basit değerlendirmeden oluşur. Bu çalışmada Eşitlik 25'de verilen anlatım geliştirilmiştir.

$$MF = \frac{P \times LUEX}{\sum CO_2 + W(CO_2)} \{maksimum\} \quad (25)$$

Bu eşitlik, hektar başına ürün eldesini (P), arazi kullanım akılcılığını ($LUEX$), ürün eldesinde sorumlu olunan salım ve suyun salım eşleniğini kapsamaktadır. Bu değişkenler zirai mekanizasyon ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 13'te gösterildiği gibi, $LUEX$ [16] göz önünde tutulmadığında MF zirai mekanizasyon endeksi ile azalmakta olup arzu edilmez. Bu nedenle, $LUEX$ değerinin de önemli bir değişken olduğu görülmekte olup, zirai mekanizasyonun çevresel etkileşimi de doğrudan ve tümsel biçimde dikkate alınmış olmaktadır. Bu değerler zirai mekanizasyon endeksi ile ilişkilidir.

Örneğin, Şekil 7'de gösterilen örnek tasarım için zirai mekanizasyon endeksinin 0,85 olduğu durumda:



Şekil 13. Yeni Zirai Mekanizasyon Katsayısı, MF'nin Mevcut Endeksi ile Kırılımlı Farkı

3. EKSERJİ TABANLI ZİRAİ MEKANİZASYON ÖLÇÜTÜ

Bu çalışmada, var olan zirai mekanizasyon ölçütlerinin yetersiz ve çevre duyarlı olmadığı görülmüştür [7]. Örneğin

$P = 4$ ton/hektar (Pamuk), $LUEX = 0,9$, $CO_2 = 0$, $\Delta CO_2 = 0,05$, $W = 0,001$

$MF = 70,6$ ton ürün/(hektar·kg CO_2 /kW-h).

Buğday için (0,7 ton/hektar)

$MF = 12,3$ ton ürün/(hektar.kg CO₂/kW-h).

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu yazı her ne kadar yavaş kent-yeşil tarım bileşkesine odaklansa da geliştirilen model, sürdürülebilirlik konusunda tüm yapıları çevreye ve küresel ısınmaya karşı önemli ipuçları vermektedir. Bu bağlamda, neredeyse önlenemez ΔCO_2 (ekserji yıkımlarından ötürü) salımların önemi vurgulanmaktadır. Bu salım sorumluluğu şu anda göz önünde tutulmamaktadır. Eşitlik 26 ve 27'de atmosferde ölçülen toplam ΔCO_2 derişikliğinin (ppm) termodinamiğin birinci yasası çerçevesinde ölçülebilen ve hesaplanabilen doğrudan CO₂ salımlarının REMM verimi, ψ_R 'a göre değişimi izlenebilmektedir. Günümüzde bu oran, Dünya ortalaması olarak 0,2 dolayında olduğundan ($\Delta CO_2/CO_2$) oranı 3,7 değerindedir. Bunun anlamı ise, her ne kadar atmosferde toplam CO₂ salımı ölçülüyorsa da bu miktarın yer yüzünde yapıları çevredeki ana nedenlerinin yaklaşık 2,7 katının (3,7-1) fark edilmediği, kaynağında ölçülemediği veya dikkate alınmadığının ortaya çıkmasıdır.

$$\frac{\sum CO_2}{CO_2} = (2 - \psi_R) + 0.95 \times PEF \times (1 - \psi_R) = [(2 + 0.95 \times PEF) - \psi_R \times (1 + 0.95 \times PEF)] \quad (26)$$

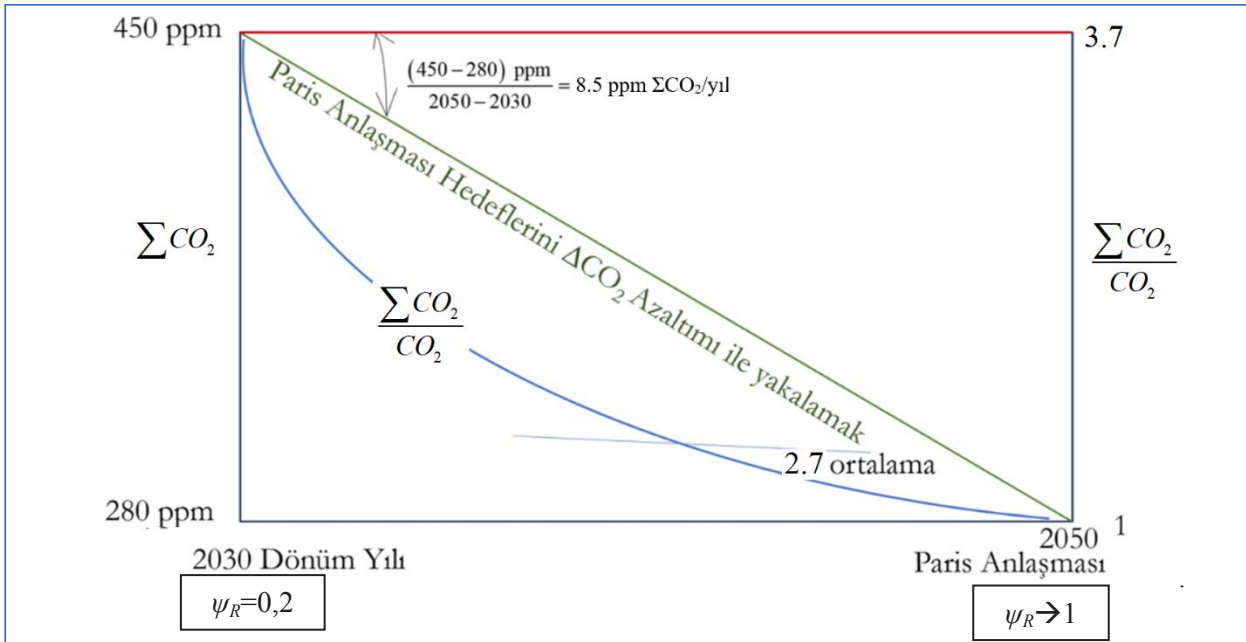
$$\frac{\sum CO_2}{CO_2} = [4.375 - 3.375 \times \psi_R] \quad \{PEF = 2,5, AB \text{ Ortalaması}\} \quad (27)$$

Şekil 14'de görüldüğü üzere 2050 yılında 280 ppm değerine inilecek ise ve bu iniş, yıllara yayılarak doğrusal kabul edilirse, her yıl 8,5 ppm azaltım gerekecektir. ΔCO_2 salımının CO₂ salımına oranı, 2,7 olduğuna göre, her yıl yapılacak klasik karbonsuzlaşma girişimleri, yatırımları ve önlemlerine oranla en az altı katının ek olarak ΔCO_2 salımlarının azaltılmasına yönlendirilmesi gerekmektedir:

$$(8,5 \times 2,7) / (2,7 + 1) = 6,3.$$

Günümüzde ΔCO_2 farkındalığı hiç yoktur ve dolayısı ile bu önlemlerin alınmaması sürdürülürse, Paris Anlaşması hedeflerine ulaşılamaz. Bunun da ötesinde, Şekil 14'te kestirildiği üzere, günümüzdeki $\psi_R=0,2$ değerinden, bir değerine yaklaşılmayacak ise, çözüm çok daha zorlaşacaktır. Şekil 15 ve 16'da bu koşulun önemi, değişik enerji kaynaklarının birim ekserjileri ve ekserji yıkımlarının sıralamasının ve azaltılmasının çözüm odaklı etkileri görülmektedir. Bu şekiller uyarınca:

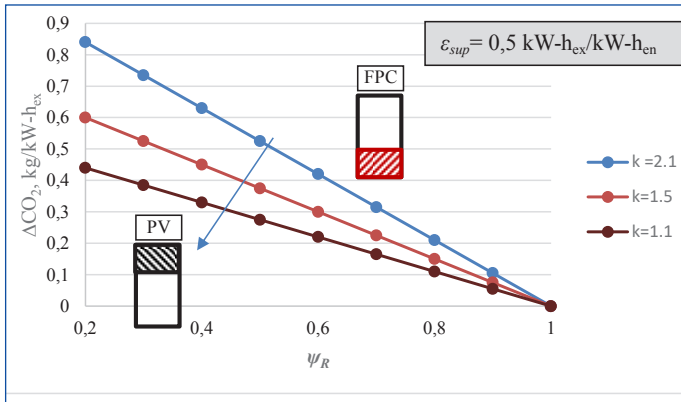
- ψ_R değeri olduğunca ve öncelikli olarak arttırılmalıdır.
- Ekserji yıkımlarının azaltılmasının yanı sıra (k) değerinin azaltılmasına yönelik ekserji yıkımlarının, yararlı işlerin eldesinden sonra bırakılması uygun olacaktır
- Fosil yakıtlardan uzaklaşılması her ne kadar gündemde ise de, bunun çok daha hızlı gerçekleştirilmesi gerekmektedir. COP29 sonuç bildirgesi, bu denli bir hızlı geçişi petrol üreten ülkelerin tam giderilemeyen basıkları sonucu sağlamamaktadır.



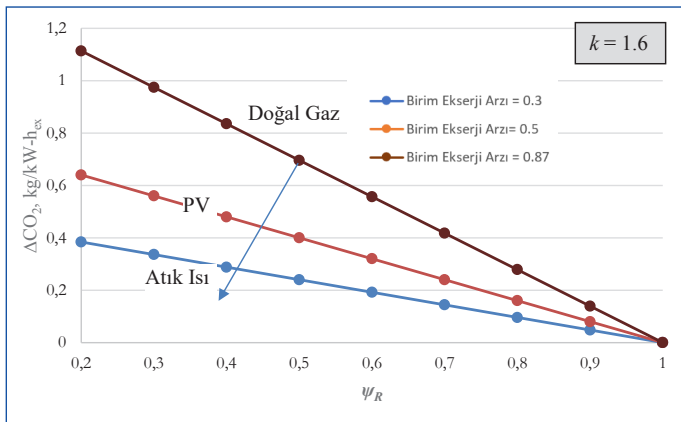
Şekil 14. Paris Anlaşmasına Yönelik Önlemlerin Farkındalığı

d. Atık ısıların ve diğer atık enerji kaynaklarının değerlendirilmesine büyük önem verilmelidir. Birim ekserji arzı azaldıkça ΔCO_2 azalmaktadır.

Gelişmiş ülkeler petrol yerine nükleer santrallere yönelmeye başlasalar da, bunun da yeterli ve çevreci bir yaklaşım olmadığı gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, termodinamiğin ikinci yasası yeterince değerlendirilmeyip ΔCO_2 salımlarının temel sorunlarına çözüm getirilmeden, nükleer enerjiye hatta yenilenebilir enerjiye geçiş olsa bile, istenen ve gereken sonuç alınamayacaktır. Çünkü, bu yazıda gösterildiği gibi, güneş enerjisi ile elektrik üretiminde bile ΔCO_2 salımının var olduğu unutulmamalıdır. Hedef, ekserji yıkımlarını gerçekleştirilemeyeceği bilinmesine karşın sıfırlamaya çalışmak değil, doğanın yeniden denetimi ele alıp, karbonsuzlaşmanın gerçekleştirilmesine olanak sağlamak üzere en aza indirmek, kısacası enerjinin niceliği kadar, niteliğinin de akılcı kullanılması olmalıdır.



Şekil 15. ΔCO_2 Salım Sorumluluğunun Ekserji Yıkımlarının Sıralaması ile Değişimi



Şekil 16. ΔCO_2 Salım Sorumluluğunun Enerji Kaynağı ile Değişimi

5. SEMBOLLER

c_K	Yakıtın birim karbon dioksit salımı (kg CO_2 /kW-hen)
C_p	Özgül ısı, kW-h _{ex} /(kg·K)
CO_2	Kaynağındaki doğrudan (ölçülebilir) karbon dioksit salımı, kg/h
COP	Isıtma (veya soğutma) etki katsayısı (ısı pompası)
E	Enerji (Elektrik), kW-h _{en}
E_x	Ekserji, kW-h _{ex}
G	Toplaca ulaşan güneş ışınım gücü, kW
I_n	Güneş enerjisi ışınım yoğunluğu, kW/m ²
k	Ekserji yıkımı- ΔCO_2 ilişkisinin çarpanı, kg CO_2 ·kW-h _{ex} /(h·kW-h _{en}) (Eşitlik 7)
LUEX	Ekserji tabanlı arazi kullanım etkinliği
MF	Zirai mekanizasyon katsayısı, kg CO_2 /ton ürün
\dot{m}	Debi, kg/h
ODI	Ozon katmanı seyreltim katsayısı (Isı pompası için)
P	Tarımsal üretim yoğunluğu, ton ürün/dekar
P_F	Fan gücü, kW _{en}
PEF	Birincil enerji çarpanı
Q	Isıl güç, kW
R	$\Delta\text{CO}_2/\text{CO}_2$
T	Sıcaklık, K
T_f	Adiyabatik alev (Kaynak) sıcaklığı, K
T_f^*	Sanal kaynak sıcaklığı, K
T_{ref}	Çevre referans sıcaklığı, K
TSI	Toplam güneş ışınım katsayısı (Total Solar Irradiation), 1,367 kW/m ²
W	Su tüketimi (CO ₂ eşleniği olarak), kg CO_2 /ton ürün
ε	Birim ekserji, kW-h _{ex} /kW-h _{en}
η_1	Birinci yasa verimi
ψ_R	Akılcı ekserji yönetim verimi
ΔCO_2	Ekserji yıkımlarının neden olduğu neredeyse-ön-lenebilir karbon dioksit salım sorumluluğu, kg CO_2 /h
CO_2	Toplam karbon dioksit salımı kg CO_2 /h
Alt simgeler	
a	Hava
B	Biyogaz
c	Soğutma

dem	Talep
des	Ekserji yıkımı
eq	Ekipman, cihaz
g	Toprak
H	Isı
in	Giriş
o	Dış ortam
out	Çıkış
PV	Foto-voltaik göze
r	Dönüş
sup	Arz
solar	Güneş
WT	Rüzgâr türbini

Kısaltmalar

ADS	Adsorpsiyonlu soğutma cihazı
ASHP	Hava kaynaklı ısı pompası
BAU	Her zamanki senaryo
CCS	Karbon dioksit tutumu ve saklama
E	Egzoz veya bir süreci terk (Sıcaklığı)
EAHE	Toprakta havalı ısı değiştirici labirent
F/C	Fan-coil
FC	Yakıt Pili
FPC	Düzlemsel güneş toplacı
GHG	Sera gazı
HP	Isı Pompası
LPG	Liquidified Petroleum Gas
ORC	Organik Rankine Çevrimi
REMM	Akılcı Ekserji Yönetim Modeli
PCM	Faz Değişimli Malzeme
PV	Foto-voltaik göze
PVT	Elektrik-ısı üretici güneş gözesi
PVT3	Üçüncü-Nesil PVT
TES	Isı depolama
μCHP	Mikro birlikte ısı ve güç
YP	Yakıt Pili

KAYNAKÇA

1. **Kilkis, B.** 2023. Is it `Climate Change` or `Global Warming`?, IEEEES-14 Conference, Invited Presentation, Piri Reis University, 26 December 2023, Gebze, Istanbul.
2. C2ES. 2023. Global Carbon Dioxide Emissions 1850-2040, Center for Climate and Energy Solutions. <<https://www.c2es.org/content/international-emissions/>> Son görüntüleme: 30.12.2023
3. Climate Watch, 2023. Agriculture <<https://www.climatewatchdata.org/sectors/agriculture#drivers-of-emissions>> Son görüntüleme: 30.12.2023
4. de Zeeuw, H., and Pay Drechse, P. (Editors). 2015. Cities and Agriculture, Earthscan. <<https://ruaf.org/assets/2019/11/Cities-and-Agriculture.pdf>> Son görüntüleme: 30.12.2023
5. **Kilkis, Ş.** 2014. Energy System Analysis of a Pilot Net-Zero Exergy District, Energy Conversion and Management. <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.014>> Son görüntüleme: 30.12.2023
6. **Kilkis, B. Ş.** 2023. Decarbonization-101: Exergy-Based Measures, Metrics, and Terminology, 2023 Decarbonization Conference for the Built Environment, ASHRAE, Washington DC, October 25-27.
7. **Kilkis, B.** 2024. Exergy-Based Slow-City/Agriculture Mechanization with Circular Hydrogen and Renewable Energy Systems, E. Cavallo et al. (Eds.): ANKAgEng 2023, LNCE 458, pp. 1–14, 2024. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51579-8_12>
8. **Kilkis B.** 2022. Exergy-Rational Utilization of Solar Energy with Advanced PVT Systems and Heat Pipe Technology In 100% Renewable Cities, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1085: 12029, DOI: 10.1088/1755-1315/1085/1/012029.
9. **Kilkis, B.** 2022. Green Hydrogen: The Common Thread of the Belt and Road Initiative, Belt & Road Initiative Quarterly (BRIQ), 3(3), 6-20.
10. **Kilkis, B., Kilkis, Ş.** 2015. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Birleşik Isı ve Güç Üretimi, TTMD Yayın No: 32, 371 s., ISBN 978-975-6263-25-9
11. **Kilkis, B.** 2023. Termik Santraller, Çevre ve Tarım, Termodinamik, Ekim 2023, Sayı 374, s: 42-44
12. **Kilkis, B.** 2023. Exergy-Optimum Coupling of Radiant Panels with Heat Pumps for Minimum CO₂ Emission Responsibility, Energy Conversion and Management-X, 20, 2023 100439.
13. **Yıldız, A., Özgener, Ö., Özgener, L.** 2014. "Bir Sera İklimlendirmesi İçin Fotovoltaik Destekli Toprak Hava Isı Değiştirgeci Uygulaması," Mühendis ve Makina, cilt 55, sayı 650, s. 38-46. <http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/cb44ede-9f96acb4_ek.pdf?dergi=1421> Son görüntüleme: 30.12.2023
14. **Kilkis B.** 2022. Lessons Learned from Labyrinth Type of Air Pre-conditioning in Exergy-Aware Solar Greenhouses, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 10(4): 1100434, DOI: 10.13044/j.sdwes.d10.0434
15. **Akdemir, B.** 2013. Agricultural Mechanization in Turkey, 2013 International Conference on Agriculture and Natural Resources Engineering, IERI Procedia 5 (2013) 41- 44.
16. **Kilkis, B.** 2022. Optimum Urban Land-Use Model for Minimum CO₂ Responsibility Under Energy and Exergy-Based Constraints, 5th SEE SDEWES Conference, May 22-26, Vlore Albania.