

# SIFIR EMİSYONLU KOJENERASYON TESİSLERİNİN MEVCUT KOJENERASYON TESİSLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

**Rabi KARAALİ,**  
Öğr. Gör., Kocaeli Üniversitesi,  
Gölcük MYO. Gölcük- Kocaeli

**Prof. Dr., İlhan Tekin ÖZTÜRK\***  
Kocaeli Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Veziroğlu Kampüsü 41300 Kocaeli  
ilhan@kou.edu.tr

## ÖZET

Dünya elektrik ihtiyacının %40 civarı kömürden %20'si diğer fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Küresel ısınmanın %55 civarındaki baş sorumlusu olan CO<sub>2</sub> emisyonlarında, fosil kaynakların kullanımı önemli bir paya sahiptir. İklim değişikliklerinin önlenmesi veya mevcut durumu ile korunabilmesi için CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması veya belirli bir seviyede tutulması zorunludur. Bu yüzden en fazla CO<sub>2</sub> üreten güç üretim tesislerinin CO<sub>2</sub> emisyon teknolojisi tekrar gözden geçirilmeli ve minimum CO<sub>2</sub> salınımı üreten sistemlerin en kısa sürede faaliyete geçirilmesi gerekmektedir. CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesinde kullanılan en önemli çevrimler ve teknolojiler ile mevcut kojenerasyon tesislerinin termodinamiğin birinci kanununa göre analizi yapılmıştır. Sıfır emisyonlu çevrimlerden uygulanabilir olan oksifuel ve su çevrimleri ile örnek ve hava ısıtmalı kojenerasyon çevrimleri ele alınarak elektrik ve ısı güçleri karşılaştırılmıştır. Oksifuel ve su çevrimlerinin sıvılaştırılacak CO<sub>2</sub>'nin sıkıştırılması için (%5-6) ve havadan oksijenin ayrıştırılması içinde (%2-3) kompresör işi için ilave güç harcanmasından dolayı birinci kanun verimleri, örnek ve hava ısıtmalı kojenerasyon çevrimlerinden %8 daha düşük elde edilmiştir. Termodinamik analiz için Fortran programlama dilinde program yazılmış ve çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve uygunluğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kojenerasyon, sıfır emisyon, güç çevrimleri

## A Comparison of Zero Emissions' Cogeneration Plants and Present Cogeneration Plants

### ABSTRACT

Today coal and other fossil fuels share 40% and 20% of the world's total electricity respectively. Fossil fuels playing an important role on CO<sub>2</sub> emissions which has the greatest negative effect on greenhouse, causing 55% of the global warming. To stop negative effect on greenhouse CO<sub>2</sub> emissions should be decreased. For that reason the CO<sub>2</sub> emission technology of the power plants is necessary to be developed and replaced by a zero emission technology. Zero and near zero emissions power plant technologies and their cycles, and important cogeneration cycles are analyzed by the first law of the thermodynamic. Oxyfuel and water cycles' heat and electrical powers compared with sample and recuperated cycles. First law of the thermodynamic efficiency of the oxyfuel and water cycles are found less 8% than sample and recuperated cycles because of air separated unit work to separate oxygen (2-3%) and compressing work of CO<sub>2</sub> (5-6%). For the thermodynamic analyze a computer program which its' FORTRAN codes are written by us. The results of this study are also compared with the literature and found that appropriate.

**Keywords :** Cogeneration, optimization, thermo economy, zero emission, power cycles.

\*\* İletişim yazarı

\* Bu makale 9-11 Nisan 2009 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası'nda düzenlenen II. Enerji Verimliliği Kongresi'nde bildiri olarak sunulmuştur

## GİRİŞ

**K**yoto protokolünde birçok ülke 1990'daki gaz emisyon seviyesinin %5 altına inme (2008-2012 için) taahhüdünde bulunmuştur. Bunun için izlenecek stratejinin önemli bir kısmı olarak maliyet etkili CO<sub>2</sub> azalımı için karbon vergisi (50Euro/ton CO<sub>2</sub> civarında) koymuşlardır[12]. Bu yüzden CO<sub>2</sub>'nin egzoz gazlarından ayrıştırılarak bertaraf edilmesi giderek önem kazanmakta ve üzerinde daha fazla çalışılmaktadır. CO<sub>2</sub> vergileri ya da CO<sub>2</sub> ayrıştırma maliyetleri üretilen elektriğin maliyetini artırmakta olduğundan, enerjinin en verimli kullanıldığı kojenerasyon tesislerinin sadece klasik termoeconomik değil, aynı zamanda çevre maliyetinin de hesaba katıldığı termoeconomik (çevresel termoeconomik) analizlerinin de yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Dünya'da mevcut sıfır emisyonlu kojenerasyon tesisinin olmaması ve sadece çoğu tasarım ve geliştirilme aşamasındaki güç tesisleri söz konusu olduğundan, burada mevcut kojenerasyon tesisleri ile sıfır emisyonlu kojenerasyon tesisine dönüştürülebilir sıfır emisyonlu güç tesislerinin analizi termodinamiğin birinci kanununa göre yapılacak ve karşılaştırılacaktır. Burada doğal gazlı kojenerasyon sistemleri incelendiğinden ve doğal gazın sülfür içermediği (ihmal edilecek miktarda) kabul edildiğinden SO<sub>x</sub> oluşumu ve bertaraf edilmesi incelenmeyecektir. Ayrıca NO<sub>x</sub> oluşumu da yanma odasının uygun geometride olduğu ve NO<sub>x</sub> oluşmayacak sıcaklıklarda çalışıldığı kabul edildiğinden NO<sub>x</sub> oluşumu ve bertaraf edilmesi incelenmeyecektir.

Sıfır emisyonlu güç tesislerinde CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesi için geliştirilmiş yöntemler üç grupta toplanabilir.

**a) CO<sub>2</sub>'yi sıvılaştırarak depolama yoluyla bertaraf eden çevrimler:** Hâlen dünyada CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesi için en yaygın düşünülen yöntemdir. CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılarak bertaraf edilmesini kullanan çevrimler, oksifuel kombine, su, Graz, gelişmiş sıfır emisyonlu (AZEP), gaz türbinli katı oksitli yakıt hücreleri (SOFC), kimyasal bağlı yanma (CLC), oto termal reformer (ATR), kimyasal absorpsiyonlu sistem (Amine absorpsiyonlu sistem) (AMİNE), iyon membran, absorpsiyonlu soğutma çevrimleri şeklinde sayılabilir. Ayrıştırma sonucu CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılarak depolanacağı yere borularla taşınması gerektiğinden taşıma maliyetini, (ne kadar boru düşeneceği, nereye depolanacağı gibi) her durum kendine özgü olduğundan, hesaplayacak bir genel hesap ortaya koymak zordur. CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılması verimi % 3-5 civarında (bazı durumlarda %10'un üzerinde) düşürmekte ve kuruluş maliyetini %75 civarında ya da daha fazla artırmaktadır. CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılarak bertaraf edilmesini kullanan çevrimler ayrıntılı olarak incelenmiştir.

**b) CO<sub>2</sub>'nin kimyasal reaksiyonla başka madde ile zararsız bileşik oluşturan çevrimler:** Bu yöntem en çok CO<sub>2</sub>'nin bir metal oksitle birleştirilerek zararsız bir karbonata (CaCO<sub>3</sub>

veya MgCO<sub>3</sub> gibi) dönüştürülerek doğada depolanması ile CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesi şeklinde düşünülmüş bir yöntemdir.

**c) CO<sub>2</sub>'yi tekrar yakıtla dönüştürüp kullanan çevrimler:** Bu yöntemle ilgili birçok çalışma ve araştırma yapılmış; ancak karbon formasyonu problemi ve reaksiyonun güçlü bir endotermik reaksiyon olması dolayısıyla endüstride büyük ölçüde ticari uygulama alanı bulamamıştır. Ancak yapılan son çalışmalarda soy metal kullanılarak yapılan ya da sülfürlenmiş nikel katalizörler karbon formasyonu problemini çözmüştür. Bu yöntemde CO<sub>2</sub>'nin yakıtla dönüştürülme prosesinin verimi söz konusu olduğundan CO<sub>2</sub>'nin hepsi yakıtla dönüştürülememektedir. CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesi için uygulanabilecek iki çeşit biyolojik yöntem mevcuttur.

**i) Orman:** 500 MW gücündeki bir güç tesisinin elli yıldan fazla bir süre için orman ile ürettiği CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesi için sıcak iklim koşullarında 4000-5000 km<sup>2</sup>, soğuk iklim koşullarında ise 7000-10.000 km<sup>2</sup> lik bir alana ihtiyaç vardır. Bu alanın ormana dönüştürülmesi ve bakımı elektrik fiyatlarında 1.4-1.9 US\$/kWh bir maliyet artışına sebep olacaktır[6].

**ii) Biyokimyasal proses:** Bu proses ile CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesi için yüksek konsantrasyonlu CO<sub>2</sub> içeren egzoz gazlarına dayanıklı, CO<sub>2</sub>'yi kullanan ve bu ortamda hızla büyüyen ancak NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub>'ye dayanabilen mikro algler gibi bitkilerin kullanılması söz konusudur. Açık havuzlarda ya da kapalı bio-reaktörlerde büyüeyen mikro algler için güneş enerjisi ve iklim büyüme ve gelişmelerinde dolayısıyla CO<sub>2</sub>'yi bertaraf etmelerinde önemli rol oynar ve bunun yanında da önemli miktarda suya da ihtiyaç vardır. Çıkacak atık suyun çevreye zarar vermeden tahliyesi de çözülmesi gereken bir sorundur[9]. Bu bitkilerden daha sonra biyomas elde edilip hidrojen metan veya etanol üretimi gibi süreçlerde kullanılabilirler. 500 MW gücündeki bir güç tesisinin ürettiği CO<sub>2</sub>'nin bertaraf edilmesi için gereken göl veya havuz alanı 45-89 km<sup>2</sup> arasında olup 70-100 US\$/tCO<sub>2</sub> ve bu da elektrik fiyatlarını 1.7-2.3 US\$/kWh arttıracaktır[6].

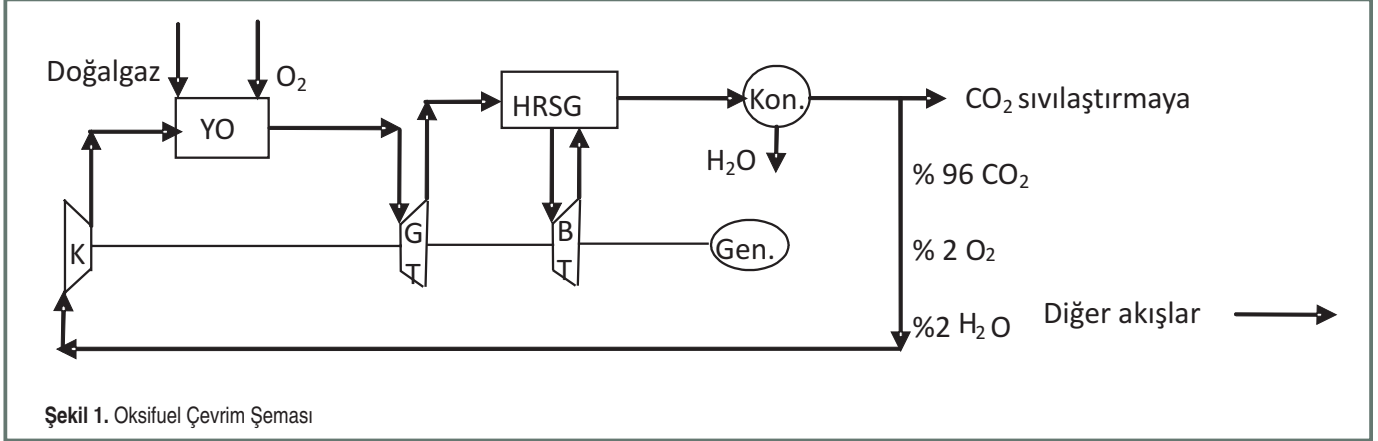
İlk iki yöntemin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları şunlardır. Sıvılaştırma yönteminde CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılması için belli bir enerji harcanmaktadır, bunun da belli bir maliyeti vardır. Ayrıca bu yöntemde CO<sub>2</sub>'den sonsuza kadar kurtulmak mümkün olmamakta, çünkü sıvı olarak nerede depolanmışsa (yeraltında ya da okyanus dibinde) orada durmaktadır. Deprem gibi olası sebeplerden dolayı atmosfere karışma riski çok düşükte olsa bulunmaktadır. CO<sub>2</sub>'nin kimyasal reaksiyonla dönüştürülmesinde ise kimyasal reaksiyona sokulacak maddenin önce işlenmesi sonra CO<sub>2</sub>'nin üretildiği bölgeye getirilmesi ya da CO<sub>2</sub>'nin kimyasal reaksiyona sokulacak bölgeye taşınması gerektiğinden, belli bir maliyet ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemin ilk yöntem olan üstünlüğü, CO<sub>2</sub>'den sonsuza kadar kurtulmak mümkün olmaktadır.

## CO<sub>2</sub>'yi Sıvılaştırarak Depolama Yoluyla Bertaraf Eden Çevrimler

**Oksifuel Kombine Çevrimi (O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> Güç Çevrimi):** Bu çevrimde hava yerine yanmaya oksijen girmekte olup, çıkan egzoz CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'dan ibarettir. Soğutarak yoğunlaştırma yoluyla H<sub>2</sub>O ayrılmaktadır. CO<sub>2</sub>'nin %90'ı çevrimde dönmekte geri kalan %10'u sıkıştırılarak sıvılaştırılmaktadır. Değişik versiyonları olan bu tip çevrimin en temel ve basit olanı Şekil 1'de gösterilmiştir.

Ünitesi) kullanımı, verimi ve elde edilen güç miktarını düşürmektedir. CO<sub>2</sub> ile çalışan büyük güçteki gaz türbinleri henüz piyasada yerini alamadığından uygulama için ayrı bir sıkıntı ortaya çıkmaktadır. Ancak bu sıkıntı hava/CO<sub>2</sub> çevriminde yoktur.

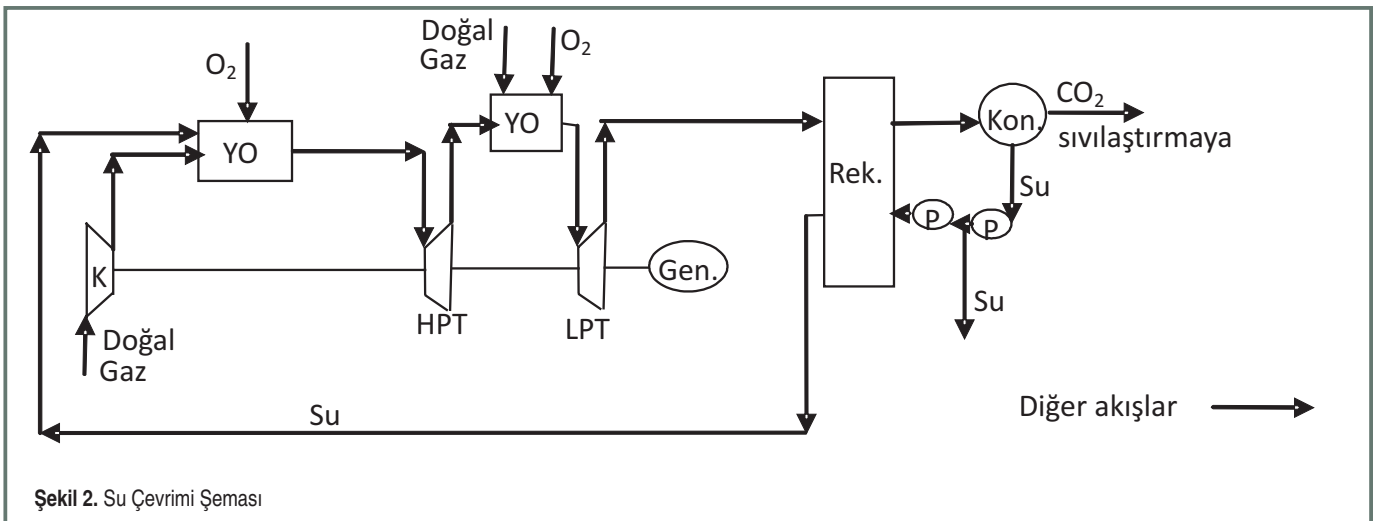
CO<sub>2</sub> salımı olmayan bir güç tesisinin geri ödeme süresi on yıl civarında iken, O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> güç çevriminde bu süre üç yıl civarındadır. E.Iantovski ve P.Mathieu'nun yaptığı bir çalışmada [8] O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> güç çevriminde buhar türbini yerine



Matiant çevrimi de denilen O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> güç çevrimi Mathieu ve Nihart tarafından önerilmiş ve yüksek basıncı 30 MPa, türbin giriş sıcaklığı 1573 K için optimize edilerek çevrim verimi %45 civarında bulunmuştur. O. Bolland ve P.Mathieu'nun yaptığı O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, hava/CO<sub>2</sub>-amine absorpsiyonla ayırma ve CO<sub>2</sub> ayrıştırılmadan standart kombine çevrimli gaz türbini çevrimlerinin analizlerinin karşılaştırılması çalışmasında tesis verimi birinci çevrim için %44,9 ikincisi için %47,1 ve üçüncüsü için %55,2 elde edilmiştir[2,11]. Ayrıca CO<sub>2</sub>'nin tekrar çevrimde dolaşım oranını artırmanın verim ve güç üzerinde çok az olumlu etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Oksijeni havadan ayıracak olan ASU'nun (Hava Ayrıştırma

CO<sub>2</sub> türbini kullanılarak, sıvılaştırılan CO<sub>2</sub> bu türbinde genişletilmiş ve (elektrik/yakıt) verimlilik değeri %54,3 civarında bulunmuştur. Yine aynı çalışmada negatif fiyata sahip olan atık yağlar ve atık ağır karbonhidratlı sanayi atıkları bu çevrimde kullanılarak ciddi faydalar sağlanabileceği ve çevreye hiçbir emisyon salmadan enerjilerinden faydalanılabileceğini göstermişlerdir.

Sanayiden veya güneş enerjisinden elde edilen düşük sıcaklıktaki termal enerji ile desteklenmiş hibrid bir O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> güç çevrimi de C.Gou ve arkadaşları tarafından önerilmiş ve analizi yapılmıştır[5]. Bu analiz sonunda elde edilen net yakıt/elektrik verimi (70-250 °C arasındaki sıcaklıklar için



doymuş buharın atık ısıdan üretildiği farz edilerek) % 54, 18-62, 66 civarında (O<sub>2</sub>'nin eldesi ve CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılması da hesaba dahil edilerek) bulunmuştur [5].

**Su Çevrimi:** Rankine tipli çevrimde olduğu gibi su sıkıştırılarak, daha sonra sıcak gazlarla (çoğu buhar) beraber bir türbinde genişletilip iş elde edilir. Literatürde tek ve çift ek yanma odalı sistemler incelenmiştir. Bu çevrimin elektrik verimi (yakıt alt ısıl değeri için) %45 civarındadır.

Oksijen yakıt çevrimlerinin üçü yani O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/buhar ve Graz çevrimleri tesis verimleri %45-49 civarındadır. Verimleri düşüren en önemli sebep CO<sub>2</sub>'nin ayrıştırılması için kondanserde kaybedilen ısıdır. Oksijenin aşırı soğukta ayrıştırılması tüm çevrimlerde olduğu gibi burada da %2-2,5 civarında verim düşüşüne yol açmaktadır[9]. Su çevrimi, CO<sub>2</sub> ayrıştırması olmayan kombine çevrimle karşılaştırıldığında kombine çevrimin veriminin %57 civarında olduğu görülür. Yanma odasına buharın püskürtülmesi türbin giriş sıcaklığını düşürmekte böylece ek yanma odasında türbinin zarar görebileceği sıcaklıklara çıkılması önlenmektedir. Ayrıca sıvılaştırılan CO<sub>2</sub>'nin %10 civarı başta argon, azot ve su olmak üzere çeşitli maddeler içermektedir.

**Graz Çevrimi (S Versiyonu):** Oksifuel kombine çevrimine reküperasyonlu buhar enjeksiyonu yapılan çevrim tipidir. Verimi %49 civarında olup S versiyonu temel Graz çevriminden daha verimlidir. Bu çevrimde verimi düşüren faktörler aşırı soğuk oksijen üretimi ve CO<sub>2</sub>'nin sıkıştırılması için harcanan güçtür. Buhar ve CO<sub>2</sub> ayrı ayrı tekrar yanma odasına gönderilerek çevrime sokulur. S versiyonunda %92 buhar geri besleme ile yanma odasına gönderilirken eski versiyonda bu %48 civarında idi. Bu da verimi %2,6

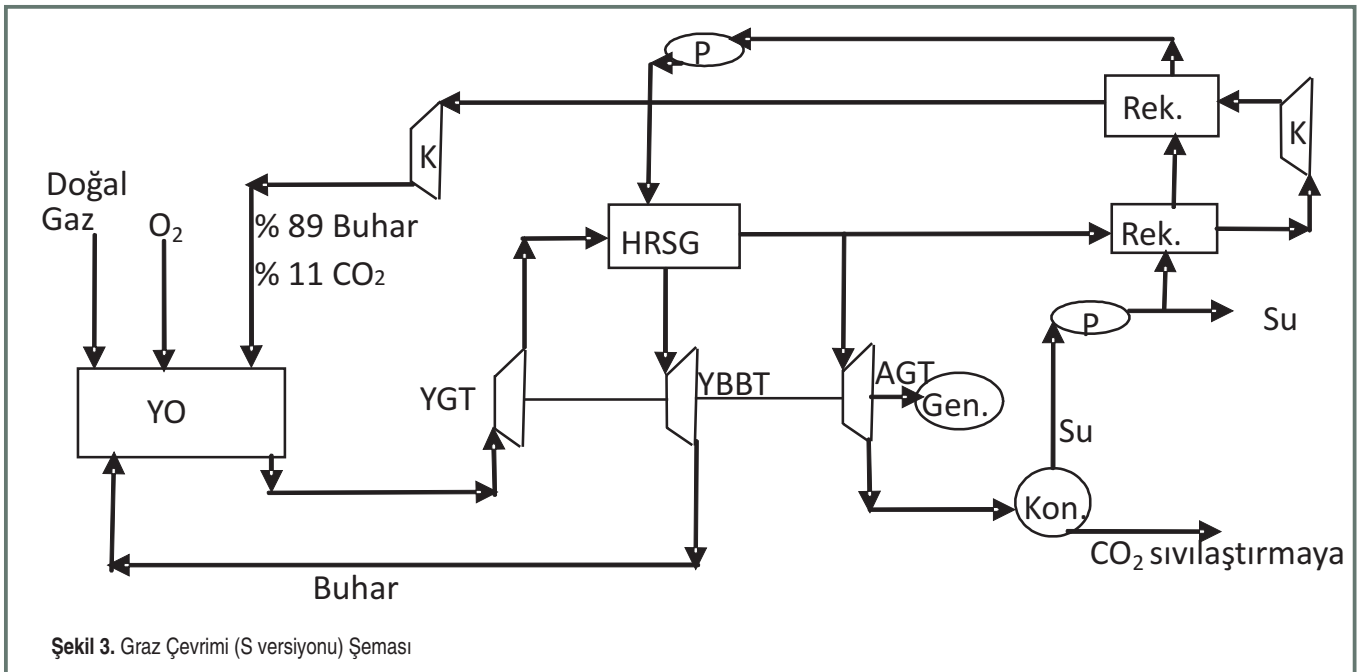
civarında artırmaktadır. Ayrıca aşırı soğuk oksijen üretimi daha verimli ve modern hâle getirildiği için S versiyonu bu yönden de %2-2,5 civarında eski versiyondan daha verimlidir[9].

**Gelişmiş Sıfır Emisyonlu Güç Tesisleri Çevrimi (AZEP):** Bu çevrimde kombine çevrimdeki yanma odası yerine bir karışimli iletken membran (MCM) reaktör vardır. Bu reaktörün üç tane fonksiyonu vardır.

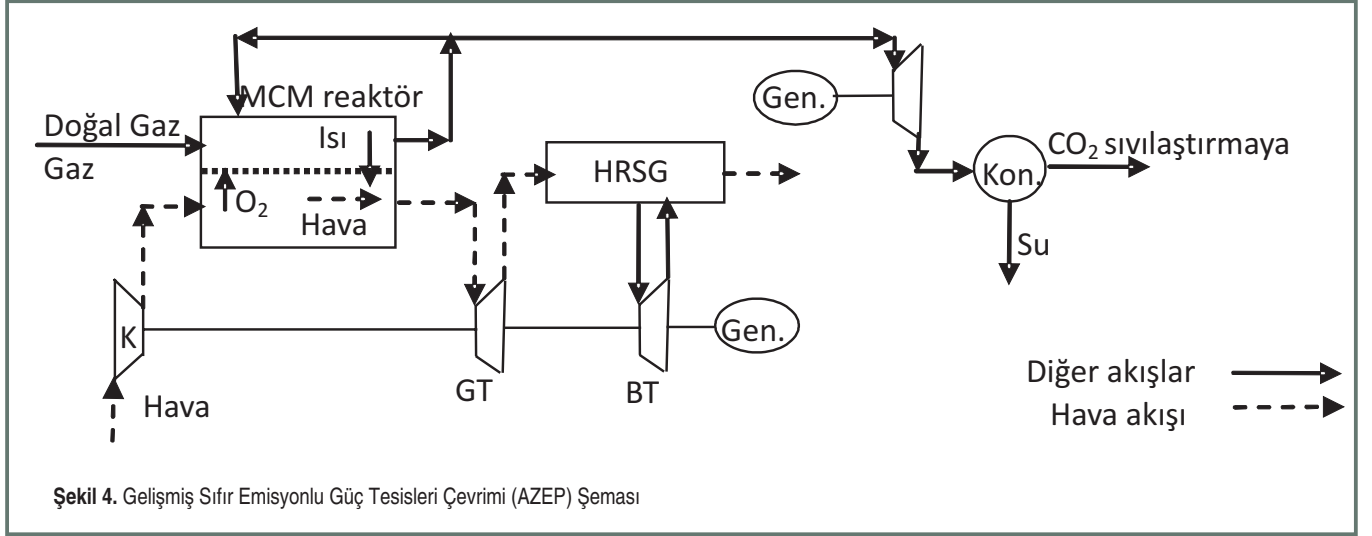
- 1) Oksijenin havadan bir membran yoluyla ayrılması
- 2) Yakıtın stokyometrik orana yakın bir oranda yakılması
- 3) Isı değiştiricisi fonksiyonu olması, yani yanma ısısının oksijeni azaltılmış havaya verilmesi

Bu çevrimde oksijeni alınmış hava, gaz türbinde genişletilir. CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O'dan oluşan egzoz gazları da ayrı bir türbinde genişletilerek enerjisi işe dönüştürülür. H<sub>2</sub>O'nun çoğu soğutma ile yoğunlaştırılarak suya dönüştürülüp CO<sub>2</sub>'den ayrıştırılır[9]. Burada MCM reaktörü 1200 °C'den daha az sıcaklıkta çalışması gerekmekte aksi hâlde reaktör zarar görmektedir. AZEP'in eski versiyonunda buhar türbini mevcut değildi. CO<sub>2</sub>'nin %100'e yakın kısmı ayrıştırılarak sıvılaştırmaya gönderilebilir. Bu çevrimin verimi %50 civarında olup CO<sub>2</sub>'nin ayrıştırılma oranı düşürülürse verim artar. Büyük ölçekte inşa edilmemiş olan bu çevrim hâlen geliştirilme aşamasındadır.

AZEP çevrimi NO<sub>x</sub> oluşumuna engel olduğu gibi diğer bazı çevrimlerle karşılaştırıldığında daha düşük CO<sub>2</sub> ayrıştırma maliyeti avantajını sunmaktadır. Bu ve diğer avantajlar doğal gazın sadece karışık iletkenli membranda üretilen saf oksijen ile yakılması ve yakıt oksijen karışımına egzoz gazı katılması



Şekil 3. Graz Çevrimi (S versiyonu) Şeması



Şekil 4. Gelişmiş Sıfır Emisyonlu Güç Tesisleri Çevrimi (AZEP) Şeması

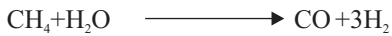
ile sağlanır. Reaktörde en çok kullanılan katalizör paladyumdur; ancak radyum ve diğerleri suyu daha az kirletirler[4]. Radyum bazlı katalizörler istenen özellikleri büyük oranda gösterirler. Eriksson ve arkadaşları radyum bazlı katalizörle zengin yakıtlı (kısmi katalitik oksidasyon (CPO)) yanmasını incelemiş ve yaptıkları deneylerle katalizör karakteristiklerini ortaya koymuşlardır. Metanın kısmi oksidasyonla reaksiyona sokulup yakılması için değişik mekanizmalar mevcuttur. Bunlar direkt oksidasyon (yani H<sub>2</sub> ve CO birincil ürünlerdir).



ve tamamlanmış yanma (yani H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub> oluşur)



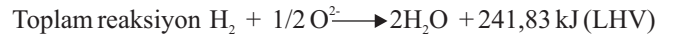
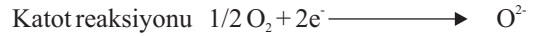
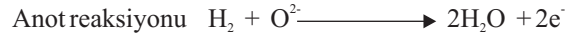
mekanizmalarıdır. Bu mekanizmaların arkasından metanın buharla dönüştürülmesi gelir ki bu reaksiyonlarda



şeklinde. MCM reaktörü ile ilgili ayrıntılı bilgi ve araştırma Eriksson ve arkadaşları tarafından verilmiştir[4].

**Gaz Türbinli Katı Oksitli Yakıt Hücreli Çevrim (SOFC+GT):** AZEP'teki gibi yanma odası yerine başka bir aygıt konmuştur. Bu aygıt yakıt hücresinin katodundan gelen oksijeni alınmış hava ana gaz türbinine gönderilir. Ancak yakıt tamamen yanmadığı için ayrıca ek bir yanma odası vardır. CO<sub>2</sub>'yi ayırmak için akışların katot ve anot akımları şeklinde ayrılması gerekir. Bu sistemin temel aygıtı olan SOFC (Solid oxide fuel cells) ya da katı oksitli yakıt pili (hücresi) dış üreticide, rekuperatörde ısıtılmış olan doğal gaz, ile SOFC'nin anodundan alınan bir miktar CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O ile yeniden üretilen H<sub>2</sub> katottan geçen havanın oksijeni ile birleşerek elektrik ve ısı üretimi sağlanır [9].

Burada yer alan reaksiyonlar şunlardır:



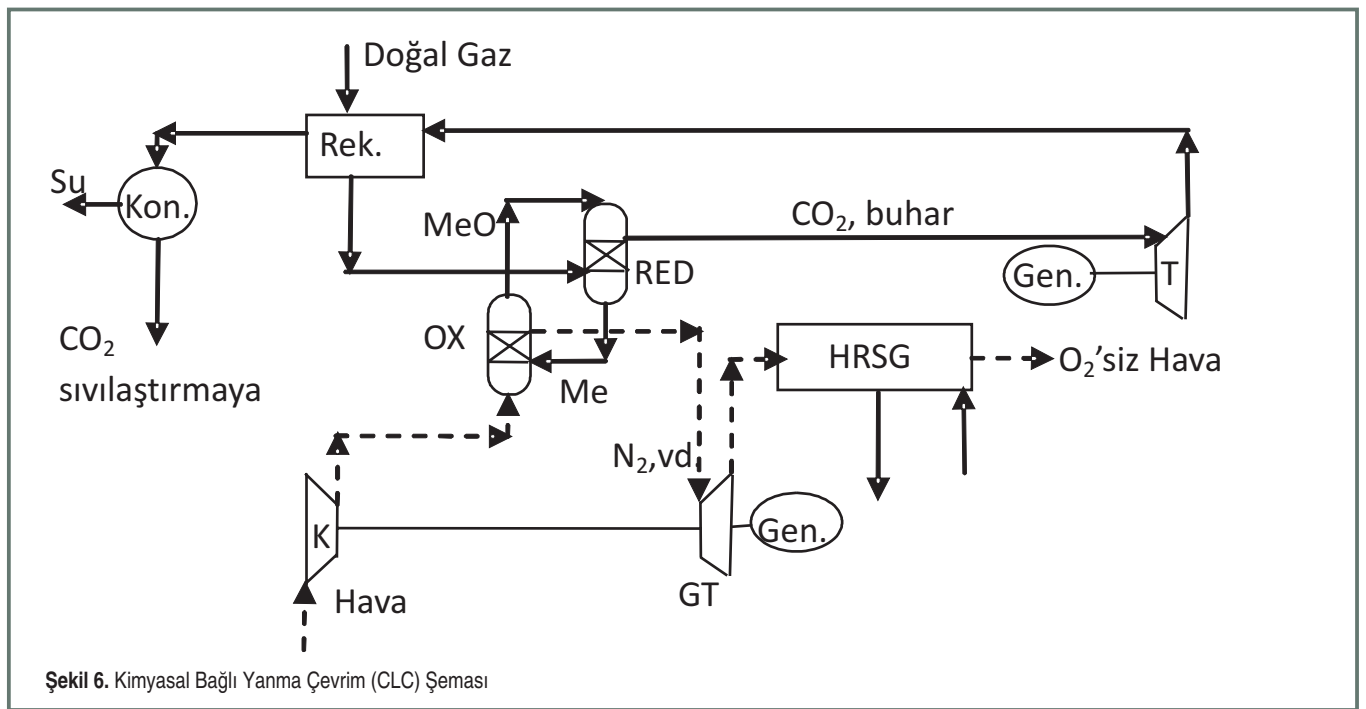
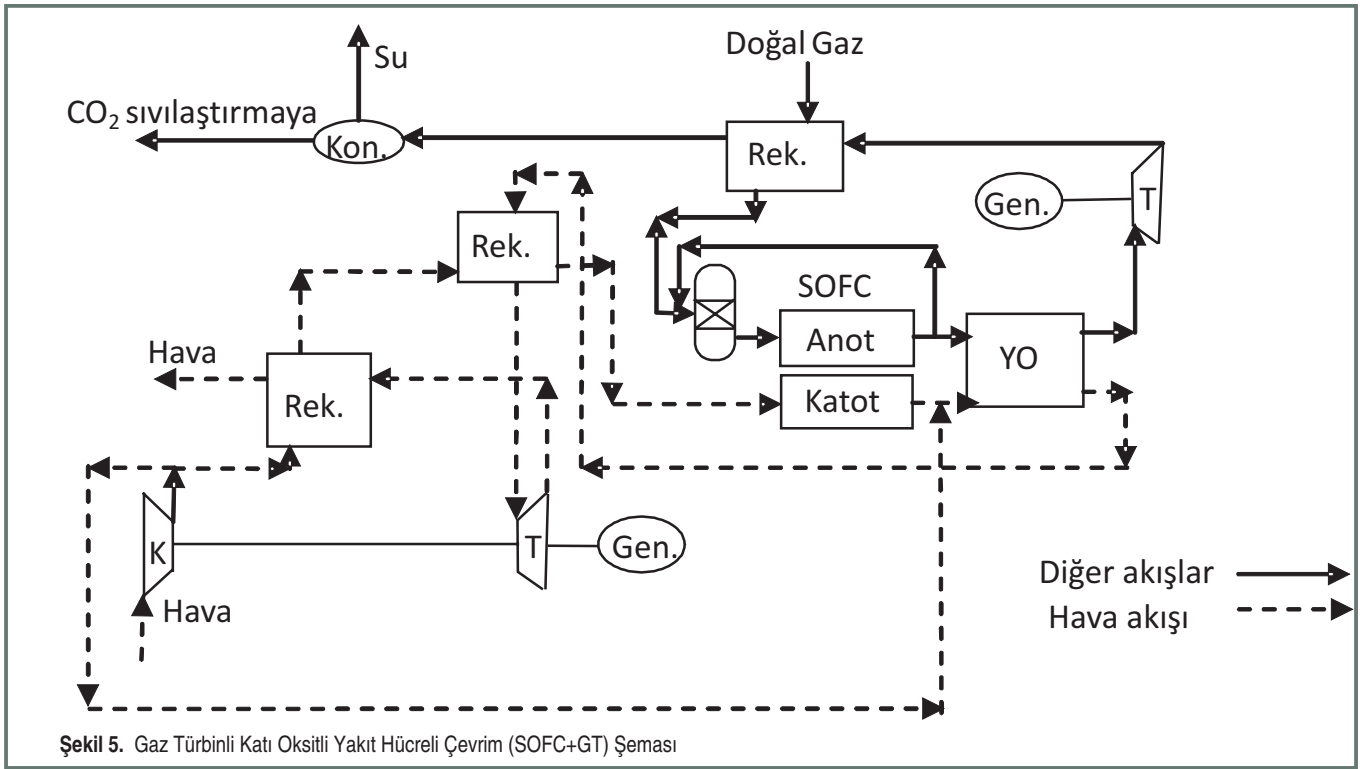
Katotta oksijen iki adet elektron yüklenerek oksijen iyonuna dönüşmekte ve bu iyonlar anotta hidrojen ile birleşerek H<sub>2</sub>O buharı ve 2e<sup>-</sup> şeklinde ayrılmaktadır. Sonuçta bu reaksiyondan bir mol hidrojen ve yarım mol oksijenden 241,83 kJ enerji elde edilmektedir. Burada iyona dönüşen oksijen havadan ayrılarak anoda geçmekte ve kalan hava ve karbon ile bu reaksiyona girmemiş oksijen ve hidrojen ilave yanma odasında yakılmaktadır. Oksidasyon ürünleri anotta olduğundan azot reaksiyona girmemektedir. Ancak sıcaklığı katot ve yanma odası çıkışında arttığından ayrıca gaz türbininden geçirilerek elektrik elde edilir.

Hâlen SOFC ile elektrik üretiminde H<sub>2</sub>'nin enerjisinin %50'sinin üzerinde verimlilikler elde edilmiş ve elde edilen atık ısının sıcaklığı 900-1100 °C civarında olduğundan atık ısının kullanımı da verimli olmaktadır. Böylece hem elektrik elde edilmesi sağlanmakta hem de ortaya çıkan atık ısı ki bu da geri kalan %50 civarında olup ayrı bir türbinden geçirilerek bir kısmı elektriğe dönüştürülmekte ve elektrik üretim verimi %70 (H<sub>2</sub>'nin LHV'si) civarına çıkmaktadır[8].

SOFC verimi  $\eta_{\text{SOFC}}$  ile minimum ısı transfer verimi  $\eta_{\text{MITV}}$  ile gösterilirse,

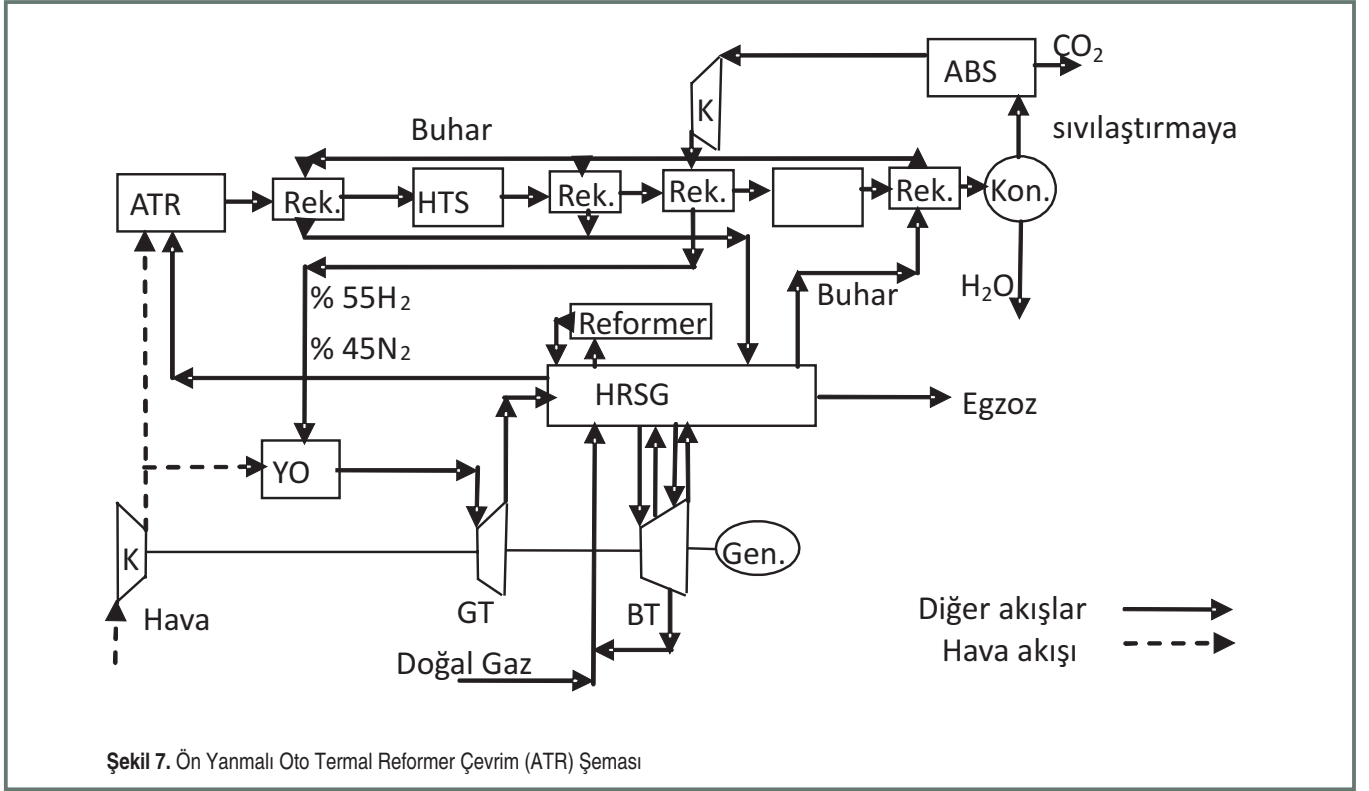
$$\eta_{\text{MITV}} = 0,37 / (1 - \eta_{\text{SOFC}}) \quad (1.1)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Buna göre SOFC'nin verimi arttıkça h yani ısı transfer verimi de artacak; yani daha az ısı çıkacaktır. SOFC'nin verimi %63 olduğunda  $\eta_{\text{MITV}}=1$  yani ısı transfer verimi %100 olacak ve toplam verim de %77 olacaktır. Ancak pratikte bu mümkün değildir; çünkü bir miktar ısı egzoz gazları ile (buhar ve N<sub>2</sub>) dışarı atılmaktadır. Karbonun LHV değerinin % 61.5 civarı (SOFC'nin %50 verimliliğinde (LHV)) elektriğe dönüştürülebileceği



görülmüş, bunun uygulamadaki kayıplar göz önüne alınırsa karbonun LHV değerinin %56 civarının elektrige dönüşebileceği ortaya çıkmıştır. Yakıt kullanımı SOFC'den sonra ilave yanma odası ile %95 civarına çıkmaktadır. SOFC'nin uzun ömürlü ve düzenli çalışıp parçalarında yapısal bozuklukların ve termal gerilmelerin ortaya

çıkması için eğilim çalışma sıcaklığının 900 °C altına inilmesi yönündedir. Ayrıca düşük sıcaklıkta çalışma SOFC aygıtının daha ucuza mal edilebilmesine olanak sağlamaktadır. SOFC'lerin büyük çoğunluğu doğal gaz veya hidrojen ile çalışacak şekilde optimize edilip üretilmişlerdir[12].



Şekil 7. Ön Yanmalı Oto Termal Reformler Çevrim (ATR) Şeması

Henüz tam olarak olgunlaşmamış bir teknoloji olup gücü 20 MW'a kadar olan tesisler yapılmış olup daha büyük ölçekler denenmemiştir. Gaz türbinsiz SOFC çevrimli hibrit otomobil ve diğer taşıtların geliştirilmesi ve üretimi üzerinde hâlen yoğun çalışma ve araştırmalar devam etmektedir.

**Kimyasal Bağlı Yanma (CLC):** CLC demek hava ile yakıt arasında direkt temas olmadan yanmanın meydana gelmesi demektir. Yanma prosesi oksidasyon ve reaksiyon şeklinde reaktör içinde termodinamik dengeye yakın gerçekleşir. RED ve OX reaktörleri arasında çalışan bir metal oksit sayesinde bu durum gerçekleşir.

Rekuperatörde ısıtılan doğal gaz metal oksitin oksijenini alarak (yanarak) CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O şeklinde oluşur ve oksijenini yitiren metal OX reaktöründe kompresörden gelen havanın oksijenini alarak tekrar oksitlenir. Oksijeni alınmış hava ve egzoz gazları farklı türbinlerde genişletilir ve havanın ısısı ile buhar üretilerek bir buhar türbini çalıştırılır. Egzoz gazlarının çoğu CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'dan oluşur. Yeni bir teknoloji olarak çıkan bu çevrim hâlen uygulamada geliştirilme ve pratiğe dökülme aşamasındadır. Özellikle reaktör sistemi çok yeni bir teknolojidir ve çevrim umut vermektedir. %100'e yakın bir oranda CO<sub>2</sub>'yi ayrıştıran bu çevrimin verimi %51 civarındadır[9].

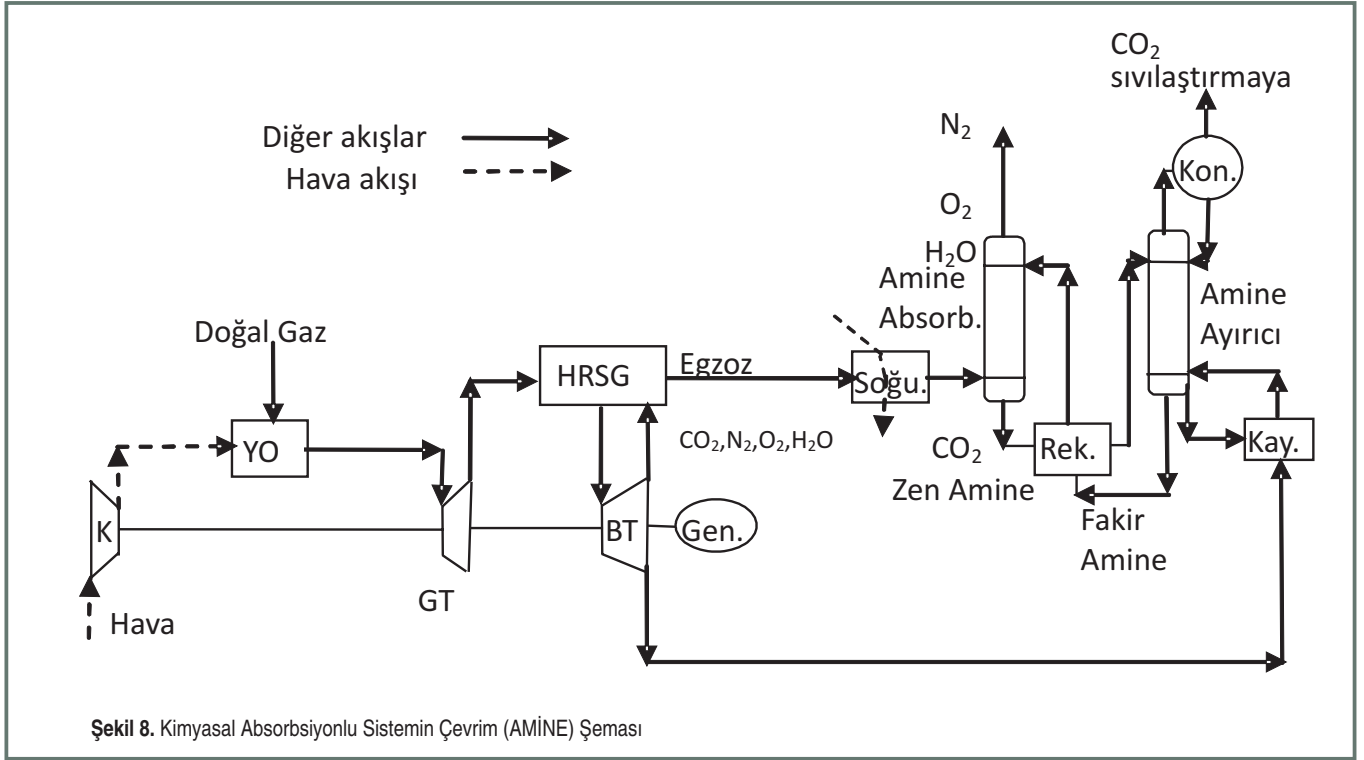
**Ön Yanmalı Oto Termal Reformler (ATR):** Kombine çevrim üzerine temellenmiş olan bu kavramda (konseptte) yanma yerine doğal gazın dekarbonizasyonu söz konusudur. Doğal gaza havanın üflenmesi ve su-gaz reaksiyonu ile CO<sub>2</sub>,

H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> karışımı elde edilir. CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'nun önemli bir kısmı ayrılır ve hidrojeni zengin yakıt bir gaz türbininde yakılır.

Reformer kısmında bir ön kısım vardır ki bu ön kısım ağır hidrokarbonları CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub>'ye dönüştürür. Fazla H<sub>2</sub>O soğutulup sıvılaştırılarak sistemden çekilirken CO<sub>2</sub>'de bir absorber vasıtasıyla ayrılır. Geri kalan yakıt çoğunluğu H<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> olmak üzere yanma odasına verilir. Egzoz atık ısı kazanından geçirilir ve buradan elde edilen buhar, türbinden geçirilerek çevrim performansı iyileştirilir[9]. Bu çevrimde CO<sub>2</sub>'nin ancak %90 civarı ayrıştırılabilmektedir. ATR absorpsiyon kısmında reformerden gelen CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> karışımını oksijenle birleşip CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O oluşturur ve bunun ısısı rekuperatörler vasıtasıyla çevrime katılır.

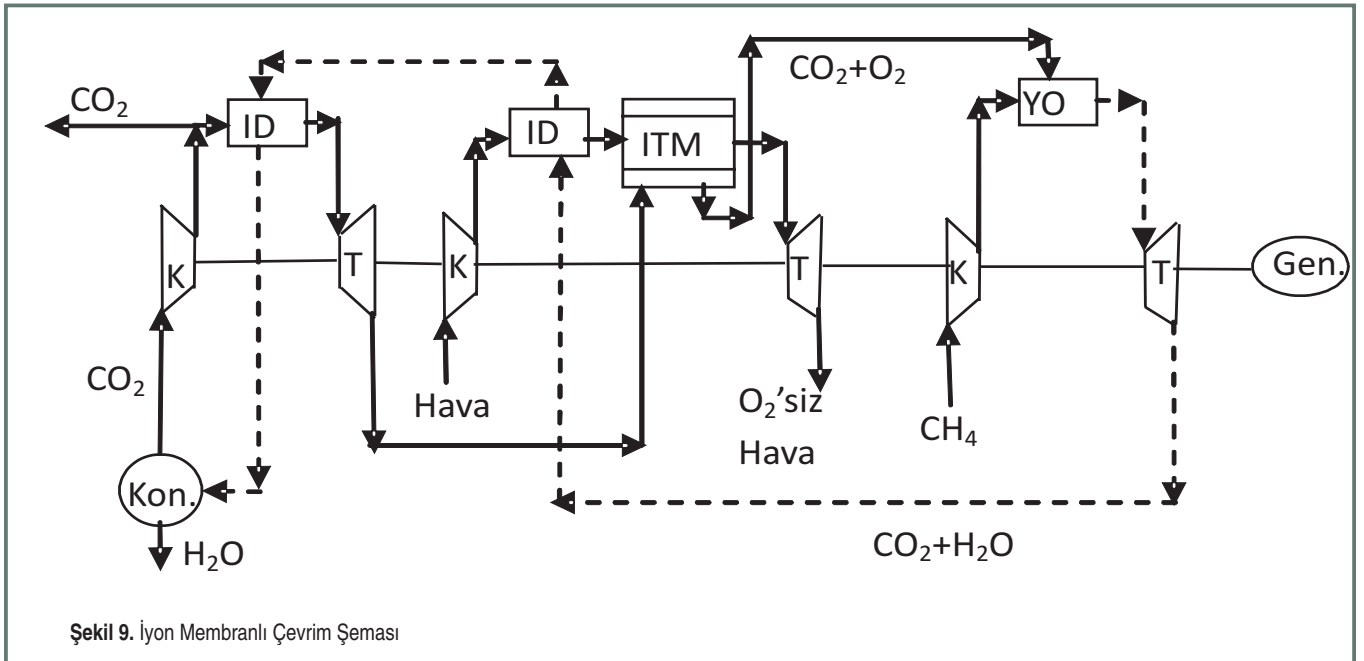
ATR çevriminin verimi %46,9 civarında olup bu oran diğer birçok çevrimden düşüktür. ATR çevriminin tüm üniteleri geliştirilip olgunlaştırılmıştır. Bu çevrim özellikle ağır karbon içeren yakıtlar için çok uygundur[9].

**Kimyasal Absorpsiyonlu Sistem (AMİNE):** Yanmadan sonraki CO<sub>2</sub>'nin egzoz gazlarından ayrıştırılması için kimyasal absorpsiyon yoluyla CO<sub>2</sub> absorbe edilerek ayrılır ve daha sonra başka bir aygıtta CO<sub>2</sub> bu kimyasal malzemeden tekrar ayrıştırılarak sıvılaştırmaya gönderilir. Bu işlemden kullanılacak çeşitli kimyasal bileşikler mevcuttur. Bunlar arasında amine ile absorpsiyon birçok araştırmacının üzerinde yoğun olarak çalıştığı bir malzemedir. Monoetanol amine uygulamada denenmiş ve ticari uygulaması da olan bir



üründür; ancak başlıca dezavantajı pahalı olması ve bunun çevrimde üretilmesi için gereken enerjinin (çoğu kaynatıcı için) çok yüksek (kömürden üretilen her bir MW' a karşılık 0.72-1.74 MW ısı enerjisi gerektirmekte) olmasıdır ki bu enerji CO<sub>2</sub>'nin aminden ayrıştırılmasında ve sıvılaştırılmasında ortaya çıkan ısının kullanılması ile karşılanabilir. Bu çevrimde CO<sub>2</sub>, ağırlığının %30 kadarı monoetanol amine (MEA) kullanılarak egzozdan

ayrıştırılır. Egzoz gazları hacminin %3.9'u CO<sub>2</sub> olup geri kalanı N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O olup 40-50°C'ye soğutma kulesinde soğutulup absorpsiyon kulesine verilir. Burada CO<sub>2</sub>'nin %90'nın absorbe edildiği kabul edilerek, CO<sub>2</sub>'si zengin amine, amin ayırıcıya verilir ve burada CO<sub>2</sub> ayrıştırılıp sıvılaştırılmaya gönderilir. Bu şekilde amine çevrimde kullanılarak CO<sub>2</sub> ayrıştırılır. Kondanserde ayrılan sıvı su amine ayırıcıya verilir. Buhar türbininden çıkan düşük





basıncılı buhar kaynatıcıda kullanılarak amine ayırıcının buhar ihtiyacı karşılanır[9].

Bu çevrimin verimi %48 (LHV) civarında olup CO<sub>2</sub>'nin %90 kadarı ayrıştırılabilmektedir. Kömürle çalışan mevcut bir tesise (900 MW gücünde) amine absorpsiyonlu çevrimin eklenmesi ile (611 ton/h CO<sub>2</sub>'nin ayrıştırılıp sıvılaştırıldığı) tesisin veriminin %17 civarında azalacağı Mimura ve Ark, tarafından bildirilmiştir [9]. Desideri ve Paolucci'nin çalışmasında ise 320 MW gücündeki tesise amine absorpsiyonlu çevrim uygulandığında güç %26 civarında düşmekte tesisin verimi ise %11.6 civarında azalmaktadır [9]. Genelde CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılması için kompresörde harcanan enerji üretilen elektriğin %10 civarı olup soğutma ekipmanlarına harcanan enerji de göz önüne alınırsa bu oran %60'a çıkabilir. Yapılan çalışmalarda genelde CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılması için kompresörde harcanan enerji göz önüne alınmaz, sadece CO<sub>2</sub>'nin ayrıştırıldığı kısma kadar hesap yapılır.

Romeo ve Ark. tarafından yapılan bir çalışmada 350 MW elektrik üreten ve kömürle çalışan bir güç tesisinin verimi %36.93 olup 96.3 kg/s CO<sub>2</sub> salmakta ve bu tesise amine absorpsiyonlu çevrimin eklenmesi ile CO<sub>2</sub> emisyonunun %60'nın tutulması incelenmiştir. Elektrik gereksinimi 112 kW/tCO<sub>2</sub> olduğu ve toplam CO<sub>2</sub>'nin sıvılaştırılması için gereken enerjinin tesisten elde edilen enerjinin %7'sine denk düşüğü ve amine absorpsiyonlu çevrimin eklenmesinin tesisin elektrik üretimini %9 civarında azalttığı hesaplanmıştır[12].

Yine aynı şekilde mevcut olan bu tesise üç farklı yolla amine absorpsiyonlu çevrimin eklenilebileceği ve bunlardan

birincisinin ek kaynatıcının doğal gazla çalıştırılması ki bu durumda maliyetin 60.58 €/tonCO<sub>2</sub> ve toplam verimliliğin %26,18'e (LHV) düşüğü, ikinci seçeneğin güç tesisindeki iç buhar akışlarından birinden gerekli buharın istenen basınç ve sıcaklıkta alınarak kaynatıcıda kullanılması, böylece maliyetin 25,25 €/tonCO<sub>2</sub> ve toplam verimliliğin %30,11'e (LHV) olacağı, üçüncü seçeneğin ise bir gaz türbinli çevrimin eklenmesi ile elektrik üretiminin artırılması ve çıkan egzoz gazlarının ısısının da kaynatıcıda kullanılması ile maliyetin 31,23 €/tonCO<sub>2</sub> olacağı ve toplam verimliliğin %33,7 (LHV) civarında olacağı ifade edilmiştir[12].

Sonuç itibarıyla amine absorpsiyon ile CO<sub>2</sub>'nin ayrıştırılarak sıvılaştırılması yönteminin henüz optimum entegrasyonu sağlanmış değildir.

**İyon Membranlı Çevrim:** Yanma odasında karbondioksit ve oksijen metanla yakılarak egzoz gazları bir türbinde genişletildikten sonra ısısının bir kısmını basınçlı havaya ve CO<sub>2</sub>'ye verdikten sonra bir kondanserde soğutulur. Su buharı, su olarak ayrıldıktan sonra geri kalan CO<sub>2</sub> bir kompresörde sıkıştırılıp bir kısmı depolanmaya gönderilirken arta kalanı egzoz gazından aldığı ısı ile bir türbinde genişletilir ve daha sonra iyon transfer membranında sıcak ve basınçlı havadaki oksijen iyonlara dönüştürülüp membrandan geçer ve CO<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub> şeklinde yanma odasına verilir.

İyon transfer membranı sık gözeneksiz seramik membrandan oluşur ve işlem 1540 bar basınç ve 800-900 °C sıcaklıkta gerçekleşir. Yantovski ve arkadaşlarının termodinamik analizini yaptığı bu çevrimin verimi % 46-56 civarında (1300-1500 °C için) olup bununla ilgili ileri çalışmaların kojenerasyon ve diğer

**Tablo 1.** Sıfır Emisyonlu Güç Çevrimlerinin Karşılaştırılması[9]

Çevrim	Sistemin Verimi (%)	Avantajı	Dezavantajı	Kojenerasyon
Oxyfuel CC	47	Büyük ölçekler mümkündür	-	Mümkün
WC (Su)	45	Büyük ölçekler mümkündür	-	Mümkün
Graz	49	Büyük ölçekler mümkündür	-	Mümkün
AZEP 100%	50	CO <sub>2</sub> ayrıştırma maliyeti düşük	Geliştirilme aşamasında	Mümkün
AZEP 85%	52.5	AZEP 100%'den daha verimli	85% CO <sub>2</sub> ayrıştırma Geliştirilme aşamasında	Mümkün
SOFC/GT	67.3	Verimli	Büyük ölçekler denenmemiştir.	Mümkün
CLC	51.3	100% CO <sub>2</sub> ayrıştırma	Geliştirilme aşamasında	Mümkün
ATR	46.9	Ağır karbonlu yakıtlar için uygun	Verim düşük	Mümkün
Amine	47.9	-	Optimum entegrasyon sağlanamamış	Mümkün
İyon Membranlı	56	-	Geliştirilme aşamasında	Mümkün

CO<sub>2</sub>'yi bertaraf eden çevrimlerde kullanılmasını önermişlerdir [9].

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Gaz Türbinli Kojenerasyon Tesislerinin Termodinamik Modeli

Açık sistem ve kararlı rejimde çalışma durumu için termodinamiğin 1. Kanunu sistem için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_{12} - W_{12} = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

Kütlenin korunumu kanunu (sürekli rejimde)

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c \quad (2.2)$$

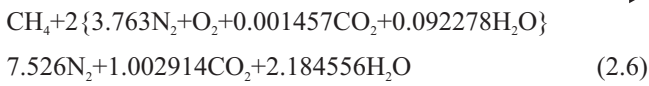
$$h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p dT \quad (2.3)$$

Böylece SASA için

$$\dot{Q}_c - \dot{W}_c = \dot{H} \quad (2.4)$$

$$\dot{H} = \dot{n}_h h_{çık.} - \dot{n}_g h_{gir.} \quad (2.5)$$

bulunur. Yanma reaksiyonun tam olarak ve ideal gerçekleştiği kabulü ile aşağıdaki kimyasal reaksiyon temel alınmış, ayrıca yanma odasında kullanılan yakıt olarak, doğal gaz kabul edilmiş olup, hesapları basitleştirmek için metan gazı olduğu varsayılmıştır.



Yanma işleminde maddelerin miktarı ve cinsi değiştiğinden genel bir referans haline göre özellikler ve özellik bağıntıları kullanılmaktadır.

$$h = h_{oluş.} + \int_{T_0}^T c_p dT \quad (2.7)$$

Entalpilerin genel denklemi

(298.15 < T < T<sub>max</sub> ve P<sub>ref</sub> = 1 bar için, y = 10<sup>-3</sup>T )

$$c_p^0 = a + by + cy^2 + dy^3 \quad (2.8)$$

$$h^0 = 10^3 \left( H + ay \frac{by^2}{2} + cy^1 \frac{dy^3}{3} \right) \quad (2.9)$$

olarak alınmıştır. Çevrimde kullanılan iş akışkanı ister egzoz, ister hava olsun aslında bir gaz karışımıdır. Gaz karışımının özellikleri ise onu oluşturan gazların yani karışanların karışımdaki miktar ve özelliklerine bağlıdır[1]. Karışımda karışanın mol sayısının (n<sub>i</sub>) toplam mol sayısına (n) oranına mol oranı (y<sub>i</sub>) denir.

$$y_i = \frac{n_i}{n} \quad (2.10)$$

Bir karışanın kütesinin toplam kütle oranına ise kütle oranı denir.

$$y_{mi} = \frac{m_i}{m} \quad (2.11)$$

Mol oranı ile kütle oranı arasında M<sub>i</sub> karışanın mol kütlesi ve M<sub>kar</sub> karışımın mol kütlesi olmak üzere aşağıdaki ilişki yazılabilir.

$$M_{kar} = y_i \cdot M_i \quad (2.12)$$

bulunur. Mol oranları bilinen bir gaz karışımı içinde kütle oranları

$$\frac{1}{M_{kar}} = \frac{y_{mi}}{M_i} \quad (2.13)$$

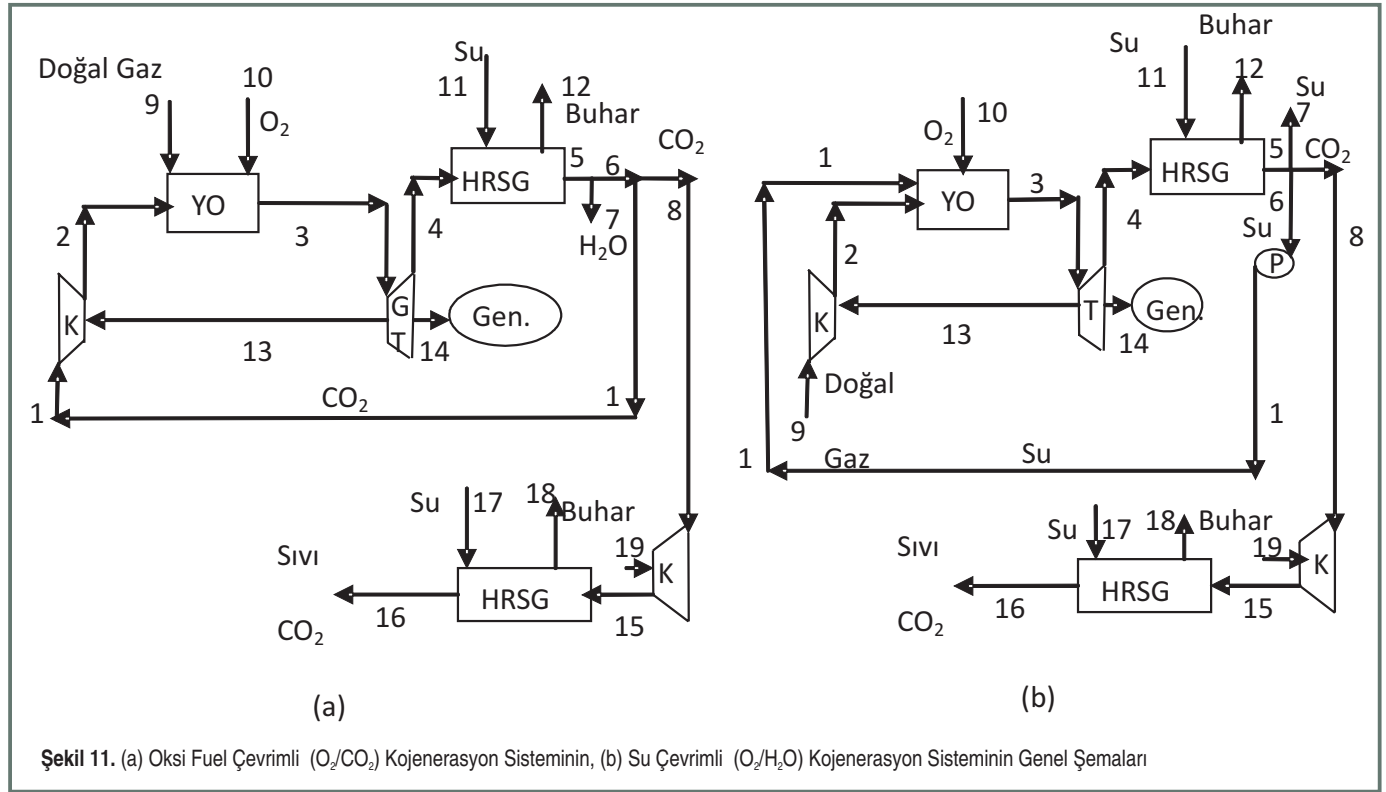
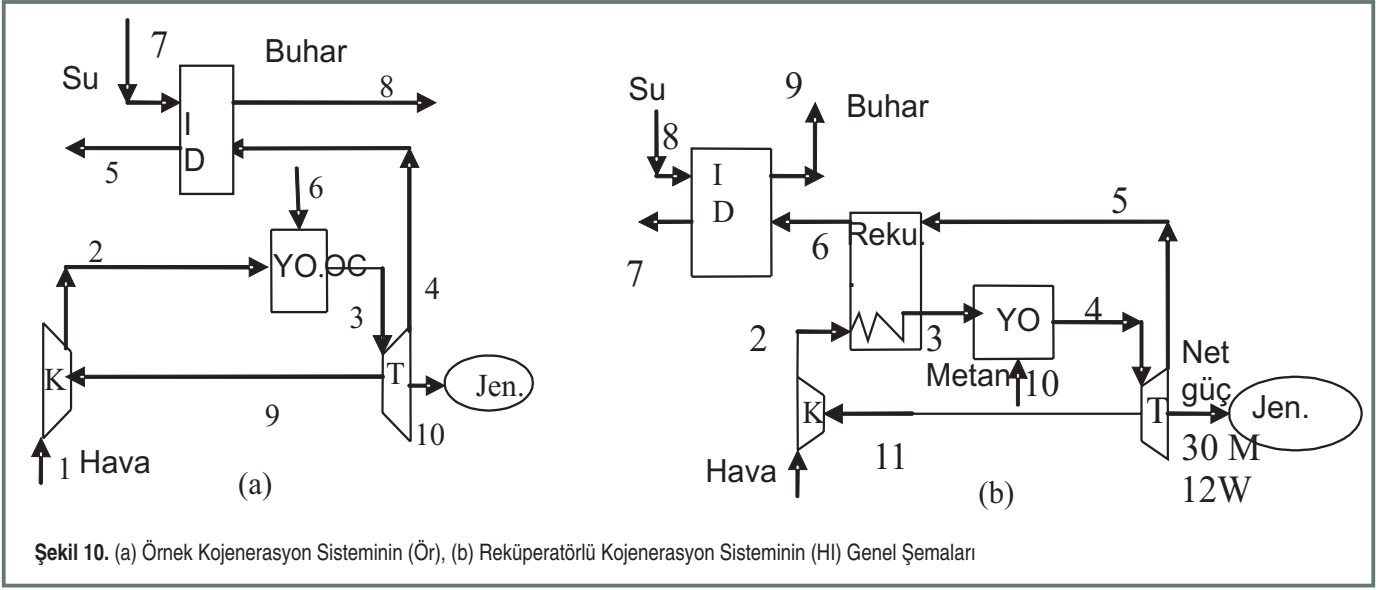
Termodinamiğin birinci kanun verimi de şöyle yazılabilir.

$$\eta = \frac{W}{Q_{yakta}} \quad (2.14)$$

## SIFIR EMİSYONLU KOJENERASYON TESİSLERİNİN MEVCUT KOJENERASYON TESİSLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Gaz türbinli kojenerasyon tesislerinde ana makine gaz türbinidir. Şekil 10 (a)'da görüldüğü gibi, kompresörden yüksek basınçla basılan hava yanma odasında metan gazı ile yakılarak, elde edilen yüksek sıcaklıktaki egzoz gazları gaz türbininde enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürmek üzere bıraktıktan sonra ısı değiştiricisinde geri kalan enerjisinin büyük kısmını suya bırakarak dışarı atılır. Bu şekilde aynı anda gaz türbininden mekanik enerji (jeneratörde elektrik enerjisine dönüşür) elde edilirken, ısı değiştiricisinden sıcak su ya da buhar elde edilir.

Elde edilen sıcak su ya da buhar ısıtma, kurutma, proses ihtiyacının karşılanmasında, buhar türbini kullanılarak elektrik üretiminde, absorpsiyonlu soğutmada ve buna benzer işlemlerde kullanılır. Örnek kojenerasyon sistemleri bundan sonra Ör kojenerasyon sistemleri olarak anılacaktır. Şekil 10 (b)'de kompresörden gelen basınçlı hava, gaz türbininden çıkan egzoz gazları ile ısıtılarak daha yüksek sıcaklıkta yanma odasına gönderilir. Böylece yanma odasından daha yüksek sıcaklıkta egzoz gazları elde edilirken gaz türbininden çıkan egzoz gazlarının ısı enerjisinin bir kısmı havanın ön ısıtmasında kullanılırken geri kalan ısı enerjisi buhar üretimine harcanır. Hava ısıtmalı kojenerasyon sistemleri bundan sonra HI kojenerasyon sistemleri olarak anılacaktır[7,10]. Çevrime reküperatör, buhar püskürtme, ısı değiştiricileri, absorpsiyonlu soğutma, buhar türbini gibi başka aygıtlar eklenerek değişik çevrimler elde etmek mümkündür.



Şekil 11'de iki tane  $CO_2$  tutma teknolojisine dayalı kojenerasyon sistemi tasarlanmış ve mevcut klasik sistem ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu iki temel sistemin çalışabilirliği kanıtlanmış ve büyük güçlerde sorunsuz çalışabilecek sistemler olduğundan dolayı seçilmiştir. Şekil 11 (a)'da görüldüğü gibi, kompresörden yüksek basınçla basılan  $CO_2$  yanma odasına gönderilir. Yanma odasında metan, ASU'dan (oksijeni havadan ayırıştırma ünitesi) elde edilmiş oksijen gazı ile yakılır. Elde edilen yüksek

sıcılıktaki egzoz gazları gaz türbininde enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüşmek üzere bıraktıktan sonra ısı değiştiricisinde geri kalan enerjisinin büyük kısmını suya bırakarak dışarı atılır. Su buharı yoğunlaşarak suya dönüşür ve egzoz gazından ayrışır. Egzoz gazında sadece  $CO_2$  kaldığından bir kısmı sıvılaştırmaya bir kısmı çevrime gönderilir. Sıvılaştırmaya gönderilen  $CO_2$  gazı önce bir ya da birkaç kompresör vasıtasıyla 75.013 bara kadar sıkıştırılarak bir ısı değiştiricisinde 720 K civarına yükselen sıcaklıktaki

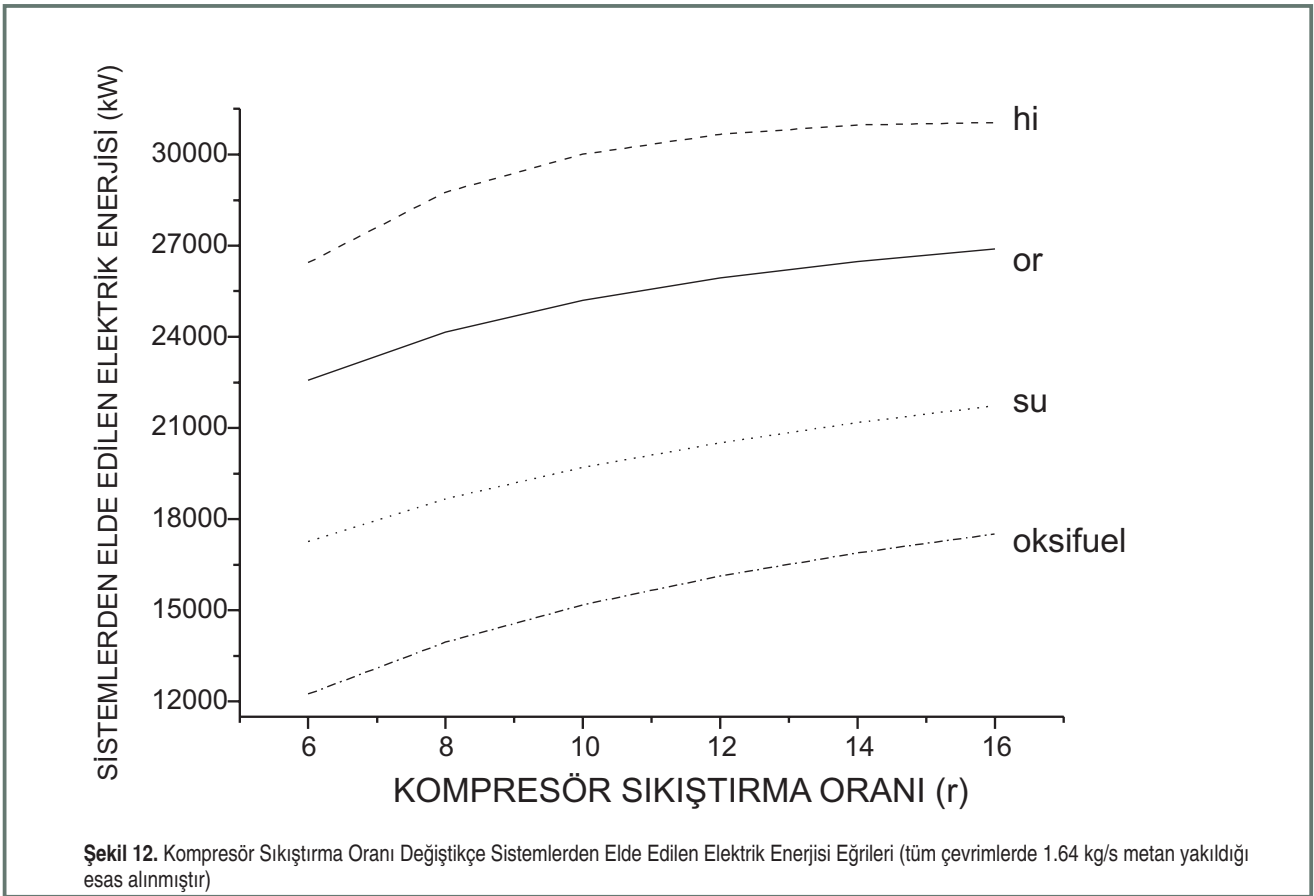
ısısı suya aktarılarak soğutulur ve depolamaya gönderilir. Elde edilen doymuş buhar prosese gönderilir.

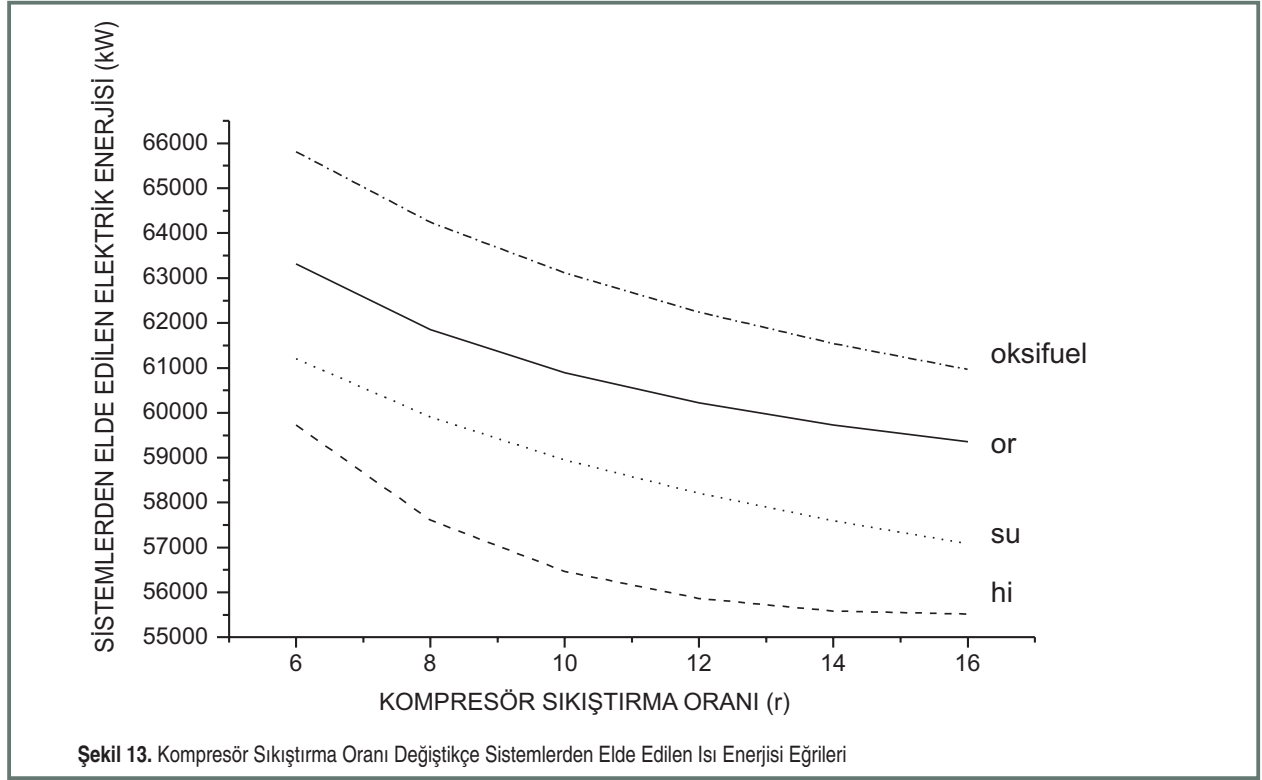
Şekil 11 (b)'de kompresörden yüksek basınca sıkıştırılan metan yanma odasında basınçlı sıcak su ve havadan ayrıştırılan (ASU'dan elde edilmiş) oksijen gazı ile yakılır. Burada CO<sub>2</sub> yerine iş akışkanı olarak H<sub>2</sub>O kullanılmıştır. Bu çevrimlerdeki kompresör ve türbinlerin izentropik verimleri 0.86, CO<sub>2</sub> ve hava debileri 91.3 kg/s, su çevriminin ise su debisi 13.5 kg/s olup yakıt debileri 1.64 kg/s metan alınmıştır. Yanmanın tam ve verilen oksijen miktarının da tam yanma oranında olduğu kabul edilmiştir. HRSG çıkış sıcaklığı 303.15 K ve verimi 0.92 alınmıştır.

Egzoz gazlarındaki buharın bu dört çevrimde tamamen yoğuştuğu kabul edilmiştir. H<sub>1</sub> ve ör çevrimlerde egzoz gazı HRSG çıkışından sonra atmosfere atılmaktadır. Sistemlerin birinci kanun verimi ör, h<sub>1</sub>, su ve oksifuel çevrimleri için değişik kompresör sıkıştırma oranlarında çok az değiştiğinden sırasıyla 0.94, 0.94, 0.86, 0.86 civarında olmaktadır. Yakıtın üst ısıl değeri alınmış olup, egzozdaki buharın tamamen yoğuştuğu kabul edilmiştir.

Şekil 12'de kompresör sıkıştırma oranı değiştikçe elde edilen elektrik gücü değerleri hava ısıtma ve örnek çevrimde sıfır emisyonlu çevrimlerden daha fazladır. Bunun sebebi bunlarda oksijen ayrıştırma için ve CO<sub>2</sub> sıvılaştırma işi için ayrıca güç harcanmamasıdır. Burada ör ve h<sub>1</sub> çevrimleri, sıfır emisyonlu çevrimlerden %8 daha fazla verimlidir. Bunun %2-3 kadarını oksijen ayrıştırma işi, %5-6 kadarını da CO<sub>2</sub> sıvılaştırma işi verimi düşürmektedir.

Şekil 13'te kompresör sıkıştırma oranı değiştikçe elde edilen net ısıl güç oksifuel çevriminde en fazla olup her dört çevrimde de sıkıştırma oranı arttıkça ısıl güç düşmektedir. Bunun sebebi kompresör sıkıştırma işine daha fazla güç harcanması ile yüksek basınçlarda yanma odasından daha yüksek sıcaklıklara çıkılması ve türbinden daha fazla iş elde edilmesi böylece çıkan egzoz gazlarının ısı enerjisi daha az olmaktadır. Türbinden elde edilen net elektrik en fazla hava ısıtma çevriminde olmakta, bunun sebebi de ısıl enerjinin bir kısmının iş akışkanı olan havanın yanma odasından önce ısıtılarak verilmesi ve bu şekilde türbinden daha fazla güç elde edilmesidir. Her dört çevrimde de sıkıştırma oranı arttıkça elde edilen iş artmaktadır.





Şekil 13. Kompresör Sıkıştırma Oranı Değiştikçe Sistemlerden Elde Edilen Isı Enerjisi Eğrileri

## SONUÇLAR

Mevcut teknolojiye şu an için büyük ölçeklerde çalışabilecek durumda olan sıfır emisyonlu güç tesislerinden oksifuel, su ve her ikisinin bir bileşimi olan Graz çevrimleri kanıtlanmış çevrimler olup diğer çevrimler henüz geliştirilme aşamasındadır. Geliştirilme aşamasında olan gaz türbinli katı oksitli yakıt hücreli çevrim (SOFC+GT) en verimli çevrim olup gelecek vaat etmektedir. Burada incelenen oksifuel ve su çevrimlerinin birbirinden farkı iş akışkanlarının farklı olmasıdır. Su çevriminde yüksek sıcaklıklara çıkmak mümkün olmadığından oksifuel çevrimi yüksek sıcaklıklarda daha verimlidir. Bu iki çevrimin oksijen ayrıştırma işi veriminin %2-3'ünü (havadan oksijen ayrıştırma için 812 kJ/kg O<sub>2</sub> enerji harcanmaktadır.) ve CO<sub>2</sub>'nin 75.013 bara kadar sıkıştırma işi (daha sonra ısı değiştiricisinde ısısını suya bırakmakta ve sıvılaşmaktadır) de veriminin %5-6'sını yok etmektedir. Verimden %8 kadar vazgeçilebilirse atmosfere CO<sub>2</sub> emisyonları salınmayacak ve başta küresel ısınma gibi iklim değişiklikleri olmayıp atmosfer temiz kalacaktır. Sonuç olarak ısı kullanımı fazla olan kojenerasyon tesisleri için sıfır emisyonlu CO<sub>2</sub> çevrimlerin daha uygun olduğu görülmekle beraber bu çevrimlerin kıyaslanmasında ekonomik ve termodinamiğin ikinci kanununda yer aldığı analizlerden de faydalanılmalıdır. Ayrıca önerilen bu çevrimlerin iyileştirilmesi içinde çalışmalar yapılmalıdır.

## KAYNAKÇA

1. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. 1996. Thermal Design and Optimization. Wiley Pub.
2. Bolland, O., Mathieu, P. 1998. Comparison of Two CO<sub>2</sub>

Removal Options In Combined Cycle Power Plants. Energy Convers. Mgmt. 39 N:16, Elsevier Science Ltd.

3. Cao, W., Zheng, D. 2007. Thermodynamic Performance Of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Gas Turbine Cycle With Chemical Recuperation By CO<sub>2</sub>-Reforming Of Methane Fuel, Elsevier Science Ltd.
4. Eriksson, S., vd. 2006. Fuel-Rich Catalytic Combustion Of Methane In Zero Emissions Power Generation Processes. Catalysis Today 117, Elsevier Science Ltd.
5. Gou, C., Cai, R., Zhang, G. 2006. An Advanced Zero Emission Power Cycle With Integrated Low Temperature Thermal Energy. Applied Thermal Engineering Elsevier Science Ltd.
6. Haugen, H.A., Eide, L.I. 1996. CO<sub>2</sub> Capture and Disposal: The Realism of Large Scale Scenarios. Energy Convers. Mgmt. 37 Elsevier Science Ltd.
7. Horlock, J.H. 1997. Cogeneration-Combined Heat and Power (CHP). CRIEGER Pub.
8. Iantowski, E., Mathieu, P. 1997. Highly Efficient Zero Emission CO<sub>2</sub>-Based Power Plant. Energy Convers. Mgmt. 37 Elsevier Science Ltd.
9. Kvamsdal, M., Jordal, H., Bolland, K. O.A. 2007. Quantative Comparison Of Gas Turbine Cycles With CO<sub>2</sub> Capture. Energy 32, Elsevier Science Ltd.
10. Limaye, D., R. 1985. Planning Cogeneration Systems. The Fairmont Press.
11. Mathieu, P., Nihart R. 1999. Sensitivity analysis of the MATIANT cycle. Energy Convers. Mt. 40 Els. Sci. Ltd.
12. Romeo, L.M., Bolea, I., Escosa, J.M. 2007. Integration Of Power Plant and Amine Scrubbing To Reduce CO<sub>2</sub> Capture Costs. Applied Thermal Engineering Elsevier Science Ltd.
13. Slowinsky, G. 2006. Some Technical Issues of Zero-Emission Coal Technology Int., J. Hydrogen Energy 31, Elsevier Science Ltd.