

57444

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MHD JENARATÖRLERİN
SONLU ZAMAN TERMODİNAMIĞI
ÇERÇEVESİNDE PERFORMANS ANALİZİ

Gemi İnş. ve Mak. Müh. Ahmet Sinan ÖKTEM

F.B.E. Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof.Dr.Bahri ŞAHİN

İSTANBUL, 1996

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ	III
İNDİSLER	V
TEŞEKKÜR	VI
TÜRKÇE ÖZET	VII
YABANCI DİLDE ÖZET	VIII
1.0. GİRİŞ	
1.1 DİREKT ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ	1
2.1 DİREKT ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN TANITIMI	6
2.2 TERMEL ENERJİNİN ELEKTRİK ENERJİSİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ	7
2.2.1 Termoelektrik Konverterler	7
2.3. Termoiyonik Konverterler	12
2.4. KİMYASAL ENERJİNİN ELEKTRİK ENERJİSİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ	14
2.4.1 Genel Sistemler	14
2.5. Fotovoltaik Dönüşüm	17
2.6. MHD Jenaratörlerin Tanıtımı	19
2.6.1 MHD Jenaratörlerin Tarihçesi	24
3. MHD JENARATÖRLERİN YAPISI VE ENERJİ DÖNÜŞÜM PRENSİBİ	27
3.1 Kanal Gazlarının Elektriksel İletkenlikleri	31
3.2 MHD Jenaratör Kanalı	37
3.3 MHD Jenaratörlerde Miknatis	39
3.4 MHD Jenaratör Tipleri	40
4. MHD JENARATÖR ÇEVİMLERİ	43
4.1 Açık Çevrim	43
4.2 Geri Kazanımlı Açık Çevrim	45
4.3 Kapalı Devre Nükleer Reaktör-MHD Çevrimi	48
5. SONLU ZAMAN TERMODİNAMİĞİ PRENSİBİ	49
6. SONLU ZAMAN TERMODİNAMİĞİ	52
6.1 Carnot ve Curzon-Ahlborn Verim İfadeleri	52

6.2	Curzon-Ahlborn Verim İfadesinin Eldesi	54
7.	MHD GENEL KORUNUM DENKLEMLERİ	59
7.1	Kütle Korunum Denklemi	59
7.2	Momentum Denklemi	60
7.3	Enerji Korunum Denklemi	61
7.4	Sabit Hızlı MHD Jenaratör	64
7.5	Sabit Mach Sayılı MHD Jenaratör	65
8.	MAKSİMUM GÜÇ ÇIKIŞINDA MHD JENARATÖR ÇEVİRİMLERİ	67
8.1	Sabit Hızlı MHD Jenaratör Çevrimi	67
8.2	Sabit Mach Sayılı MHD Jenaratör Çevrimi	75
	SONUÇ	79
	KAYNAKLAR	82
	EKLER	86
	ÖZGEÇMİŞ	

SEMBOLLER :

- A : MHD jeneratör kanal kesit alanı
A_H : Sıcak ısı kaynağı tarafındaki ısı değiştirgeci alanı
A_L : Soğuk ısı kaynağı tarafındaki ısı değiştirgeci alanı
B : Magnetik alan
C_P : Sabit basınç özgül ısısı
C_V : Sabit hacim özgül ısısı
E_{ind} : İndüklenen elektriksel alan
e : Birim kütle başına toplam enerji
e_{iç} : Birim kütle başına iç enerji
F_{ind} : İndüklenen elektromagnetik kuvvet
h : Birim kütle başına entalpi
J_{ind} : İndüklenen akım yoğunluğu
K_H : T_H ve T_w sıcaklıkları arasındaki termal direnç
K_L : T_C ve T_L sıcaklıkları arasındaki termal direnç
k : Özgül ısılar oranı
M : Mach sayısı
ṁ_ç : Sistemden çıkan akışkan debisi
ṁ_g : Sisteme giren akışkan debisi
u : x yönündeki akış hızı
P : Akışkan basıncı
Pr : Basınç oranı
R : İdeal gaz sabiti
S : Seebeck katsayısı
T : Sıcaklık
T_C : Soğuk akışkan sıcaklığı
T_H : Sıcak ısı kaynağı sıcaklığı
T_L : Soğuk ısı kaynağı sıcaklığı
T_w : Sıcak akışkan sıcaklığı

- Q_H : Isı makinasına sıcak kaynaktan transfer edilen ısı enerjisi
 \dot{Q}_H : Isı makinasına sıcak kaynağa birim zamanda transfer edilen ısı enerjisi
 Q_L : Isı makinasından soğuk kaynağa transfer edilen ısı enerjisi
 \dot{Q}_L : Isı makinasından soğuk kaynağa birim zamanda transfer edilen ısı enerjisi
 W : Isı makinasının yaptığı iş
 \dot{W} : Isı makinasının gücü
 V_s : Termoelektrik potansiyel
 v : Akışkan hızı
 ρ : Akışkanın yoğunluğu
 ρ_b : Basınç kayıp katsayısı
 η : Verim
 η_e : Elektriksel verim
 η_c : Kompresör verimi
 η_M : Maksimum güçte sabit mach sayılı MHD jenaratör verimi
 η_R : Rejenaratör verimi
 η_S : Maksimum güçte sabit hızlı MHD jenaratör verimi
 σ : Elektriksel iletkenlik
 τ : Sıcaklıklar oranı
 θ : Basınç oranı parametresi
 θ_c : Kompresör basınç oranı parametresi
 θ_{MHD} : MHD jenaratör basınç oranı parametresi
 π : Peltier katsayısı
 ΔP : Yanma odasındaki basınç kaybı

İNDİSLER :

- b : Basınç
C : Carnot
c : Kompresör
C-A : Curzon-Ahlborn
ç : Çıkış
e : Elektrik
g : Giriş
M : Mach sayısı
R : Rejenaratör
S : Sabit hızlı jenaratör



TEŞEKKÜR

Bu konuda bana çalışma olanağı sağlayan ve yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Bahri ŞAHİN' e ve kaynakları temin etmemde bana yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Hasbi YAVUZ' a teşekkür ederim.

ÖZET

Direkt enerji dönüşüm sistemlerinden, büyük çapta elektrik enerjisi üretimi için belki de en önemli ve elverişli olanı, (MHD) magnetohidrodinamik jeneratörlerdir. Son zamanların en yeni ve en gözde elektrik enerjisi üretim sistemlerinden olan MHD jeneratörlerin sonlu zaman termodinamiği çerçevesinde analizi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır.

Çalışmada öncelikle direkt enerji dönüşüm prensibi ve bu dönüşümün yararları anlatılmıştır. Direkt enerji dönüşüm sistemlerinin kısa bir tanıtımı yapıldıktan sonra, MHD jeneratörlerin enerji dönüşüm prensipleri, tarihçesi ve MHD jeneratör çevrimleri üzerinde durulmuştur. MHD jeneratörlerin sabit sıcaklık ve sabit mach sayılı iki tipi, Brayton çevrimine benzer bir güç çevrimine uygulanmış ve her iki jeneratör tipi için elde edilen verim ifadeleri Curzon-Ahlborn verimiyle karşılaştırılmıştır.

Son olarak bu iki jeneratör tipinin uygulandığı çevrimin maksimum güç ve maksimum verim şartlarının gerçekleştiği dizayn parametreleri belirlenmiş ve sonuçlar muhtelif grafiklerle ortaya konmuştur.

SUMMARY

Within direct energy conversion systems, in order to produce electricity in large quantities, maybe the most important and useful ones are magnetohydrodynamic generators. They are the newest and most favorite electrical energy production systems and essence of this work is related to the analysis within a frame of finite time thermodynamics of MHD generators

In this study, firstly, direct energy conversion principle and the benefits of this conversion have been expressed. After a short introduction of direct energy conversion systems, the energy conversion principles of MHD generators, history and MHD generator cycles have been analyzed.

The constant velocity and constant mach number types of MHD generators have been applied to a very similar cycle to Brayton cycle and the efficiency expressions for both generator types have been compared to Curzon - Ahlborn efficiency.

As the final step, the design parameters have been defined for the two types of generator cycles where maximum power and maximum efficiency conditions have been applied and the results have been shown in various graphs.

1.0 GİRİŞ

1.1 DİREKT ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

Günümüzde enerji tüketimindeki artışlar, yaşadığımız çevrenin aşırı bir biçimde kirlenmesi, sınırlı miktardaki enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, klasik enerji üretim sistemlerinin çevreye olan olumsuz etkileri, gelişen teknolojiyle birlikte insanoğlunun ilgisini, enerjiyi daha basit, daha kolay, daha ucuz, daha verimli ve belki de en önemlisi çevreyi en az kirletecek şekilde enerji üreten yeni sistemlere çekmiştir.

Geçen yüzyıllar boyunca odun temel bir enerji kaynağı olmuştur. Sanayinin gelişmesiyle artan enerji ihtiyacı daha yüksek enerji kaynaklarının kullanımına ihtiyaç göstermiş (örneğin çelik endüstrisi) ve taş kömürleri kullanıma sunulmaya başlanmıştır. Birçok sanayi kolları, asrın başında bol ve kolaylıkla temin edilen petrol ürünlerini tercih ederken ulaşılması gereken hedefler bu yakıtı kullanmayı zorunlu ve kaçınılmaz bir hale getirmiştir. Yüzyılın ilk yarısında enerji konusundaki teori ve uygulamalarda önemli gelişmeler olmuş fakat bir kaynak kıtlığı bulunmadığından toplum için güncel ve ekonomik önem taşımamıştır. II. Dünya Savaşında hızla gelişen teknoloji enerji tüketim olanakları bakımından fazla dikkat çekmemiştir. Tüketiciler en çok 1973'de başlayan petrol bunalımı ile konunun önemini bu krizden büyük ölçüde etkilenerek anlamışlardır. Bununla beraber, enerji üretmek için kaynak temini hala bir sorun oluşturmamaktadır. Sorun enerji dönüşüm olanaklarının getirdiği kısıtlamalar ve yeni dönüşüm teknikleri üzerine yapılan bilimsel çalışmaların henüz sonuçlandırılmamış olmasıdır. Bu noktada Tablo 1.1 ve Tablo 1.2 de görülen ve mevcut olan enerji kaynakları ile bunların birbirleri arasındaki dönüşüm yöntemleri, bize dönüşüm sistemleri açısından aydınlatıcı bilgi sağlayacaktır. Tablolardan görülen enerji kaynaklarından, doğada bol olarak bulunanlara birincil kaynaklar denir. Tüketim şekli birincilden farklıdır. Bir veya daha çok ara dönüşümleri gerektirmektedir. Elektrik enerjisi amaçlanan bir tüketim şekli değil, fakat bir ara enerjidir.

Tablo 1.1 Mevcut Enerji Kaynakları ve Dönüşüm Yöntemleri (*)

<u>Giriş Enerjisi</u>	<u>Dönüşüm Yöntemi</u>	<u>Çıkış Enerjisi</u>
Elektromagnetik	Güneş bataryaları, Fotoelektrik	Elektrik
Elektromagnetik	Fotokimyasal Fotosentez	Kimyasal
Elektromagnetik	γ - nötron reaksiyonları	Nükleer
Elektromagnetik	Radyometre Solar batarya	Kinetik
Elektromagnetik	Solar tutucu	Isı
Kimyasal	Bataryalar Elektroliz	Elektrik
Kimyasal	γ - nötron reaksiyonları	Nükleer
Kimyasal	Adale	Kinetik
Kimyasal	Yanma	Isı
Kimyasal	Kemilüminesans	Elektromagnetik
Nükleer	Fizyon	Elektrik
Nükleer	Yarılma Reaksiyonları Fizyon	Elektromagnetik
Nükleer	Radyasyon kataliz İyonizasyon	Kimyasal
Nükleer	Radyoaktivite Fizyon	Kinetik
Nükleer	Fizyon Füzyon	Isı

Tablo 1.2 Mevcut Enerji Kaynakları ve Dönüşüm Yöntemleri (*)

<u>Giriş Enerjisi</u>	<u>Dönüşüm Yöntemi</u>	<u>Çıkış Enerjisi</u>
Kinetik	γ - nötron reaksiyonları	Nükleer
Kinetik	Dönüştürücüler MHD Jenaratör	Elektrik
Kinetik	Sürtünme	Isı
Kinetik	Hızlanan yük	Elektromagnetik
Kinetik	Radyoliz	Kimyasal
Isı	Isı genişmesi ve yanmaları	Kinetik
Isı	γ - nötron reaksiyonları	Nükleer
Isı	Ayrışım Kaynama	Kimyasal
Isı	Isı radyasyonu	Elektromagnetik
Isı	Termoelektrik Termoionik	Elektrik
Elektrik	Elektromagnetik radyasyon Elektrik lambaları	Elektromagnetik
Elektrik	Batarya doluşu	Kimyasal
Elektrik	γ - nötron reaksiyonları	Nükleer
Elektrik	Elektrositrikasyon Elektrik motoru	Kinetik
Elektrik	Sürtünme	Isı

* Tablo 1.1 ve Tablo 1.2 kaynaklar bölümünde verilen eserlerden derlenerek hazırlanmıştır.

Büyük değerde elektrik enerjisi elde edilmesi, tablolardan görüldüğü gibi kinetik enerjiden yararlanma ile mümkündür. Bu bakımdan su ve kömür enerjisinden birinci kaynak olarak geniş bir şekilde yararlanılmaktadır. Birçok üstünlükleri enerjinin iletilmesinde elektrik enerjisinden yararlanmayı zorunlu kılmaktadır. Elektrik enerjisi elektrik yükünün toplanması veya akışı ile ilgili olan bir enerjidir. Elektrik enerjisinin üstünlükleri şu şekilde özetlenebilir:

- Ekonomik, pratik, çevre kirliliğı oluşturmayan, kolay kontrol ve kumanda edilebilir olması,
- Oldukça yüksek bir verimle hemen hemen her tür enerji çeşidine dönüştürülebilmesi,
- Tehlike bakımından emin, işletilmesi bakımından güvenilir olması,
- Mekanik enerji gibi ara bir türe geçmeksizin diğer enerji türlerinden direkt olarak üretilebilir olması.

Elektrik enerjisinin üretimi çeşitli şekillerde olabilir. Örneğin suyun barajlarda birikimi ile oluşan potansiyel enerjinin elektromekanik düzeneklerle elektrik enerjisine çevrilmesi şeklinde kullanılabilir. Bir su türbününün kanatlarına verilen enerji türbünle direkt olarak bağılı jenaratörün motorunu birlikte döndürerek gerekli mekanik enerjiyi sağlar. Bilindiğı gibi bir jenaratörde rotor ve stator kısımları mevcuttur. Rotor dönen bir alan oluşturur, statordaki sargılarda da bu alanın etkisiyle ve bilinen Faraday yasasıyla gerilim indüklenir. Isı enerjisi ise yüksek sıcaklıktaki bir buharın türbine verilerek bunu döndürmesi ve bağılı jenaratörün rotorunun da birlikte dönmesiyle elektrik enerjisine dönüşmektedir. Tablo 1 ve Tablo 2 ye dikkat edilirse, dönüşüm, ısı \longrightarrow ısı genişmesi kinetik enerji \longrightarrow elektrik enerjisi dönüşümü şeklinde olmaktadır. Böylelikle su potansiyeli ve ısı elektrik enerjisi üretimi için birinci kaynaklar olagelmıştır. Son zamanlarda ise ısı enerjisinden yararlanma bakımından bazı yeni yöntemler geliştirilmektedir. Bu yöntemlere örnek olarak kömürden daha iyi bir yararlanma sağlayan karbonat eriyikli yakıt hücreleri ve direkt enerji dönüşüm sistemleri verilebilir. Kullandıkları metodlardaki basitlikler, ucuz olmaları, klasik enerji üreten eski sistemlerden daha verimli olmaları ve çevreyi en az kirlenmeleri sebebiyle elektrik enerjisi üretiminde bir çağ başlatan fotovoltaik güneş pilleri, yakıt pilleri, termioyonik ve termoelektrik dönüştürücüler ve özellikle MHD (magnetohidrodinamik jenaratörler) direkt enerji dönüşüm sistemleri

içerisinde en önemli olanlardır. Direkt enerji dönüşümü enerji kaynaklarından ara kademesiz elektrik enerjisi elde etme yöntemlerinin genel adıdır. Böylelikle birincil kaynakların kullanımı ve elektriğe dönüşüm ara kademelerden kurtulmakta ve tek kademede enerji üretimi sağlanmaktadır.

Bütün bu nedenlerden dolayı özellikle ülkemiz için gerekli olan elektrik enerjisinin büyük ölçüde direkt enerji sistemleri kullanılarak üretimi, ülkemizin tarım ticari ve sanayii gelişiminde büyük önem taşımaktadır. Ülkemiz güneş enerjisi bakımından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle güneş enerjisini, yılın her ayında, özellikle ısınmada kullanabilir ve ülkemiz ithalinin büyük bölümünü oluşturan petrol ürünlerinden büyük tasarruf sağlanabilir. Bu ısınma yöntemi için ise kaliteli güneş kolektörleri ve güneş enerjisini direkt olarak elektriğe çeviren fotovoltaik güneş pillerinden yararlanılabilir. Bununla beraber ülkemizin şu an içinde bulunduğu elektrik enerjisi sıkıntısı nükleer santrallerle rahatlıkla çözülebilir ve bu santrallerde elektrik enerjisi dönüşümü, direkt enerji dönüşüm sistemlerinden birisi olan magnetohidrodinamik jeneratörlerle oldukça verimli bir şekilde sağlanabilir.

2.1 DİREKT ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN TANITIMI

Enerji dönüşüm sistemleri ara enerji formlarını elektrik enerjisine dönüştürebilmeleri nedeniyle ön plana çıkmaktadırlar. Daima verimsiz bir kademe olan ısı transfer evresini geçerek enerjinin diğer formlarından elektrik enerjisine direkt olarak çeviren araçlar daha önce bahsedildiği gibi mevcuttur. Dünya toplumu bir enerji toplumdur ve her yıl bir önceki yıldan daha fazla enerjiyi gerektirmektedir. Bu nedenle enerji kaynakları daha yüksek bir verimlilikle kullanılmalıdır. Bu bize direkt enerji dönüşümleri üzerine çalışmanın önemini gösterir. Genel olarak bir proses ard arda birkaç adım yerine, direkt olarak meydana geliyorsa, onun veriminin daha yüksek olacağı ilk olarak düşünülebilir. Elektrik üretmek için kullanılan dönüşüm sistemlerinden bazıları genellikle direkt enerji konverterleri olarak adlandırılır. Termal enerji termoelektrik konverterlerde ve termiyonik dönüştürücülerde direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Kimyasal enerji yakıt hücreleri veya baterilerde elektrik enerjisine direkt olarak dönüştürülebilir. Elektromagnetik enerji fotovoltaik veya güneş hücrelerinde elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Nükleer enerji nükleer pillerde elektriğe dönüştürülebilir. Mekanik enerji konvansiyonel jeneratör veya alternatörde elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Tüm bu dönüşüm sistemleri bugün kullanılan sistemler olmalarına karşın sayıları azdır. İnsanoğlunun fosil yakıtlara olan güvenini açık olarak azaltması sonucu bu sistemlere olan gereksinim ve güven bugün için özellikle gelişmiş ülkelerde artmaktadır.

Direkt enerji dönüşüm araçları çeşitli boyutlarda, şekillerde ve güç seviyesinde olduğundan, uygulama alanları pratik olarak fazladır (Culp,1991) . Burada ilk olarak hali hazırda bulunan direkt enerji dönüşüm sistemlerinin kısaca tanıtımı yapılacaktır.

2.2 TERMAL ENERJİNİN ELEKTRİK ENERJİSİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

Sirküle eden herhangi bir akışkan veya hareket eden parça kullanmaksızın, yakıtın enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren sistemler mevcuttur. Bu sistemler içerisinde termal enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için kullanılan sistemlerin başında termoelektrik ve termoiyonik dönüştürücüler geniş bir şekilde kullanılmaktadır ve bu sistemlerin maksimum verimi bilinen Carnot veriminden daha düşüktür (Culp,1991).

2.2.1. TERMOELEKTRİK KONVERTERLER

Termoelektrik jeneratör veya konverterin çalışması Seebeck, Peltier ve Thomson' un ortaya koyduğu prensipler doğrultusunda olmaktadır. Seebeck etkisi Alman fizikçi Thomas J. Seebeck tarafından 1822' de bulundu. Seebeck, bir devrede iki farklı iletkenin bir birleşme noktası bir diğerinden farklı sıcaklıkta tutulduğunda, iletkenin uçları arasında bir voltaj üreyeceğini ifade etmiştir. Bu etki nedeniyle oluşan akım, dış devre yükünde elektrik enerjisine çevrilir. Bu yöntemle üretilen gerilimler düşük seviyede kalmaktadırlar. Seebeck katsayısı S , malzeme özelliklerine bağlıdır ve sıcaklık ile termoelektrik potansiyelinin (V_s) değişim oranını verir (Culp,1991).

$$S = \frac{dV_s}{dT} \quad (2.2.1)$$

Seebeck katsayıları sıcaklığın fonksiyonudur. İki malzemeyi içeren devrede oluşan termoelektrik potansiyel,

$$V_s = \int_{T_L}^{T_H} (S_a - S_b) \cdot dT = \int_{T_L}^{T_H} S_{ab} \cdot dT \quad (2.2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. (2.2.2) eşitliğinde görülen S_{ab} kombine Seebeck katsayısı olarak tanımlanır. Birleşim ısısının ortaya çıktığı soğuk birleşme bölgesinde, elektrik akımı A

malzemesinden B' ye akıyorsa, kombine Seebeck katsayısı pozitif olarak tanımlanır. Tablo 2.2.1 de bazı maddelerin 100 °C daki Seebeck katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.2.1. Bazı Maddelerin Seebeck Katsayıları (Culp,1991)

Madde	S, [V / °K]
Alüminyum	$-0.2 \cdot 10^{-6}$
Bakır	$3.5 \cdot 10^{-6}$
Demir	$13.6 \cdot 10^{-6}$
Platinyum	$-5.2 \cdot 10^{-6}$
Germanyum	$375 \cdot 10^{-6}$
Slikon	$-455 \cdot 10^{-6}$

Metallerde ve alaşımlarda, verimli elektrik eldesi için gerekli Seebeck katsayısı çok düşüktür. Bu nedenle termokupl devrelerde muhtelif metal karışımları ortak olarak kullanılmaktadır.

Peltier etkisi, Fransız fizikçi J.C.A. Peltier tarafından 1844 ' de ortaya konmuştur. Genel olarak, direkt akımın farklı malzeme devresine doğru aktığında, farklı tipteki iletkenlerden birinin soğuduğunu, diğerinin ısındığını ifade eder. Bu ifade Seebeck etkisinin tersidir. A ve B gibi farklı iki malzemedden oluşan bir devre için Peltier katsayısı (Π_{ab}) aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\pi_{ab} = -\frac{Q}{i_{ab}} \quad (2.2.3)$$

(2.2.3) eşitliğindeki Q birleşme noktasındaki ısı transfer miktarı (watt), i_{ab} jenaratörün içerisindeki direkt akım (amp.) olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle Peltier katsayısının birimi volt olarak bulunacaktır (Culp,1991).

Seebeck katsayısı gibi, Peltier katsayısı da sıcaklığın fonksiyonudur ve Seebeck katsayısı ile olan ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$\Pi_{ab} = T_{(L \text{ veya } H)} \cdot S_{ab} \quad (2.2.4)$$

$T_{(L \text{ veya } H)}$, ya soğuk iletkenin mutlak sıcaklığı (T_L) ya da sıcak iletkenin mutlak sıcaklığıdır (T_H).

Thomson etkisi ise, İngiliz fizikçi William Thomson tarafından 1854 tarihinde bulundu. Thomson etkisini şu aşağıdaki şekilde tanımlamak mümkündür.

$$\tau \equiv \frac{\dot{Q} / \Delta T}{i} \quad (2.2.5)$$

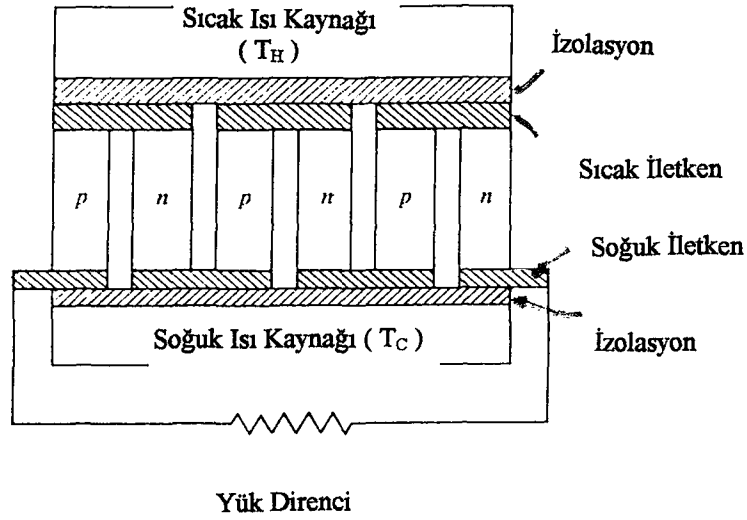
Bu eşitlikteki \dot{Q} ısı transfer oranı (watt), olarak tanımlanmıştır.

Thomson ile Seebeck katsayısı arasındaki ilişki ise,

$$\tau = T \cdot \frac{dS}{dT} \quad (2.2.6)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu katsayı p tipi maddeler için pozitif, n tipi maddeler için negatif değerini almaktadır. Thomson etkisi termoelektrik jenaratörlerin çalışmasında ikinci dereceden önemi olan bir etkidir.

Şekil 2.2.1 de tipik bir p-n tipi termoelektrik jenaratör görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, jenaratörün elemanları veya bacaları elektrik akımını iletmeleri için seri olarak, ısı akışı için de paralel olarak bağlanmışlardır.



Şekil 2.2.1. n-p Tipi termoelektrik Jenaratörün Şematik Gösterimi (Sutton,1966)

Termoelektrik jenaratörlerde kullanılacak materyelin arzu edilen karakteristik özellikleri şu şekilde sıralanabilir :

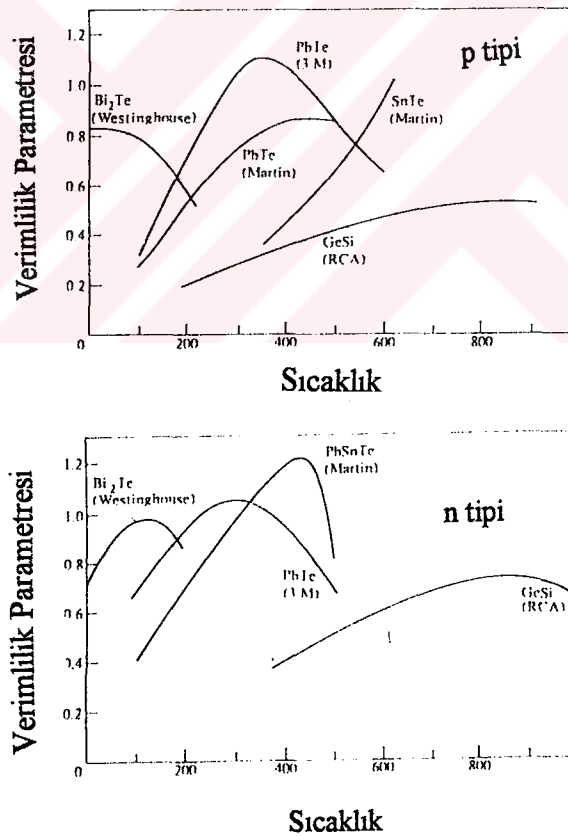
- Akımın malzeme içinde akışı sonucu oluşan iç ısı üretimini düşürmek için, düşük iç elektriksel dirençli malzemeler.
- Isı iletimini düşürmek amacıyla düşük termal iletkenliğe (yüksek termal direnç) sahip malzemeler.

En uygun malzemeleri yarı iletkenler oluşturmaktadır (kurşun telleri, germanyum-silikon alaşımları ve germanyum telleri v.b.) (Irving Granet,1985). n-p tipi yarı iletkenler yaygın olarak termoelektrik sistemlerde kullanılırlar. Bir fikir olması bakımından önerilen termoelektrik malzemeler ve verimlilik parametrelerine ait şekiller Şekil 2.2.2 de verilmiştir (Culp,1991).

Termoelektrik jenaratörler elektrik üretmek için hemen hemen her termal enerji kaynağını kullanabilirler. Bu dönüştürücüler temel olarak, ısıyı bir kaynaktan alan ve ısıyı elektriksel işe çeviren bir ısı makinası türü olduklarından, teorik üst limit olarak Carnot verimine sahiptirler. Kayıplar nedeniyle Carnot verimi limitlerine yaklaşılsa bile, verimleri % 10 değerinden daha büyük olmaktadır. Verimlerinin düşük olması ve

parçalarının oldukça pahalı olması dezavantajlarıdır. Fakat, yarı iletkenlerin gelişimi ve kullanımıyla, termal verimlerinin % 20 ye yaklaşacak olması önemli bir noktayı oluşturur.

Termoelektrik jenaratörlerin konvansiyonel enerji üreten sistemlere göre birçok avantajları vardır. Güvenilirlikleri, basitlikleri, hareket eden parçalarının olmayışı ve oldukça sağlam olmaları üstün özelliklerini oluşturur. Verimlerinin oldukça düşük olmaları sebebiyle düşük güç isteyen yerlerde kullanılabilirler. Kullanım yerlerine örnek olarak kerosen lambalarda, kırsal kesimlerdeki radyo alıcılarını çalıştırmak için dönüştürme ve radyoizotop ısı kaynaklarıyla uzun ömürlü bakım istemeyen okyanus şamandıralarını çalıştırmada, boru hatlarının katodik korunmasında, hava istasyonlarında ve hatta uydularda rahatlıkla kullanılabilirler. Pratik kullanımına en büyük örnek 43 yörüngede kalan 580 W SNAP 10A uydusu verilebilir (Sutton,1966).



Şekil 2.2.2. Bazı Termoelektrik Malzemeler ve Verimlilik Parametreleri (Culp,1991)

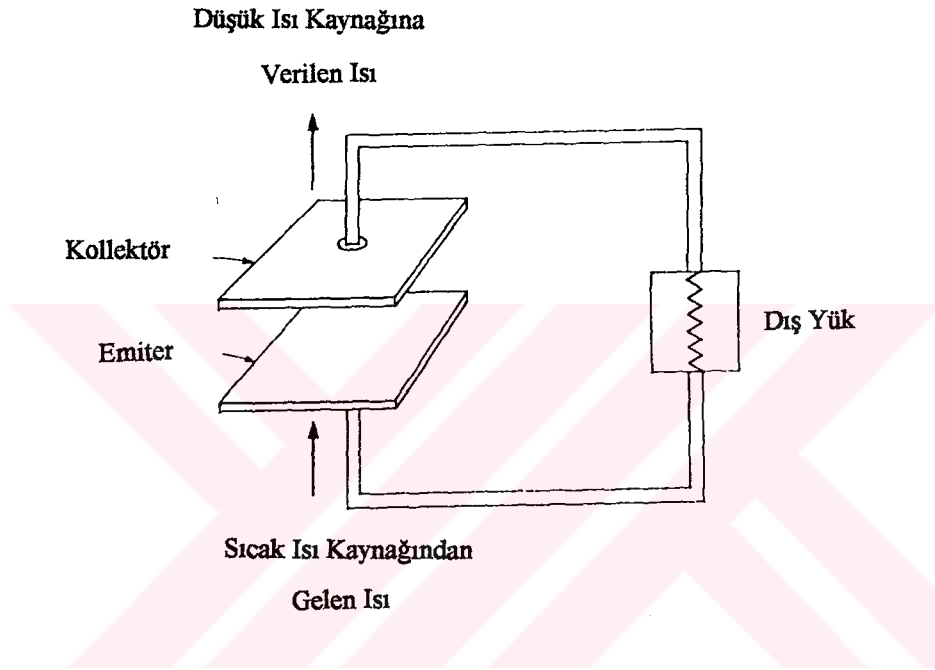
2.3. TERMOİYONİK KONVERTERLER

Termo-iyonik enerji dönüşümü, termo-iyonik emisyonla ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm metodudur. Termoiyonik emisyon olayı 1883 de ilk defa Thomas Edison tarafından bulunmuştur. Prensipte olarak bu araç, elektronları çalışan bir akışkan olarak kullanan bir ısı makinasıdır. Bu dönüşüm, sistemindeki katod (emitter,yayıcı) bölgesindeki metal yüzeylerin ısıtılmasıyla, yeterli enerjiyi alarak metal yüzeyindeki kuvvetleri yenen elektronların, anoda (kollektör,toplayıcı) ya gelmeleri ve burada ısıyı çekilen akışkandaki elektronların enerjilerini kaybetmeleri sonucu, enerji üreten dış devre yükünden geçerek katoda dönerler. Bu dönüşüm metodunu daha iyi kavrayabilmek için termo-iyonik salıverme, tekrar birleşme gibi yüzey olaylarının bilinmesinin yanısıra aynı zamanda yük ile partiküllerin katod ve anot arasında nasıl hareket ettiklerini anlayabilmek için uzay yükü ve transport özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Termoiyonik konverterlerin ısı makinaları olmaları nedeniyle, bu sistemlerin verimliliğinin üst sınırı, katod ve anot sıcaklık limitleri arasında çalışan bir Carnot makinasınınki kadardır. 1800 ° C sıcaklığında bulunan katod ile % 10 civarında bir verim elde edilmiştir. Elektron emisyonu sıcaklığın eksponansiyel bir fonksiyonudur ve bu yüzden yüksek güç yoğunluğu üretebilir. Bir termoiyonik dönüştürücüde 2500 ° C sıcaklığındaki bir katodla % 18 lik verimler elde edilebilmiştir.

Termoiyonik dönüştürücülerin çalışmasıyla ilgili birçok problem vardır. Bu problemlerin başında elektrodlar arasındaki boşlukta elektronların dağılımı gelir. Bu nedenle boşluk için mümkün olduğu kadar mükemmel vakum koşulları sağlandığında, elektrodlar arasındaki boşluğu 0.00254 cm. kadar küçük tutabilmek mümkün olabilmektedir. Aksi halde, engelleyici potansiyel (boşluk yükü etkileri), dönüştürücünün verimli bir şekilde çalışmasını engeller. Fakat bahsedilen bu kadar küçük boşlukları özellikle anot ve katod arasında yüksek sıcaklık farkının bulunduğu durumlarda elde edebilmek zordur. Boşluk yükü etkisini azaltmak ve aynı zamanda makul olan boşluğu koruyabilmek için (0.1016 cm.), son model termoiyonik dönüştürücüler, elektrodlar arasındaki boşlukta sezyum gazı kullanırlar. Boşluk yükü problemine ek olarak, termoiyonik dönüştürücü performansı, katottan anoda ışınım ve iletim yoluyla kaybolan

ısı nedeniyle azalır. Bu nedenlerden dolayı, bir termoiyonik dönüştürücüde yüksek verimler elde edebilmek için, boşluk yükü etkisini düşürmek, radyasyon ve kondüksiyonla olan ısı transfer kayıplarını minimize etmek ve konverter iç direncini minimumda tutmak gereklidir. Mekanik olarak yapılan dizayn bir termoiyonik dönüştürücünün performansında hayati rol oynar. Şekil 2.3.1 de bir termoiyonik dönüştürücünün şematik görünümü bulunmaktadır (Culp,1991).



Şekil 2.3.1. Bir Termoiyonik Dönüştürücünün Şematik Gösterimi (Culp,1991)

Termoiyonik konverterlerin güç üretimleri, büyük ölçüde dönüştürücülerin yüzey alanları ile ilgilidir. Bu dönüştürücüler bu nedenle hacimsel güç üretimi açısından uygun değildir. Günümüzde klasik kömür yakmalı buhar santralleri 1000 MWe üretirken, birim alan başına en yüksek 25 W / cm^2 gibi oldukça küçük güç yoğunluğuna sahip bu dönüştürücülerin aynı gücü üretebilmeleri için devasa alanlara sahip olmaları gerekir ki bu da pratik olarak görünmemektedir (Sutton,1966).

2.4. KİMYASAL ENERJİNİN ELEKTRİK ENERJİSİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

2.4.1. GENEL SİSTEMLER

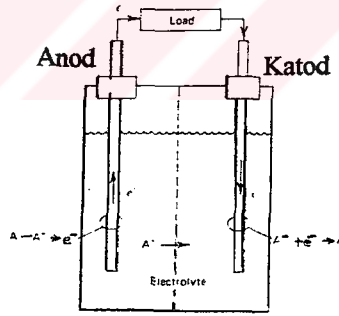
Bataryalar ve yakıt pilleri, depolanan kimyasal enerjinin direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerdir. Enerji dönüşümleri, termal enerji dönüşüm sistemlerinin enerji dönüşümünden farklı olduğundan, bu sistemlerin verimleri Carnot verimiyle sınırlı değildir. Başka bir deyişle, elektrik enerjisine direkt olarak dönüşümün gerçekleştiği kimyasal sistemlerde, ısı dönüşüm prosesinin ve bununla ilgili mekanik enerjinin elektriğe dönüşüm aşamalarının atlanması nedeniyle, elektrik enerjisine yüksek verimlerde dönüşüm mümkün olabilmektedir. Bu nedenle bu sistemler üzerine olan araştırmalar ve ilgi giderek artmaktadır.

Elektrokimyasal dönüşüm ile ilgili ilk çalışmalar, 1801 de Humprey Davy tarafından, karbon ve nitrik asit kullanan bir yakıt pili yapılarak başladı. Yakıt pillerinin esas mucidi ise, diğer bir İngiliz bilim adamı olan William Grove olarak bilinir. Grove 1839 da yaptığı pilde elektrik akımı elde etmeyi başardı. Bundan elli yıl sonra, İngiltere’ de Ludwig Mond ve Carl Langer isimli bilim adamları bugün için bilinen gerçek bir yakıt pili yaptılar. 1954 yılında ise Bacon yüksek basınç pilinin çalışma sonuçlarını yayınladı. Bu tarihten sonra önemi iyice anlaşılan bu sistemler üzerine olan çalışmalar artarak hız kazanmıştır (Angrist,1982) .

Yakıt pilleri enerjilerini kimyasal yakıtlardan alır. Bu piller, kimyasal yakıtlarının sürekli beslendiği ve çıkan kimyasal ürünlerin sürekli alındığı bir pil tipi olarak düşünülebilir. Bateriler ve yakıt pilleri çalışma tarzları ve yapıları bakımından çok benzerdirler. Yapı bakımından normal olarak ikisi de elektrolit bir sulüsyon veya matrisle birbirinden ayrılmış iki elektrod içerirler. En önemli farklılık, yakıt pilleri sürekli bir yakıt kaynağı ile çalışırken, baterilerin sabit miktarda yakıt veya kimyasal enerjiye sahip olmalarıdır ve yakıt pillerindeki elektrodlar sıradan bataryalarda olduğu gibi tükenmez. Bununla beraber kimyasal reaksiyonların ürünleri, reaksiyona giren orjinal maddelere dönüştürülebildiğinden, bazı bateriler tersinirdirler. Tekrar şarj edilebilirler. Ancak yakıt pilleri şarj edilemez.

Bateriler enerji depolama sistemleridir. Bir elektrokimyasal pilde (bateri), enerji kaynağı madde elektron kaybeden elektrottur. Bu elektrod anod olarak isimlendirilir. İndirgenmeye uğrayan diğer madde ise, elektronları üzerinde toplayan katoddur. Bu iki elektrod bir elektrolit sıvı tarafından birbirlerinden ayrılırlar. Bu elektrolit, iyonların karşılıklı geçişini ve dış devrede de elektronların transferini gerçekleştirir. Şekil 2.4.1 de bir elektrokimyasal pilin şematik diyagramı görülmektedir. Bir bateri, iki veya daha fazla miktardaki pilin seri, paralel veya bunların kombinasyonları şeklinde bağlanmalarıyla oluşur. Bateriler birincil tip ve ikincil tip bateriler olarak ikiye ayrılırlar. Bu iki tipin arasındaki farklılıklar kesin olmamakla birlikte en önemli fark, birincil tiplerin şarj edilemez oluşu, ikincil tiplerin ise bilinen otomobillerde kullanılan ve çok defa şarj edilebilen bateri grubunu oluşturduklarıdır. Bateriler çok kullanılan enerji depolama üniteleridir ve kısa sürelerde ve kabul edilebilir sabit voltajlarda yüksek akımlar üretebilirler. Yapıları tek parça halindedir ve az bir bakıma ihtiyaç duyarlar. Günümüzde ise çok az çevre kirliliği riski oluşturmaktadırlar (Devins,1982).

Baterilerin günümüzde kullanılan birçok çeşidi vardır. Bu çeşitlerin oluşumunda, baterilerin kullanım yerleri ve amaçları önemli rol oynar.

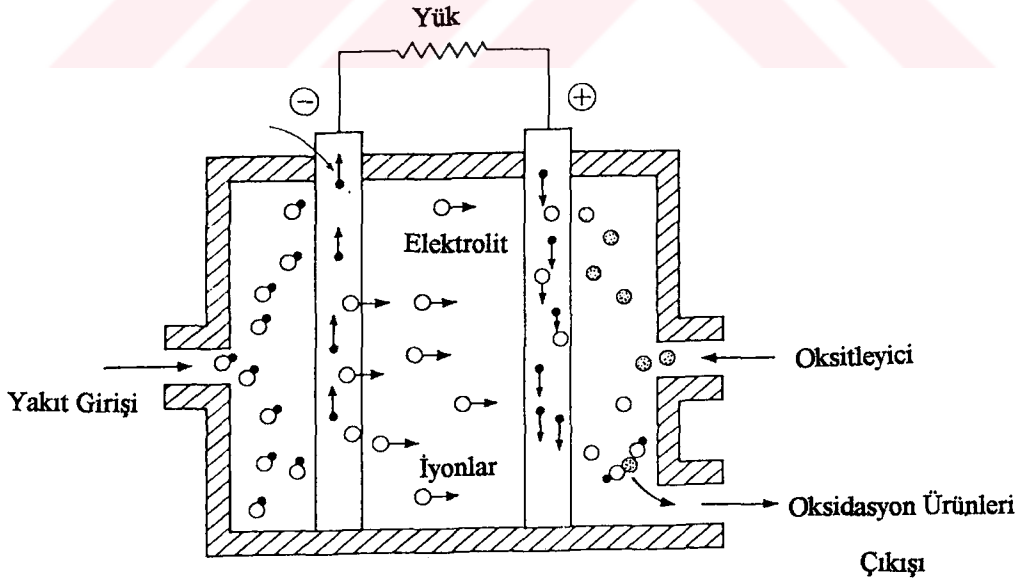


Şekil 2.4.1 Elektrokimyasal Pilin Şematik Görünümü (Devins,1982)

Yakıt pillerinin çalışma prensibi bataryalarda olduğu gibidir. Şekil 2.4.2 de bir yakıt pilinin şematik resmi görülmektedir. Elektrodlar, yakıt durumundaki anottan bırakılır ve katoddaki oksitleyici ile tekrar birleşirler. Elektronlar elektrolit boyunca iyonlarla taşınır ve pilden çıkarılması gereken sabit bir ürünü oluştururlar. Yakıt pilleri

çoğunlukla oksijen ve hidrojen kullanılır. Bu tür yakıt pilleri çeşitli uzay uçuşlarında kullanılmaktadır. Hidrojen-oksijen yakıt pillerinin akım yoğunluğu 10 A/m^2 gibi yüksek değerlere çıkabilmektedir. Bugün için yakıt pillerinin kimyasal enerjiyi, elektriğe dönüştürme verimi % 60 gibi yüksek bir değerdedir. Yakıt pillerinde hidrojenden kaynaklanan problemler doğal gaz, kömür, petrol ürünleri gibi fosil yakıtlarla karşılaştırılmayacak derecede azdır. Fakat, bütün bu üstünlüklerine rağmen, yakıt pillerinin ekonomik olarak yaygın kullanımını sağlamak için çözülmesi gereken önemli sorunları mevcuttur. Bu sorunların başında kullanılan elektrolitin verimli, ucuz olması ve bu elektrolitin yakıt veya oksitleyiciler ile kenar reaksiyonlarına girmemesi gerekmektedir. Yüksek iyonik iletkenliğe sahip elektrolitlerin de korozif olmaması ve kabul edilebilir sıcaklıklarda çalışacak şekilde dizayn edilmeleri gerekmektedir. Bununla beraber yüksek araştırma maliyetleri ve güvenilirliklerini uzun süre koruyamamaları diğer problemleridir.

Sayılan bu problemlerin çözümüne kadar, yakıt pillerinin yüksek güç üreten sistemler olarak kullanılmaları mümkün olmayacaktır. Günümüzde ise yakıt pilleri küçük güç üreten tesislerde, taşınabilir güç kaynakları olarak, uzay sanayinde uydu uçuşlarında kullanılmaktadır.



Şekil 2.4.2 Bir Yakıt Pili'nin Şematik Gösterimi (Devins, 1982)

2.5 FOTOVOLTAİK DÖNÜŞÜM

Güneş pillerinden daha iyi hiçbir araç direkt enerji dönüşüm kavramına bir örnek oluşturamaz. Fotovoltaik güneş pilleri, güneşten ışımayla transfer edilen ısı enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çeviren araçlardır. Güneş ışığının direkt olarak elektrik enerjisine dönüşümü son birkaç on yıl içerisinde mümkün olmuştur. Fakat büyük kapasiteli, verimli, ekonomik araçlar henüz üretilmemiştir.

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlisidir. Dünya yüzeyindeki mevcut güneş enerjisi miktarı potansiyel olarak insanlığın bugünkü enerji ihtiyacından çok daha fazladır. Dünya kabuğu üzerine düşen radyasyon enerjisinin % 30 kadarı kullanım amaçlı potansiyeli ifade eder ve bu potansiyel o kadar büyüktür ki, $24 \cdot 10^7$ milyar kWh enerjiye tekabül eder. Bu değer hidrolik potansiyelin 10000 katına eşdeğerdir (Aybers ve Şahin,1995). Özellikle güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkemiz için bu değerler daha büyük bir önem arz etmektedir. Bununla birlikte, bu enerjiyi kullanmak için korkunç miktarlarda para harcanması gerekir. Bu enerjinin faydalı miktarı ya fotovoltaik araçlar (güneş pilleri), ya da konvansiyonel buhar türbini tesislerinde kullanılmak için termodinamik dönüşümden yaralanılan tesislerde kullanılır. Güneş pillerinde elektriğe dönüşüm verimi yakıt hücrelerinde olduğu gibi klasik ısı makinaları çevrimlerinin verimiyle sınırlı değildir.

Fotovoltaik pillerin çalışma prensibi 1876' da Adams ve Day tarafından keşfedilmiştir. 1919' da, Coblenz, yarı iletken kistallerin karanlık ve aydınlık bölgelerinin arasında bir voltajın oluştuğunu gözlemledi. Bununla birlikte fotoelektrik dönüşüm 1941 yılına kadar pratik olarak uygulanamadı. Bu yıldan sonra fotoelektrik piller üzerine daha başarılı çalışmalar yapıldı (Culp,1991).

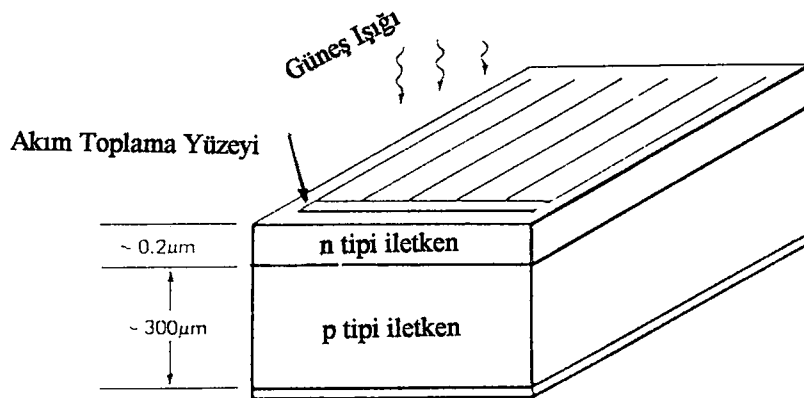
Güneş pillerinin başarılı olarak çalışması p - n tipi yarı iletkenlerin birleşimine bağlıdır. İnce tabakalar halinde üst üste dizilen bu yarı iletkenler üzerine mineral camdan geçen güneş ışınları düştüğünde, tabakalar arasında bir potansiyel farkı doğar ve bu potansiyel farkı bir elektrik akımının oluşmasını sağlar.

Güneş pillerinin dönüşüm verimlerinin ısı makinaları çevrimlerinin termal verimleriyle sınırlı olmadığı belirtilmiştir. Ancak bazı ana kayıplar pillerin performansını

ciddi bir şekilde sınırlamaktadır. Bu kayıpların başında devre kayıpları ve enerji-spektrum kayıpları gelmektedir. Silikon güneş pilleri için devre kayıpları dönüşüm verimini % 50 oranında azaltmaktadır (Devins,1982).

Silikon güneş pilleri, pil kullanımında egemen tip olurken, kadmiyum sülfid, kadmiyum esaslı teller, germanyum, selenyum gibi elementler de bu tip pillerde kullanılırlar.

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren direkt enerji dönüştürücüleri arasında en yüksek verime sahip olanlar, fotovoltaiik güneş pilleridir. Verimleri % 15 ile % 20 arasında değerler alır. Basitlikleri, uzun ömürlü oluşları, seri üretime uygunlukları, ürettikleri güce oranla hafiflikleri, çevreyi kirletmeme avantajları ve hepsinden önemlisi, yenilenebilir ve bedava bir enerji kaynağından beslenerek enerji üretmeleri en büyük özellikleridir. Fakat bu pillerin yapım maliyetlerinin çok yüksek olması ve beraberlerinde şarj edilebilir elektrik enerjisi depolayan araçlara ihtiyaç duymaları kullanımlarını azaltmaktadır. Bugün için hesaplanan birim gücü üretme maliyetleri 12500 \$/kWe gibi klasik enerji üreten sistemlere göre oldukça pahalıdır (Aybers ve Şahin,1995). Bununla beraber yukarıda bahsedilen bazı avantajlarından dolayı uzay ile ilgili uygulamalarda, özellikle dünya çevresinde dolaşan uydulara enerji temin etmede kullanılmaktadırlar. Dünyada ise, enerjinin kolaylıkla ulaştırılmadığı yerlerde radyo ve televizyon gibi araçları çalıştırmada, su pompalamada, deniz fenerlerine enerji temin etmede ve hava alanlarını aydınlatmak amacıyla kullanılmaktadırlar. Şekil 2.5.1 de bir fotovoltaiik pilin şematik resmi görünmektedir.



Şekil 2.5.1 Fotovoltaiik Bir Pilin Şematik Resmi (Granet,1985)

2.6 MHD JENARATÖRLERİN TANITIMI

Son yüz otuz yıl boyunca elektrik, magnetik alan ve sıcaklık arasındaki etkileşimleri veya katılardaki elektron yoğunluğu farklılığını kullanışlı hale getiren birçok araç yapılmıştır. Fakat bu araçların çoğunun bizim enerji dönüşüm ihtiyaçlarımıza olan katkı potansiyeli sınırlı kaldı. Bu noktada termal enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine çok yüksek bir verimle dönüştürebilecek bir araç vardır ki bu araç magnetohidrodinamik jenaratördür. MHD jenaratörler büyük çapta elektrik enerjisi üretimi için umut vadeden yöntemlerden biridir. Tablo 2.6.1, büyük çapta elektrik enerjisi üretiminde MHD jenaratörlerin uygunluğunu ortaya koymaktadır. Bu tabloda MHD için maliyet $32.6 \cdot 10^{-3}$ \$/kWh ile en küçüktür ve bu maliyetin içinde ilk yatırım maliyeti, yakıt maliyetleri, bakım masrafları gibi ekonomik maliyetler de dahildir. Tablo 2.6.2 de ise bir firmanın verdiği verimler görülmektedir. MHD için görülen % 48.3 veriminin, % 60' a ulaşacağı belirtilmektedir. Kombine bir sistem kullanılması halinde ise bu verimin % 80 lere ulaşması ve hatta bu değerinde üzerine çıkması olasıdır. Bu nedenle MHD büyük miktarlarda elektrik enerjisi üretiminde temel dönüşüm yöntemi olacaktır. Gelecekte ise füzyon enerjisinin gelişmesi durumunda da en uygun bir yöntem olması nedeniyle ideal elektrik enerjisi üretim yöntemi olacaktır. Temel ve tepe yüklere uygun, kolay servise alınıp çıkarılabilmeleri, maliyeti, işletmesi ve bakımı daha ucuz ve ekonomik en yüksek verimli bir yöntem olarak MHD, enerji sistemleri için kaçınılmaz bir tercih nedeni olmaktadır. Bütün bu üstün özelliklerinin yanında MHD jenaratörler bir hacimsel güç araçları olup, diğer klasik enerji ve direkt enerji dönüşüm metodlarındaki alan sınırlaması bunlar için sözkonusu değildir. Bugün için MHD jenaratörlerin hacim başına güç üretimleri 100 MW/m^3 ü bulduğundan örnek olarak 1000 MW_e güç üreten bir buhar santralinin ürettiği bu gücü MHD jenaratör 10 m^3 gibi oldukça küçük bir hacimde üretebilir. Aynı zamanda MHD jenaratörlerde yüzbin voltlar mertebesine ulaşan gerilimler söz konusu iken, bu değer diğer direkt enerji dönüşüm metodlarında birkaç voltun üzerine çıkamamaktadır (Sutton,1966) .

Tablo 2.6.1 Muhtelif Yakıtlı Enerji Santrallerinde Elektrik Maliyeti

Buhar santrali (referans)	44.5 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
MHD	32.6 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
CCGT / 1649 ° C / Lbtu	34.2 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
Buhar / AFB / 538 ° C / 538 ° C	36.9 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
Buhar / PFB / 538 ° C / 538 ° C	38.0 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
Buhar / AFB / 538 ° C / 650 ° C	38.5 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
CCGT / 1316 ° C / Lbtu	38.7 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
MCFC	39.0 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
Potasyum üst çevrimli	40.9 (*10 ⁻³ \$ / kWh)
Helyum üst çevrimli	48.6 (*10 ⁻³ \$ / kWh)

MCFC : Karbonat eriyikli yakıt hücresi,

MHD : Magnetohidrodinamik,

CCGT : Kombine çevrimli gaz türbini,

AFB : Atmosferik akışkan yataklı,

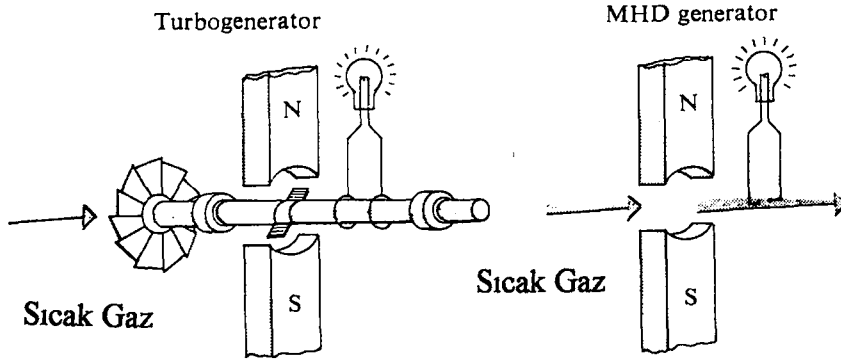
PFB : Basınçlı akışkan yataklı.

Tablo 2.6.2 Muhtelif Enerji Santralleri İçin Verim Değerleri

Santral	Kademe (MWe)	Yaklaşık ısı kademesi kj / kWh	Verim %
Karbonat eriyikli yakıt hücreleri	635	6950	49.6
MHD	1932	7050	48.3
Potasyum üst çevrim	996	7650	44.4
Kombine gaz türbini 1649 ° C / Alçak Btu	640	8650	44.0
Helyum Çevrimli	476	8550	39.9
Kombine gaz türbini 1316 ° C /Alçak Btu	585	8550	39.6
Buhar/Basınçlı akışkan yataklı 538 ° C / 538 ° C	904	8550	39.2
Buhar/atm. Akışkan yataklı 538 ° C / 649 ° C	843	9350	37.0
Buhar/atm. Akışkan yataklı 538 ° C / 538 ° C	814	9700	35.0
Buhar santrali	747	10500	31.6

Klasik jenaratörlerde olduğu gibi MHD jenaratörlerde de bir iletkenin magnetik alandaki hareketi ile elektrik enerjisi üretiriz. Ancak klasik jenaratörlerde söz konusu olan iletken bakır teller, yani bir katı iletken iken, MHD de yapısında molekül, iyon, elektron, nötr parçacıkların bulunduğu, kısmen iyonize olmuş ve akış halindeki sıcak bir gazdır.

Şekil 2.6.1 bir klasik jenaratör ve MHD jenaratörü arasındaki enerji dönüşümü farkını kısaca ortaya koymaktadır.



Şekil 2.6.1 Klasik jenaratör ve MHD jenaratörün şematik gösterimi (Angrist,1982)

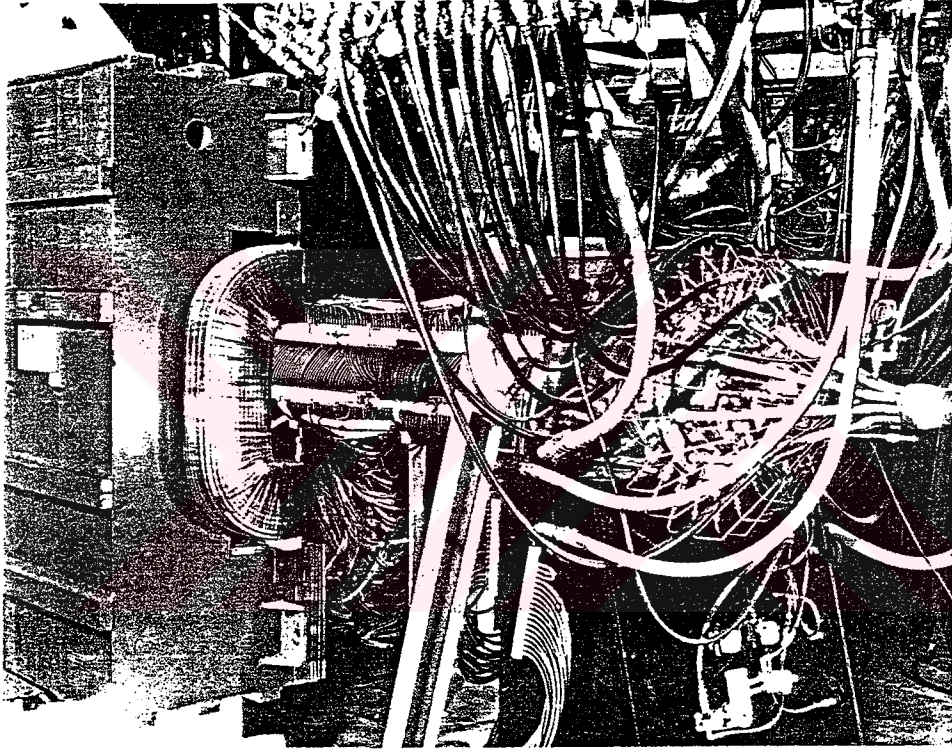
Bu şekilden de görüldüğü gibi, klasik elektrik enerjisi üreten santrallerde ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü iki aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşamada ısı enerjisi genişmeli bir makina olan türbin aracılığı ile mekanik enerjiye dönüştürülür. MHD jenaratörlerde ise ısı enerjisi elektrik enerjisine tek kademede yani direkt olarak dönüştürülür. MHD jenaratörler genişmeli makinalardaki gelişimin bugünkü en son adımını oluşturmuş bulunmaktadır.

Pistonlu makinalardan türbinli makinalara geçildiğinde, valflerin, kamların ve kaymalı yatakların kalkması gibi, türbinli makinalardan MHD jenaratörlere geçildiğinde türbin kalkıp yalnızca kanal kalmakta, türbin kanatçıklarının yerini magnetik kuvvet çizgileri almaktadır (Rosa,1973).

MHD jenaratörlerinden oldukça yüksek verimler elde edilebilir. Bunun nedeni MHD jenaratör içerisinde çok yüksek sıcaklıktaki gazın kanal içerisinde kullanılabilmesidir. Oysa, türbinlerde sıcaklığın sınırlı olması bir dezavantaj oluşturur. MHD jenaratörler bugün olmasa bile, teknolojiadaki ilerlemelere paralel olarak, bir füzyon reaktörünün plazmasını oluşturduğu çok yüksek sıcaklıklarda bile kullanılabilirler (Rosa,1973).

Bununla beraber MHD jenaratörlerin türbinlere göre üstünlükleri, türbinlerin pistonlu makinalara karşı olan üstünlüklerine benzer. Türbinli makinalar basitlikleri, güç kapasiteleri ve güvenilirlikleri açısından pistonlu makinalardan üstündürler. Buna benzer

tarzda, yapısı daha basit olan MHD jenaratörler yüksek güç kapasiteleri ve güvenilirlikleri açısından da türbinli makinalara üstünlük sağlamaktadırlar. Şekil 2.6.2 de 200 MW gücündeki bir MHD jenaratörün bir kısmı görülmektedir. Bu ünite 1978 tarihinde beşyüz saat kadar işleme alınmıştır (Devins,1982).



Şekil 2.6.2 200 MW gücündeki MHD jenaratör (Avco Everett Research Labrotory)

2.6.1 MHD JENARATÖRLERİN TARİHÇESİ

MHD jenaratörlerin tarihçesi, Faraday' ın 1830 lu yıllarda yaptığı deneylere dayanır. Faraday elektromagnetik indüksiyon olayının katı iletkenler için geçerli olduğu kadar, akışkan iletkenler için de geçerli olduğunu farketmiştir. Fakat henüz bu tarihlerde termodinamik ve gaz dinamiğinin temelleri atılmamış olduğundan, konuyla ilgili gerekli prensipler ve formülasyonlar ortaya konamamıştır. Daha sonraları, fizik bilimindeki ilerlemelere paralel olarak, 1910 yıllarında MHD konusunda ilk patentler alınmaya başlanmıştır (Yükseler,1987).

Westinghouse Electric Corporation 1940 yılında büyük bir MHD jenaratör imal ettiyse de, özellikle MHD kanal içinde akan gazların iyonize olmaları ile ilgili bilgilerin yeterli ve tam olarak bilinmemesi sonucunda başarılı olunamamıştır. Magnetohidrodinamiğin bir bilim dalı haline gelmesinde, astrofizik olaylarının incelenmesi önemli katkılar getirmiştir. Örneğin Doppler etkisi ve fizikte popüler bir konu olan özel görecelik kuramının ortaya atılması, MHD konusundaki çalışmalara değişik bir boyut kazandırmıştır. MHD jenaratörler üzerine yapılan çalışmaların ve araştırmaların bugünkü orijinalini ise Cornell Üniversitesinde (Newyork, ABD) Arthur R.Kontrowitz tarafından İkinci Dünya Savaşı sırasında yapılan çalışmalara ve bu konuda verilen derslere dayanmaktadır (Yükseler,1987).

Yapılan bu çalışmalar daha sonraları Avco Everett Research Labrotory (AERL) 'e iletilmiş, ABD' de 1959 yılında ilk deneysel MHD jenaratör yapılmıştır. 11.5 kW gücünde, kullanılan argon plazma jeti 3000 °K sıcaklığında olan ve 40 segman elektrodlu bu jenaratör başarıyla işletilmiştir. 1960 yılında Westinghouse yaklaşık aynı büyüklükte bir jenaratör daha geliştirmiş, iletkenliği artırıcı katkı maddeleri kullanılmış ve bu jenaratörü bir saat sürekli çalıştırmayı başarmıştır. Daha sonraları AERL tarafından aynı yılın ortalarında biri 32 MW, diğeri 78 MW gücünde MKV ve LORHO olarak adlandırılan iki büyük deneysel MHD jenaratör yapılmıştır. 1978 yılında, Avco Everett araştırma laboratuvarlarında 200 MW gücünde bir MHD jenaratör yapılmış ve bu jenaratör 500 saat aralıksız çalıştırılmıştır. Bu MHD jenaratöre ait resim Şekil 2.6.2 de görülmektedir (Rosa,1973). Bu tür tesislerin kurulması ve araştırmaların

yoğunlaştırılması, MHD jeneratörlerin problemlerinin, performans değerlerinin ve işletiminde çıkan birtakım sorunların daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmuş ve konuyla ilgili bilgi ve veri birikimi sağlanmıştır.

MHD jeneratörü konusunda yapılan çalışmalar sürdükçe, bu çalışmalardan elde edilen zengin bilgi birikimine paralel olarak süper iletken mıknatıslar, hava ön ısıtma sistemleri, katkı geri kazanma sistemleri, çevre kirliliği kontrol sistemleri gibi birçok sistemler geliştirilmiştir.

ABD’ de ise MHD jeneratörler üzerine yapılan çalışmalar, hem devlet hem de özel sektör tarafından finanse edilmektedir. Çalışmaları yürüten kuruluşlar arasında Edison Electric Institute, American Public Power Association, Avco Corporation, Westinghouse Corporation, Arnold Engineering Development, The Office of Coil Research of the Interior Department ve Savunma Bakanlığı da vardır.

1960 ‘ lardan bu yana Amerikan Enerji Bakanlığı (DOE), ticari MHD jeneratörleri ile ilgili araştırmalara milyonlarca dolar harcamıştır. Harcama yapılan en yüksek tutar yılda 70 milyon \$ olmuştur. Enerji bakanlığının 1986 bütçesinde MHD çalışmalarına ayırdığı ödenek miktarı yaklaşık olarak 28.5 milyon \$ olmuştur (Sheparel,1987). Son yıllarda ise bu ödenek miktarlarında önemli derecede kısıtlamalara gidilmiştir. Bunu nedeni, devletin artık kömür yakmalı MHD santrallerinin araştırma safhasının tamamlanmış ve uygulanabilir olduğunun görülmüş olduğu fikrinde olmasıdır. MHD jeneratörlerin nükleer santrallerde kullanılması ile ilgili pekçok araştırma yapılmıştır ve kurulacak gösteri amaçlı santrallerle uzun yıllar işletilerek pratik oldukları gösterilebilecektir (Sheparel,1987).

MHD jeneratörler üzerine Sovyetler Birliğinde de birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bu ülkede 25 MW_e gücünde doğal gazlı MHD öncü santral işleme açılmıştır. Bu santral direkt olarak Moskova elektrik şebekesine bağlıdır (Rosa,1973). Sovyetler Birliğinde daha sonraları da bu çalışmalara önem verilmiş ve bu defa araştırma amacıyla değil ticari amaçla ilk defa 500 MW’ lık kömür yakmalı MHD jeneratör hizmete sokulmuştur. Bütün bu çalışmalara ek olarak diğer gelişmiş ülkelerde konunun önemi doğrultusunda MHD teknolojisini kullanmaya başlamışlardır. Bu ülkelerin içerisinde Japonya ve Almanya da bulunmaktadır. Almanya Nükleer Enstitüsü (KFA) tarafından propan yakmalı, uzun

sürelî çalışan küçük bir model üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Diğer bir çalışma Alman endüstri devlerinden M.A.N. tarafından 1 MW_e lik kısa süreli çalışan bir model olarak üretilmiştir. 3 MW_e lik doğal gaz yakmalı diğer bir MHD santral Polonya' da Swierk' te Nükleer Araştırma Enstitüsü tarafından işletilmektedir (Rosa,1973).

Askeri alanda ise darbeli MHD teknolojisi, stratejik savunma silahlarına kısa süreli yüksek güç kaynağı sağlama sistemi olarak geliştirilmektedir. Katı veya sıvı yakmalı roket motorlarında ilk hareketi vermek için kullanılan darbeli MHD jenaratörler, birkaç saniye için 10 MW veya daha kısa bir süre için 1 GW gibi büyük bir gücü üretebilirler. Böylelikle bu güç kaynakları, kısa süreli yüksek güç ihtiyacı olan laserler ve güçlü silahlar için kullanılabilirler. Stratejik savunma silahlarında (SDI), darbeli MHD sistemlerinin kullanımı için DOE - Pittsburg Energy Technology Center tarafından bir araştırma başlatılmıştır.

Günümüzde ise, başta Sovyetler Birliği ve ABD olmak üzere, İngiltere, Fransa, Japonya, Almanya, Polonya gibi pekçok ülkede MHD sistemleri üzerine oldukça büyük çalışmalar yapılmaktadır.

3. MHD JENARATÖRLERİN YAPISI VE MHD ENERJİ DÖNÜŞÜM PRENSİBİ

Daha önce ifade edildiği üzere, bilinen jenaratörlerde olduğu gibi MHD jenaratörlerde de bir iletkenin magnetik alandaki hareketi ile elektrik enerjisi üretilir. Klasik jenaratörlerde bu iletken bakır teller, diğer bir deyişle katı bir iletken iken, MHD de yapısında molekül, iyon, elektron ve nötr parçacıkların bulunduğu kısmen iyonize olmuş ve kanal içinde akış halindeki sıcak bir gazdır. Bununla beraber her iki olayda da fiziksel esaslar aynıdır. Şekil 3.1 de basitleştirilmiş bir MHD jenaratör şeması ve Şekil 3.2 de de MHD jenaratör prensip şeması görülmektedir. İçinden sıcak gazın aktığı dikdörtgen kesitli bir kanal ve bu kanalın karşılıklı iki kenarında magnetik alan oluşturan kutuplar, diğer iki kenarda da elektrotlar vardır. Böylelikle kanalda akan gazların doğrultusu, magnetik alan doğrultusu ve elektrik alan doğrultusu birbirlerine dik üç doğrultu oluşturmaktadırlar. Plazmadaki basınç ile magnetik alanın müşterek etkileri, gaz akışındaki ısı genleşmesi ile oluşan kinetik enerjinin, eğer uçlar kapalı ise dış devrede bir elektrik enerjisi dönüşümüne neden olur. Bu olay daha açık olarak şu şekilde izah edilebilir :

Miknatislarca oluşturulan enine alan, gaz akışındaki yüklü parçacıkların yavaşlamasına neden olur. Elektronlar enine oluşmuş bu güçlü alanın eksenine etrafında dairesel bir yörüngede dönmeye zorlanır. Bu etki Lorentz kuvveti nedeniyledir. Bir B magnetik alanında q yükü ve v hızı ile hareket eden iletken, Faraday ın elektromagnetik indüksiyon kanunu gereği,

$$\vec{E}_{ind} = \nabla \times \vec{B} \quad (3.1)$$

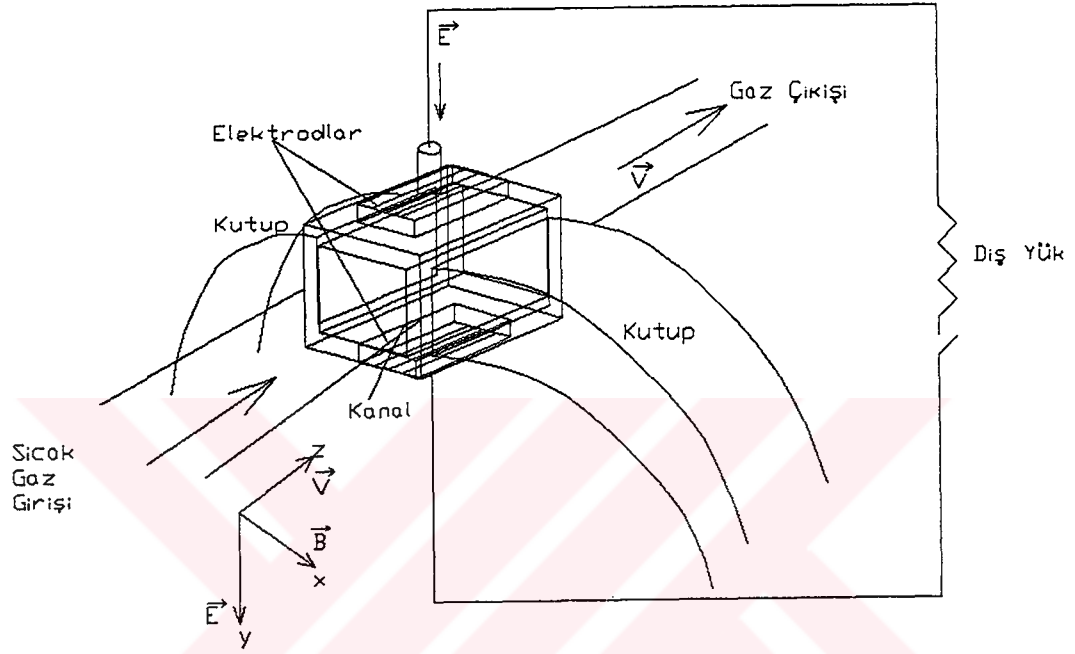
ile ifade edilebilen bir \vec{E}_{ind} elektrik alanı,

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \cdot \vec{E}_{ind} \quad (3.2)$$

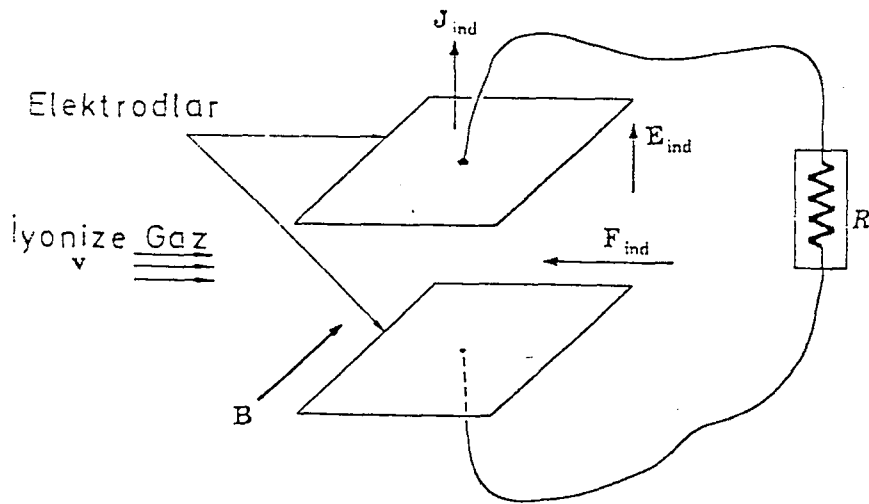
şeklinde ifade edilebilen \vec{J}_{ind} akım yoğunluğu ve

$$\vec{F}_{ind} = \vec{J}_{ind} \times \vec{B} \quad (3.3)$$

ile gösterilebilen bir \vec{F}_{ind} elektromagnetik kuvvetini indükleyecektir. (3.2) eşitliğinde görülen σ , elektriksel iletkenliği göstermektedir.



Şekil 3.1 Basitleştirilmiş MHD Jenaratör Şeması (Angrist,1982)



Şekil 3.2 MHD Jenaratör Prensip Şeması (Spiring,1965)

Bu bağıntılar MHD jenaratörün elektrodları arasında \vec{B} magnetik alanında \vec{v} hızıyla hareket eden, kısmen iyonize olmuş iletken gaza uygulanırsa, iletken gaz, (3.1) eşitliği ile verilen \vec{E}_{ind} elektrik alanına maruz kalır. Bu elektrik alanıyla yüklenen elektrodlar arasında da \vec{E} elektriksel alanı oluşur. Böylelikle iletken gaz ($\vec{E}_{ind} + \vec{E}$) gibi bir toplam elektrik alanında hareket eder. (3.2) eşitliği yardımıyla \vec{J} akım yoğunluğu,

$$\vec{J} = \sigma.(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Gaz üzerine etki eden toplam kuvvet ise,

$$\vec{F} = \sigma.(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{v} \quad (3.5)$$

olarak ifade edilebilir. (3.5) ifadesinde gaz üzerine etki eden bu kuvvet daha önce sözü edilen Lorentz kuvvetidir.

MHD jenaratörde için yazılan bu kavramları daha iyi analiz etmek için bir boyutlu yaklaşımı kullanıp, basite indirgenmiş bu yaklaşımla kanal içindeki olayları incelemek yerinde olacaktır. Aslında viskozitenin varlığı nedeniyle kanal içindeki olaylar üç boyutludur. Fakat gerek iki boyutlu halde ve gerekse üç boyutlu durumda, denklemler ve olay son derece karmaşık ve içinden çıkılmaz bir hal almaktadır.

Bu sebeplerden dolayı ;

$$\vec{B} = B(0, B_y, 0), \vec{E} = E(0, 0, E_z), \vec{v} = v(u, 0, 0) \text{ olarak alınırsa,}$$

Toplam akım,

$$J = \sigma.(u.B - E) \quad (3.6)$$

(Spiring, 1965) şeklinde ve kuvvet,

$$F = \sigma.(u.B - E).B \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir. (3.6) denklemini Ohm kanununun bir magnetik alanda bulunması durumundaki skaler şeklidir ve Maxwell denklem takımının bir denklemdir. Bağlıntıdan da görüleceği üzere σ 'nın yüksek olması, akım yoğunluğunun dolayısıyla üretilen elektrik enerjisinin fazla olmasını sağlayacağından, σ değerinin büyük olması için çok yüksek sıcaklıklarda çalışmak ve daha sonra da anlatılacağı üzere, gazın iletkenliğinin çeşitli metodlarla artırılması gerekmektedir.

MHD kanalındaki güç yoğunluğu ise,

$$\dot{W} = E.J = \sigma.E.(u.B - E) \quad (3.8)$$

ya da,

$$\dot{W} = \frac{J}{\sigma} . (\sigma.u.B - J) \quad (3.9)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada $J.E$ gazdan alınan elektriksel güç yoğunluğunu yani üretilen gücü gösterir. (3.6) ve (3.7) ifadelerinin uygun tarzda birleştirilmeleri sonucunda,

$$-\frac{J^2}{\sigma} + J.E = J.u.B \quad (3.10)$$

eşitliği elde edilebilir. Burada da J^2/σ gazın birim hacmi başına Joule kayıplarını, $J.u.B$ ise gaza verilen toplam elektriksel gücü ifade etmektedir.

Buradan hareketle MHD jeneratörünün elektriksel verimini,

$$\eta_e = \frac{J.E}{J.u.B} = \frac{E}{u.B} \quad (3.11)$$

şeklinde bulabiliriz (Spiring, 1965).

3.1 KANAL GAZLARININ ELEKTRİKSEL İLETKENLİKLERİ

Önceki bölümde ifade edilen (3.6) denkleminde görüleceği üzere σ (elektriksel iletkenlik) nin artırılması, MHD jeneratörlerde gazın iyonize olması ve elektrik üretiminin sağlanması açısından büyük öneme sahiptir. Bu yüzden bir gazın elektriği iletebilmesi için mutlaka iyonize olması gerekmektedir. MHD jeneratörlerde elektrik iletkenliğini arttırmanın bir yolu, ısı iyonizasyonunun kullanılmasıdır. Isı iyonizasyondan kasıt gazın sıcaklığını mümkün olduğunca yükseltmektir. Sıcaklığı artan gazda, partiküllerin kinetik enerjileri artar. Sıcaklık yeterli değere ulaştığında, bir elektron bir moleküle çarparak onu iyonize edebilir. Zincirleme olarak devam edecek olan elektron - molekül çarpışmaları, daha fazla molekülün iyonize olmasını sağlar ve gaz iyonize olur. MHD kanal içinde kullanılacak olan gazların enerji üretebilmeleri için, minimum iletkenlik 10 mho/m mertebesinde olmalıdır(Andersen et.al,1977). Herhangi bir klasik jeneratörle karşılaştırma yapılacak olursa; sargılardaki bakır malzemeye göre gaz iletkenliği 10^6 kere daha düşüktür. Metalik elemanların katkı şeklinde bulunmasıyla, iletkenliği yükseltmek mümkündür. Hava, CO, CO₂ gibi gazlar ve asal gazlar 4000 °K' ı aşana kadar yeterli ölçüde iyonize olamamaktadırlar. Kanal malzemelerinin yüksek sıcaklıkta tahribini önlemek ve malzeme teknolojisinin sınırları içerisinde iyi bir iletkenlik elde etmek için, gaza bazı katkı maddeleri eklenir. Yapılan bu işlem katkılama olarak adlandırılır. Katkı maddelerinin iyonizasyon potansiyelleri en düşük olan maddelerden seçilmesi, gazı iyonize etmek için verilecek enerjinin minimum olmasını sağlayacaktır. Bu nedenle katkı malzemeleri olarak iyonizasyon potansiyeli düşük olan Cs (sezyum), Na (sodyum), K (potasyum) gibi alkali metaller ve tuzlarının kullanılması yerinde olur. Bütün bu katkı malzemeleri içinde iyonizasyon potansiyeli en düşük olan element sezyumdur. Fakat bu elementin çok pahalı olması, MHD jeneratörlerde bugüne kadar genellikle, ucuz olan potasum tuzlarının kullanımının yaygınlaştırmıştır. Tablo 3.1 çeşitli element ve bileşenlere ait iyonizasyon enerjileri hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 3.1. Bazı Gazların Moleküler Kütle ve İyonizasyon Enerjileri (Sutton,1966)

Gaz	Moleküler Kütle	İyonizasyon Enerjisi (ev)
Asal Gazlar		
Helyum	4.03	24.46
Neon	21.83	21.47
Argon	39.40	15.68
Kripton	83.70	13.93
Ksenon	130.20	12.08
Genel Gazlar		
H	1.008	13.53
H ₂	2.016	15.60
N	14.008	14.48
N ₂	28.016	15.51
O	16.00	13.55
O ₂	32.00	15.51
CO	28.01	14.10
CO ₂	40.02	14.40
NO	30.008	9.50
Metal Buhar		
Lityum	6.940	5.363
Sodyum	23.00	5.12
Alüminyum	26.97	5.96
Potasyum	39.10	4.318
Kalsiyum	40.80	6.09
Rubidyum	85.48	4.16
Sezyum	132.91	3.87
Baryum	137.36	5.19

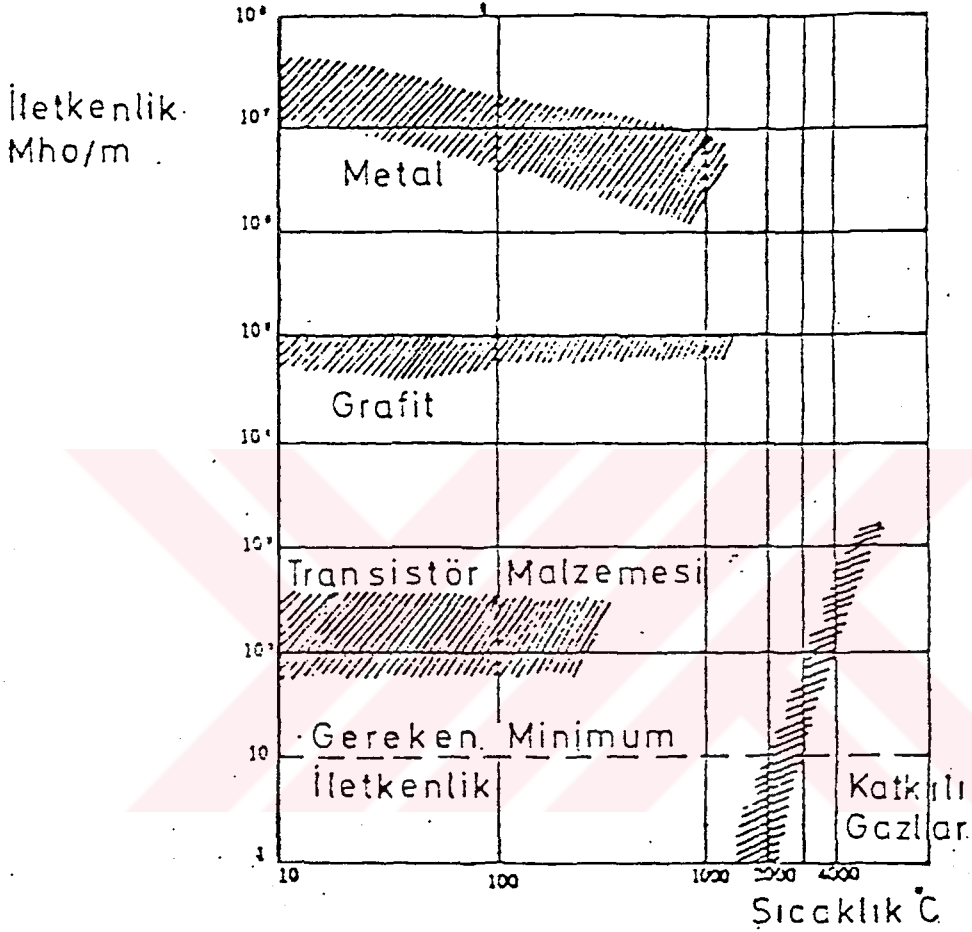
Bütün bunlarla beraber, elektron yoğunluğunu arttırmak tek başına iletkenliği arttırmayabilir. Burada bir mukayese sağlamak amacıyla diğer bazı malzemelerin iletkenlikleri Tablo 3.2 de, bu iletkenliklerin sıcaklıkla değişimleri ise Şekil 3.1.1. de verilmiştir.

Tablo 3.2 Bazı Malzemelerin İletkenlikleri

Malzeme	İletkenlik (mho / m)
Bakır	$6 \cdot 10^7$
Karbon	$3 \cdot 10^4$
Yarı iletkenler	10^{-3} ile 10^6 arası
Tuzlu su (doymuş)	20
Porselen	10^{-9}
Bakalit	10^{-10}
Sert lastik	10^{-16}

Tablo 3.2 ve Tablo 3.3 den de görüleceği üzere, yukarıda da bahsedildiği gibi, gaze yalnızca katkı malzemeleri eklenerek iletkenlik arttırılmaz. MHD jenaratörünün klasik jenaratörlerde olduğu gibi hareketli parçaları olmadığından, yüksek iyonizasyon temini için yüksek sıcaklıklara çıkmak, klasik jenaratörlerde olduğu gibi büyük sıcaklık problemlerine neden olmayacaktır. Özellikle füzyon olayında yeterli gelişmeler sağlanır ve yüksek sıcaklıktaki gaz bir magnetik alan içinde korunabilirse, sıcaklık istenildiği gibi arttırılabilir. Klasik jenaratörlerde hareketli parçaların olması durumunda yüksek sıcaklıklara çıkmak birçok büyük problemlere neden olur. Yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliği MHD jenaratörlerin en önemli özelliklerinden biridir. Sistemde hareketli parçaların olması, sürtünmelere, mekanik titreşimlere, elektriksel büyüklüklerde osilasyon ve form değişikliklerine, gürültüye, aşınmalara ve böylelikle ısı, malzeme, enerji kayıpları ve çevre kirliliği oluşturmakta, sistemin ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Büyük miktarda enerji üreten bir MHD jenaratörde, eğer çalışma süresi uzun değilse veya

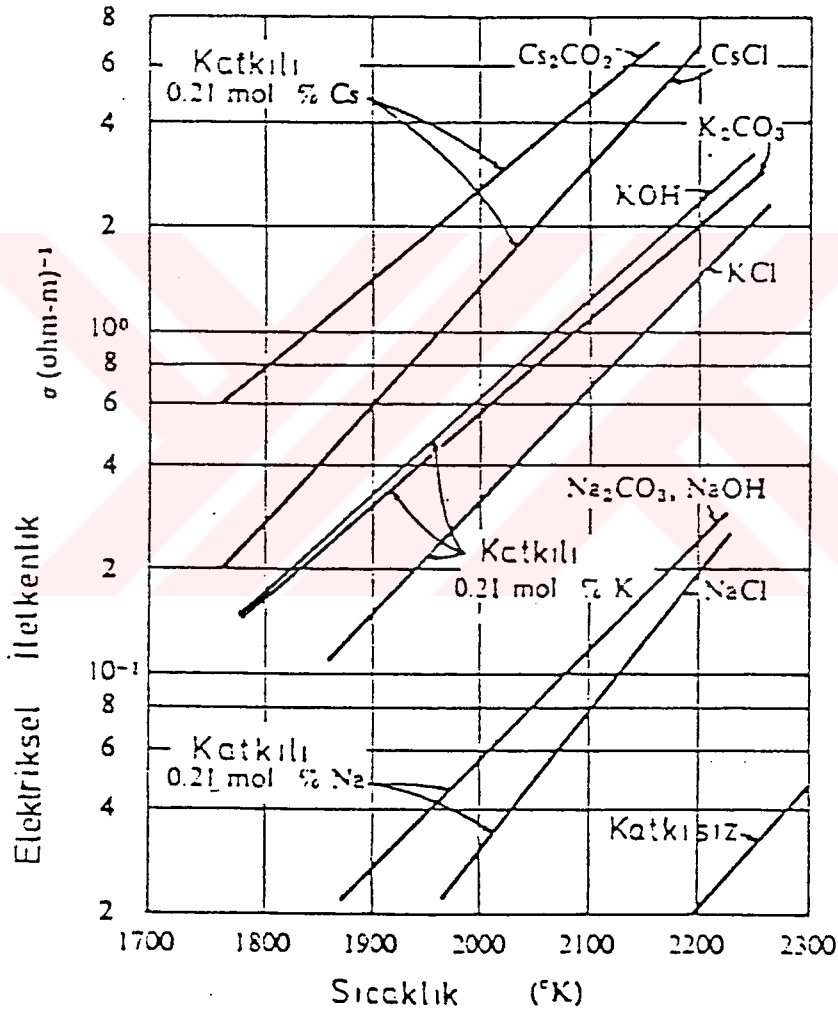
kanal duvarlarını soğutulması aşırı ısı kayıplarına neden olmuyorsa, sıcaklık 3500 ° C lara kadar çıkarılabilir. Böylece hem gazın iyonize edilme problemi çözülmüş olur, hem de sistemin verimi büyük ölçüde artar.



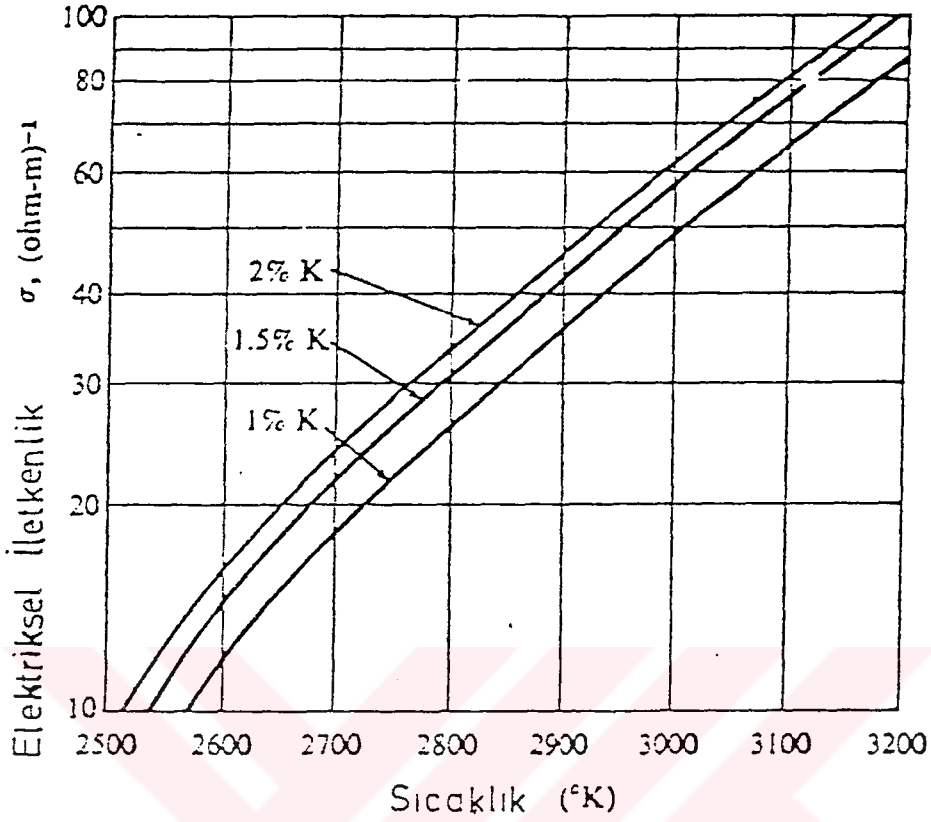
Şekil 3.1.1 Değişik Malzeme İletkenliklerinin Sıcaklıkla Değişimi

Bununla beraber, bugünün teknolojisinde kanal içinde yüksek sıcaklıkların kullanımı, kanal malzemelerinin süratle tahrip olmasına da sebebiyet verebilir. Bu nedenle, gerekli iletkenlik düşük sıcaklıklarda ısı olmayan iyonizasyon teknikleriyle elde edilmeye çalışılmıştır. Fakat bugüne kadar denenen bu tür yöntemler, gazı ısı yöntemler kullanarak iyonize etme derecesinde başarıya ulaşmamıştır. Burada göz önünde bulundurulması gereken en önemli husus, iletkenliğin yalnız katkılama ile değil, sıcaklıkla

doğrudan bağlantılı olduğudur. Pratikte de 1800 ° C ile 2000 ° C in altındaki sıcaklıklarda katkı yapılmasına rağmen, gaz iletkenliğini kaybedebilmektedir. Şekil 3.1 de değişik katkı maddeleriyle katkılanmış bileşiklere ait sıcaklık - iletkenlik eğrileri görülmektedir (Angrist,1982). Şekil 3.2 de ise değişik oranlarda katkılanmış yanma ürünlerine ait sıcaklık - iletkenlik eğrileri görülmektedir(Angrist,1982).



Şekil 3.1. Değişik Katkı Malzemeleri Eklenmiş Bileşiklere Ait Sıcaklık-İletkenlik Değişimi (Angrist,1982)



Şekil 3.2. Potasyum Katkılı Yanma Gazlarının Sıcaklık - İletkenlik Eğrileri
(Angrist,1982)

MHD jeneratörlerde iyonizasyonu artırmanın bir tekniği de çok yüksek yoğunluklarda gazdan akım çekmektir.

Diğer bir yöntem ise, dış bir kaynaktan gaza ihtiyaca göre elektron enjekte etmektir. Nükleer reaktörlerde ise yoğun radyasyon akısını gazın iletkenliğini arttırmak için kullanmak ise diğer bir çözüm yoludur.

MHD jeneratörlerde, gazın iletkenliğini arttırmak için uygulanan bütün bu yöntemler, tek başına iyonizasyonu arttırmada bir çözüm oluşturamayabilir. Buradaki diğer önemli problem, bu elektron yoğunluğunun gaz jeneratörden geçecek kadar uzun sürdürülebilmesidir. Eğer ısılmayan iyonizasyon teknikleriyle kafi miktarlarda iletkenlik temin edilebilirse, çok yüksek sıcaklıklara gerek kalmayacak ve kanal malzemelerinin tahrip olma problemleri büyük ölçüde çözülecektir.

3.2 MHD JENARATÖR KANALI

Bölüm 3. de de anlatıldığı gibi, bir MHD jenaratör, kanal içinde oluşturulan basınç farkından dolayı içerisinde gaz akışı olan bir kanal, akışa dik doğrultuda magnetik alan oluşturan ve karşılıklı yan duvarlar üzerinde bulunan mıknatıslar, akımı dışarı almamızı sağlayan ve diğer yan duvarlar üzerinde bulunan elektrodlerden oluşmuştur. MHD kanalı güç üretimindeki en önemli elemandır ve verimi çevrimin verimini direkt olarak etkiler(Sheparel,1987).

MHD jenaratör kanalının geliştirilmesi için dünyadaki çeşitli kuruluşlar çalışmalar yürütmektedir. Bunlar arasında Avco Everett Researc Labrotory (AERL), Argonne National Labrotory (ANL) ve Westinghouse, MHD kanal dizaynı ile yıllardır ilgilenmektedirler. Günümüzde MHD kanalda 2500 - 3000 °K gibi yüksek sıcaklıklar kullanıldığından, kanal malzemesinin hızla tahribini önlemek amacıyla kompozit kanal yapısı geliştirilmiştir. Şekil 3.2.1 de bu kanala ait resim görülmektedir. Şekilde alt ve üst duvarlar elektrodlerden, yan duvarlar ise yalıtkanlardan oluşmaktadır. Her iki duvarda su soğutmalı metal elementlerden yapılmıştır. Elektrod duvarlar üzerinde, refrakter malzeme ile doldurulmuş oluklar vardır. Bu olukların genişlikleri ve derinlikleri, gazdan duvarlara olan ısı transferi göz önüne alınarak boyutlandırılır. Böyle bir duvar yüksek sıcaklıklara rahatlıkla dayanabilir. Bununla beraber sıcaklık kanalın tek problemi değildir. Kanalı, kullanılan katkı malzemelerinin korozif etkilerinden de korumak gereklidir. Bütün bu problemler ABD' de ve Sovyetler Birliğinde geliştirilen değişik metedodlarla giderilmeye çalışılmakta ve en yüksek performansı verecek kanal tipi geliştirilmeye çalışılmaktadır.

3.3 MHD JENARATÖRLERDE MİKNATIS

MHD jenaratörlerde klasik ve süper iletken mıknatıslar olmak üzere iki tip elektro mıknatis kullanılmaktadır. Klasik mıknatıslarda bobinler genellikle bakır, bazende alüminyumdur. Yapılan deneylerden bu tip mıknatısların MHD güç santrali çıkışının ortalama % 8 ' ini tüketmekte olduğu görülmüştür (Spiring,1965) .

Mıknatısların ihtiyaç duyduğu doğru akım jenaratör tarafından direkt olarak sağlanır. Bobinlerde meydana gelen ve Joule kayıplarının doğurduğu güç kaybı, soğutmayla azaltılabilir. Fakat bu durumda soğutucu da bir miktar güç çekecektir.

Son yıllarda, yüksek magnetik alan şiddetlerinde süperiletken özelliklerini sürdüren malzemeler keşfedilmiştir. MHD jenaratörlerde yüksek güç üretimi için, daha önce anlatıldığı gibi, kuvvetli magnetik alanlara ihtiyaç vardır. Bu alanı sağlamak için de süper iletken mıknatıslar gereklidir. 1970 ' lerden beri süperiletken mıknatıslarla ilgili birçok başarılı çalışma yapılmıştır.

Süper iletken mıknatıslar, MHD güç sisteminin en pahalı parçasını oluşturmaktadırlar. Bununla beraber mıknatis seçilirken, istenen magnetik alan, güç kayıpları ve mıknatısın maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır.

3.4 MHD JENARATÖR TIPLERİ

MHD jenaratörleri, elektrod tiplerine ve kanal geometrilerine göre iki ayrı kısma ayırmak mümkündür.

Elektrod Tiplerine Göre MHD Jenaratörler:

- 1- Sürekli Elektrodlu MHD Jenaratörler,
- 2- Segman Elektrodlu (Faraday Tipi) MHD Jenaratörler,
- 3- Hall Tipi MHD Jenaratörler.

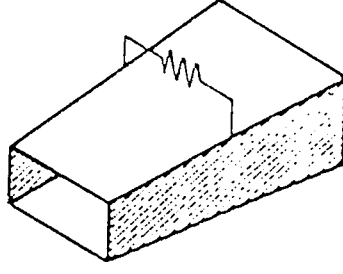
Kanal Geometrilerine Göre MHD Jenaratörler:

- 1- Lineer Kanallı MHD Jenaratörler,
- 2- Vorteks Tipi MHD Jenaratörler,
- 3- Dış Akımlı Radyal Tip MHD Jenaratörler.

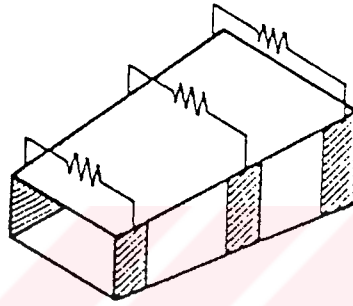
Şekil 3.4.1 de elektrod tiplerine göre, Şekil 3.4.2 de ise kanal geometrilerine göre MHD jenaratörlerin şematik gösterimleri bulunmaktadır. Aşağıdaki tabloda ise, elektrod tiplerine göre MHD jenaratörlerin kısa bir karşılaştırması bulunmaktadır.

Tablo 3.4. Elektrod Tiplerine Göre MHD Jenaratörün Karşılaştırılması

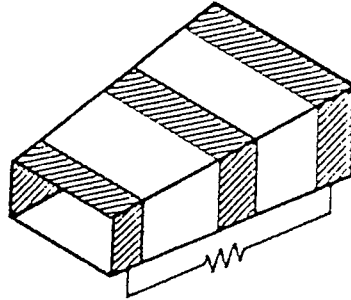
Tip	Yararları	Mahsurları
Sürekli Elektrod	1- Basit Yapılı 2- İzolasyon sarımları kolay	1- Enine oluşan kuvvetler ve gerilmeler
Faraday Tipi	1- En iyi güç yoğunluğu 2- Sadece aksiyal kuvvetler	1- Karmaşık yük devresi 2- Daha güç bir kontrol
Hall Tipi	1- Tek bir yük devresi 2- Yüksek gerilim, zayıf akım	1-Düşük güç yoğunluğu 2- Sınırlı max. verim 3- Enine oluşan kuvvetler



Sürekli Elektrodlu

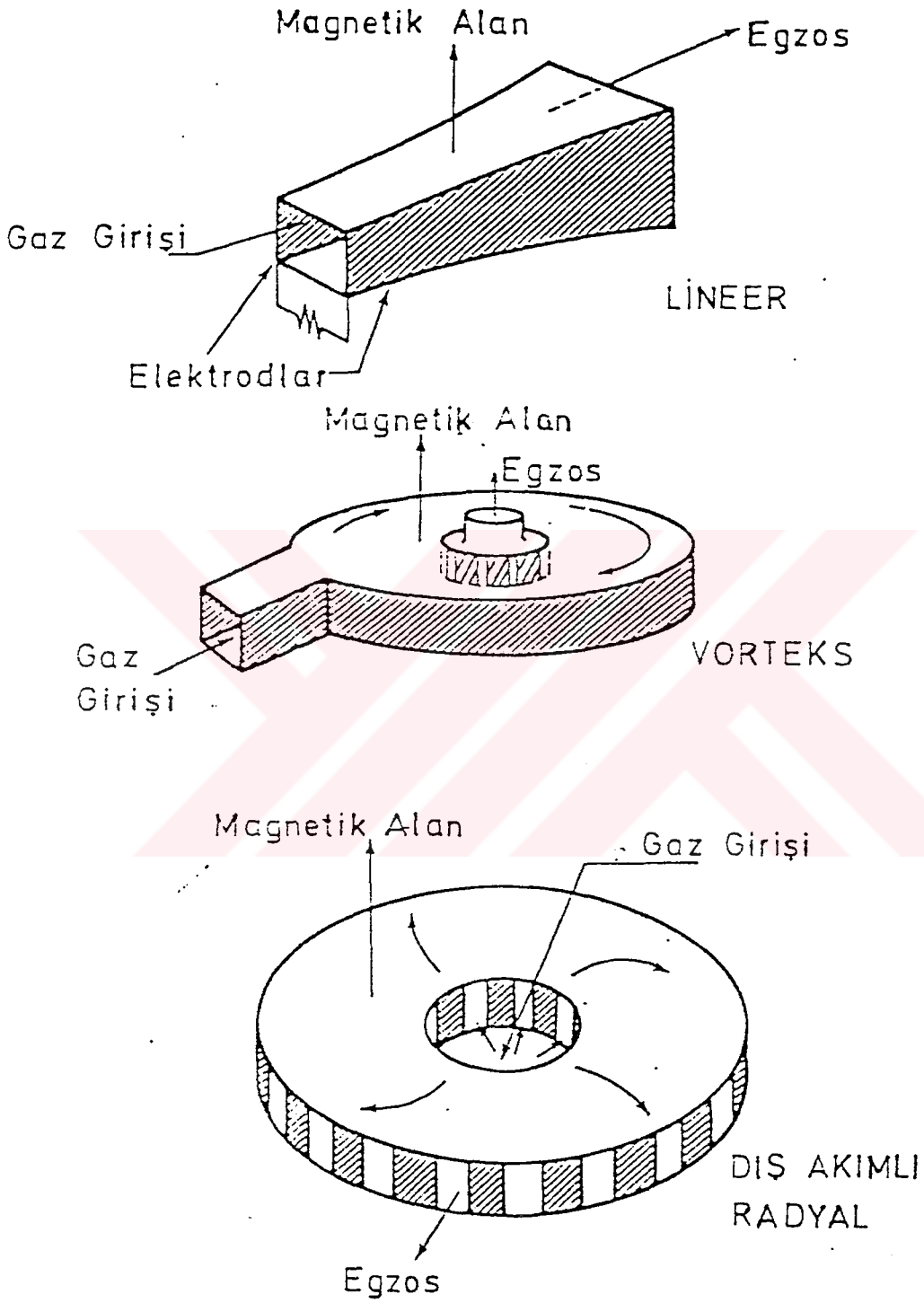


Segmen Tipi Elektrodlu



Hall Tipi

Şekil 3.4.1. Elektrod Tiplerine Göre MHD Jenaratörler (Sutton,1966)



Şekil 3.4.2. Kanal Tiplerine Göre MHD Jenaratörler (Sutton,1966)

4. MHD JENARATÖR ÇEVİRİMLERİ

MHD jenaratör güç çevrimlerini esas olarak üç ana grupta toplayabiliriz. Bunlardan ilki, basit açık devre MHD jenaratör çevrimi, ikincisi geri kazanımlı açık MHD jenaratör çevrimi, üçüncüsü ise, kapalı devre nükleer reaktör MHD çevrimidir (Angrist,1982). MHD jenaratörlerde elektrik enerjisi üretimi için yüksek sıcaklıklara çıkılması gereği, bu jenaratörlerin kullanıldığı enerji sistemlerinde üst çevrim olmasını zorunlu kılmaktadır.

4.1 AÇIK ÇEVİRİM

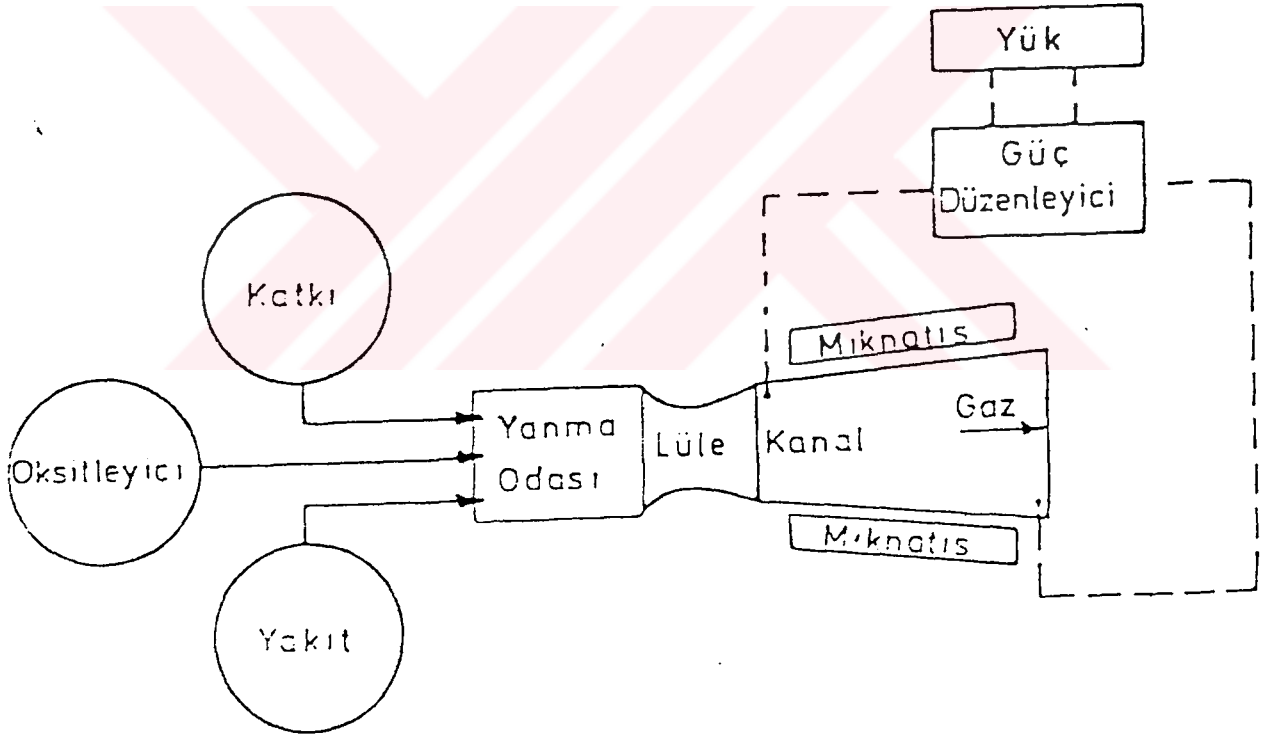
4.1.1. Basit Açık Çevrim :

Bu çevrimde, yakıt ve oksitleyici bir yanma odasında yakılırlar ve ön ısıtmadan önce, bu yanmış gaz karışımına katkılama yapılır. Yanma ürünleri bir nozulda hızlandırılır ve yanmış gazlar MHD jenaratörde iş yaptıktan sonra atmosfere bırakılırlar. Bununla beraber, katkılanmış yanma gazları 1 atm. basınçta 2500 ° C altında iyi bir iletkenlik göstermeyebilirler. Bu nedenle elektrik enerjisi üretmek için gerekli yanma sıcaklığı 2500 ° C ' a ulaşmalıdır. Genellikle yanma odasında oksitleyici olarak hava kullanıldığından, yanma gazlarının sıcaklığı bu değere ulaşmaz. Bu nedenle oksitleyici olarak saf oksijen ya da kimyevi bir oksitleyici kullanılır. Bu çevrim tipinde, dışarı atılan gazın iç enerjisinden ve katkı malzemesinden faydalanılmaz. Şimdilerde olduğu gibi, tüm MHD-jenaratör deneyleri, açık çevrim kullanılmaktadırlar. Bu deneylerin ilki, Halasz ve Karlovitz tarafından Westinghouse' da, elektron iyonizasyonu kullanılarak 1936-1946 tarihleri arasında gerçekleştirildi. Fakat, yaklaşık 1958 tarihine kadar, katkılanmış gazların termal iyonizasyonunu kullanan deneylere kadar hiçbir deney yeterli başarıyı sağlayamadı (Yükseler,1987).

İlk başarılı yanma deneyi, Westinghouse Electric Corporation' da Way tarafından yapıldı ve 10 kW ın üzerinde bir güç üretildi. Bu deneyi benzer birçok deney takip etti.

En büyük yanma deneyi ise, yapılan AVCO Mark 6 MHD jeneratörü tarafından 20 MW güç üretilerek gerçekleştirildi .

Bu tür MHD çevrimleri, genellikle kısa süreli ve yüksek güce ihtiyaç gösteren yerlerde kullanılırlar. Özellikle, askeri amaçlı sahalarda, elektromagnetik toplar, laserler ve stratejik savunma silahlarının çoğu, bahsedilen kısa süreli yüksek güçlere ihtiyaç duyarlar. Günümüzde ise, kısa süreli yüksek güç sağlayan kaynaklar arasında çeşitli kondansatörler, jeneratörler, bataryalar olmasına karşın, hiçbiri MHD jeneratörlerin sahip oldukları güç yoğunluğuna sahip değildir (Sheparel,1987). Şekil 4.1 de bu çevrim tipine ait prensip şeması görülmektedir.



Şekil 4.1. MHD Jeneratörlü Basit Açık Çevrim (Sheparel,1987)

4.2 GERİ KAZANIMLI AÇIK MHD JENARATÖR ÇEVİRİMİ

Bir önceki basit açık çevrim, ekonomik işletme şartlarına uygun değildir. Bunun nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz ;

- Katkı malzemesi direkt olarak atmosfere atılmaktadır. Dolayısıyla katkı malzemesini geri kazanamamaktayız.
- Yanma sıcaklığını yükseltmek için kullanılan kimyevi oksitleyicilerin oldukça pahalı olması.
- Egzost gazlarıyla dışarıya atılan termel enerjinin geriye kazanılamaması.

Yukarıda sayılan bu nedenlerden dolayı, enerjinin ekonomik olarak üretilmesi bu üç problemin çözümüyle mümkün olmaktadır.

Bilindiği gibi mevcut olan en ucuz oksitleyici havadır. Bununla beraber güç üretimi havanın yanma basıncına kadar sıkıştırılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, eğer yakıt fiyatları düşürülebilirse fosil yakıtlar enerji elde etmek için kullanılabilirler. Bu nedenle fosil yakıtları havayla yakarak katkı maddesini iyonize etmek için yeterli miktardaki yanma sıcaklıklarına ulaşılabilir. Aynı zamanda, mümkün olduğunca oksijenle zenginleştirilmiş yanma havasını girişte ön ısıtmaya tabi tutabiliriz. Bütün sayılan bu verim artırıcı tedbirler ise ancak geri kazanımlı çevrimle mümkündür. Bu çevrime ait tesis şeması Şekil 4.2.1 ve Şekil 4.2.2 de de bu çevrimin sıcaklık-entropi diyagramı görülmektedir (Sutton,1966). Bu çevrimde çalışma gazı yanma odasından gelmektedir. Pratik olması bakımından bazı güncel değerler vermek burada yararlı olacaktır. Gaz % 1 potasyum katkılı hava içerir ve çalışma sıcaklığı 2500 ° C dir. Gazın iletkenliği 0.2 Ω/cm , mach sayısı 2, MHD kanal 30 feet uzunluğunda ve 5 feet² kesitli, magnetik alan 20000 Gauss ve üretilen güç 90 MW, gerilim ise kV mertebesindedir. Yanma gazları atmosfere verildiğinden, katkı maddelerinin oksit ve hidroksitlerinden sakınmak gerekir. Bu nedenle hem katkı maddelerinden tasarruf yapmak, hem de çevre kirliliğini önlemek için katkı malzemelerini geri kazanmak için düzenekler sisteme eklenmelidir. % 1 potasyum katkısı kullanılan bu sistemde arınma ile günde 30 ton civarında K₂O elde edilebilir. MHD kanalından çıkan gaz seri ısı dönüştürücülerden geçer.

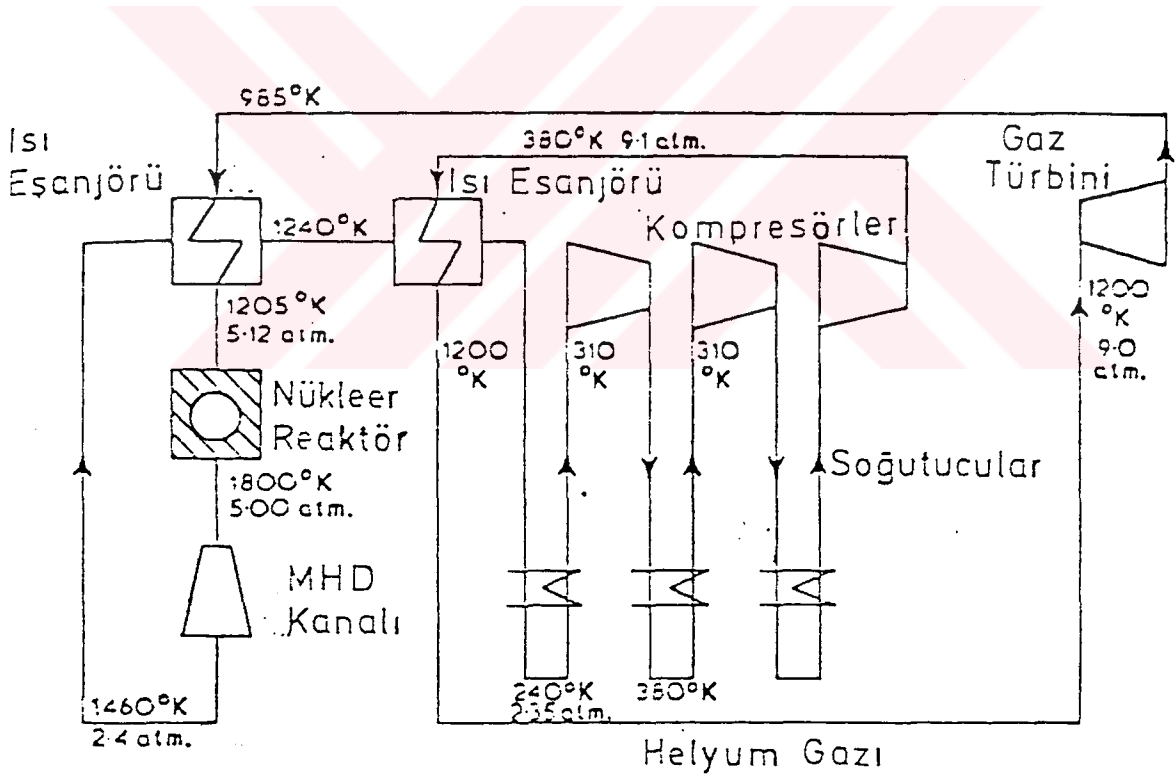
T-S diyagramından da görüleceği üzere; ısıtıcıdan (reküparatör) çıkarak buhar kazanına giren gazın sıcaklığı, yoğuşturucudan gelen suyun sıcaklığından oldukça yüksek olduğundan, kazanda gazın atık enerjisi buhar üretiminde kullanılabilir. Buhar türbininden sağlanacak güç ile hem kompresörün tahriki sağlanır, hem de bir klasik jenaratörün rotoruna verilecek güçle ek elektrik enerjisi üretimi sağlanabilir. Kullanılacak diğer bir ısıtıcı ile de kompresörden gelen ve yanma odasına giden hava ön ısıtmaya tabi tutularak ilave verim artışı sağlanabilir. Bu tip geri kazanımlı açık çevrimlerin verimlerinin % 56 civarında ve bunun üzerinde olacağı hesaplanmıştır (Sutton,1966).

Bununla beraber bu tip bir çevrim içinde çözülmesi gerekli birtakım problemler mevcuttur. Bunların başında 2500 ° C gibi yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, bu sıcaklığa uzun süre dayanabilecek malzemelerin olmamasıdır. Diğer taraftan yakıt fiyatları göz önünde bulundurulduğunda, MHD jenaratörlerin ekonomik işletmeleri için kömür kullanımı, en iyi yakıt olarak görünmektedir. Fakat yakıt olarak kömür kullanımının, yüksek miktarda kül bırakması ek sorunlara neden olacaktır. Oluşan külün % 90 kadarı bir yakıcıda yok edilebilir. Geriye kalan % 10 luk kısım ise katkı maddesiyle karıştırılıp, çevrime yeniden dahil edilebilir. Bununla beraber erimiş kül zamanla jenaratörün içini kaplayarak MHD jenaratöre zarar verir. Problemler burada bitmemektedir. Sürekli çalışan MHD jenaratörlerde iki önemli sorun daha mevcuttur. Bunların ilki, kullanılan katkı maddelerinin yalıtkan malzemeleri iletken hale getirmeleridir. İkinci sorun ise, tungsten, karbon ve silikon karpit gibi elektrod malzemelerinin, yanma gazları tarafından kimyevi olarak aşındırılmalarıdır. Bu son problem jenaratör elektrodlarının belirli aralıklarla değiştirilmeleri sonucu çözülebilir.

Büyük ölçekli, sürekli enerji üretiminde bulunan fosil yakıtlı MHD jenaratörlerin en büyük problemi ise ekonomik olup olmamalarında yatar. Bu çevrimde kullanılan, pahalı miktatıslar, jenaratör kanalı, katkı geri kazanım sistemleri, katkı çökelticiler, elektrodların belli aralıklarla değişmesi ve katkı malzemeleri gibi yatırımlar ve sürekli harcamalar nedeniyle, üretilen elektriğin maliyeti % 40 gibi bir toplam verime sahip klasik buhar santralinden üretilen elektriğin maliyetine eşit olmaktadır (Sutton,1966).

4.3 KAPALI DEVRE NÜKLEER REAKTÖR-MHD ÇEVİRİMİ

MHD enerji üretimi için kullanılan üçüncü uygulama, nükleer enerji kaynağının kullanıldığı bir kapalı çevrimdir. Bu çevrim özellikle uzayda elektrik enerjisi üretimi için oldukça cazip gelmektedir. Bu önemin nedeni ise, ısı kazanımının güneş radyasyonu ile sağlanacak olması ve MHD jeneratör için gerekli olan yüksek sıcaklıklara kolaylıkla ulaşılacak olmasıdır. Yüksek sıcaklık nükleer reaktörlerin, bu çevrimler için kullanılması düşünülmektedir. Reaktör çıkış sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan verimler % 42 ile % 54 arasında değişmektedir. Şekil 4.3.1 de kapalı devre nükleer reaktör-MHD çevrim şeması görülmektedir(Sutton,1966).



Şekil 4.3.1. Kapalı Devre MHD-Nükleer Reaktör Çevrim Şeması (Sutton,1966)

5. SONLU ZAMAN TERMODİNAMIĞI PRENSİBİ

1824 yılında Carnot isimli bir Fransız mühendisi, farklı sıcaklıktaki iki ısı kaynağı arasında çalışan tersinir bir ısı makinası veriminin maksimum verimi ifade edeceğini ortaya koymuştur. Tanımından da anlaşılacağı gibi Carnot çevrimi tersinir bir çevrimi ifade eder. Tersinir olan bu çevrimdeki tüm hal değişimleri de tersinirdir. Çevrimdeki hal değişimlerinin tersinir olması, termodinamik denge halinden sapmaların sonsuz küçük mertebede olması anlamına gelir. Bunun için de hal değişimleri sonsuz küçük hızlarda gerçekleşmelidir. Bu ise Carnot çevriminin sonsuz zamanda gerçekleşeceği anlamına gelir. Pratikte ise olaylar belli bir hızda gerçekleşirler. Bu nedenle gerçek hal değişimleri tersinmezdir.

Carnot çevriminin oluşması, başka bir deyişle bu çevrimden bir iş elde etmek için sonsuz bir zaman gerektiğinden, Carnot çevriminin çıkış gücü sıfıra iner. Bununla beraber, pratikte kullanılan tüm çevrimler belirli bir enerji üretirler. Bu nedenle bir çevrimden güç elde edilmek isteniyorsa, çevrim sonlu bir zamanda gerçekleşmelidir. Bu durum ise çevrimde iş gören akışkanın, ısı alışverişinde bulunduğu kaynaklarla arasında bir sıcaklık farkının olmasıyla mümkün olabilir.

Görüldüğü gibi Carnot çevrimi pratikte uygulanamayacak ve yalnızca teorik mukayeselerin yapıldığı ideal bir durumu temsil eder. Carnot çevriminin bu eksiliği, pratikte kullanılan ve sonlu bir zamanda belli bir iş gerçekleştiren makinaların, mukayesesi için başka bir yaklaşımı doğurmuştur. Curzon-Ahlborn tarafından ortaya konan bu yaklaşım, kaynak sıcaklıkları ile iş gören akışkan sıcaklıkları arasında ısı transferinin olabilmesi için belirli bir sıcaklık farkının olması gerektiğini esas alarak, çevrimdeki dış tersinmezlikleri de göz önüne alarak ısı makinaları için maksimum çıkış gücünde verimi hesaplamışlardır (Curzon et.al,1975) .

Curzon ve Ahlborn' un çalışmasını takiben; Andersen, Berry, Nitzan, Salamon sonlu zaman termodinamiğini geliştirmişlerdir. Basamak Carnot çevrim modeli üzerinde maksimum güç şartı ve optimum periyod bu kişilerce hesaplanmıştır (Salamon et.al,1981)

Aynı kişiler, kaynak sıcaklıkları ile iş gören akışkan arasında ısı iletimi olan bir ısı makinası modeli için, minimum entropi üretim şartını sağlayan bir ifade elde etmişlerdir (Salamon et.al,1980) .

Rubin; tersinmezliği yalnızca makina ile çevre arasındaki ısı transferinde olan bir ısı makinası için değişik şartlar altında, optimal çalışma koşullarını elde etmiştir (Rubin,1979) .

De Vos; iş gören akışkan ile kaynak sıcaklıkları arasında değişik ısı transfer mekanizmaları için modeller ortaya koymuş ve bu ifadeler için Carnot, Curzon-Ahlborn ve Castans verimlerini elde etmiştir (De Vos,1985) .

Leff; Curzon-Ahlborn verimini, Carnot verimiyle karşılaştırmış ve maksimum güç şartını Otto, Joule, Brayton, Diesel ve Atkinson çevrimlerine uygulamıştır (Leff,1987) .

Bejan; tersinmez güç ve soğutma sistemlerindeki ısı transferi üzerinde teorik çalışmalar yapmıştır (Bejan,1988) .

Cropper; termodinamikte sıcaklık kavramının gelişimini Carnot' dan başlayıp Clapeyron, Holtzman, Helmholtz, Joule, Rankine, Thomas ve Clasius' un katkılarıyla tarihsel bir sırada incelemiştir (Cropper et.al,1987).

Gordon; bir iç tersinir makinada değişik ısı transfer mekanizmalarını göz önüne alarak, makinanın maksimum güçte veriminin değişimini, iş gören akışkan ile sıcak ve soğuk kaynak ısı transfer oranına bağlı olarak incelemiştir (Gordon,1989). Gordon yaptığı diğer bir çalışmada, maksimum güçte ısı makinası veriminin sadece kaynak sıcaklıklarının değil, aynı zamanda kaynak ve iş gören akışkanın diğer özelliklerinin de fonksiyonu olduğunu göstermiştir (Gordon,1990) .

Sonlu zaman termodinamiğini kullanarak maksimum güç şartını, MHD gaz soğutmalı bir reaktör (GCR) çevrimine ilk uygulayan Aydın olmuş, fakat çevrimdeki iç tersinmezlikler dikkate alınmamıştır (Aydın,1991) .

Wu; iç tersinmez bir Carnot çevriminin sonlu zaman termodinamiği çerçevesinde analizini gerçekleştirmiştir (Wu et.al,1992) .

Şahin tarafından yapılan bir çalışmada ise, tersinmez bir Joule-Brayton çevrimine maksimum güç şartı uygulanmış, maksimum güç yoğunluğunda çalışan bu çevrim

veriminin, maksimum güç çıkış şartlarından daha iyi olduğu gösterilmiştir (Şahin et.al,1996).

Şahin tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, maksimum güç şartlarında çalışan MHD güç çevrimlerinin bir performans analizi yapılmıştır (Şahin et.al,1996) .

Yapılan bu çalışmada ise, MHD jeneratörlü Joule-Brayton çevrimine, çevrimdeki iç tersinmezlikler de dikkate alınarak maksimum güç şartı uygulanmış ve kullanılan iki MHD jeneratör tipi için maksimum güç şartlarında yeni verim ve güç ifadeleri elde edilmiştir.



6. SONLU ZAMAN TERMODİNAMIĞI

6.1 CARNOT VE CURZON - AHLBORN VERİM İFADELERİ

Bilindiği gibi, bir çevrim boyunca çalışan ve yüksek sıcaklıktaki bir Q_H ısı kaynağından ısı alıp, düşük sıcaklıktaki bir Q_L ısı kaynağına ısı vererek W kadar iş üreten bir ısı makinası çevriminin verimi;

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (6.1)$$

olarak tanımlanır. Bu çevrimin yaptığı iş W ise,

$$W = Q_H - Q_L \quad (6.2)$$

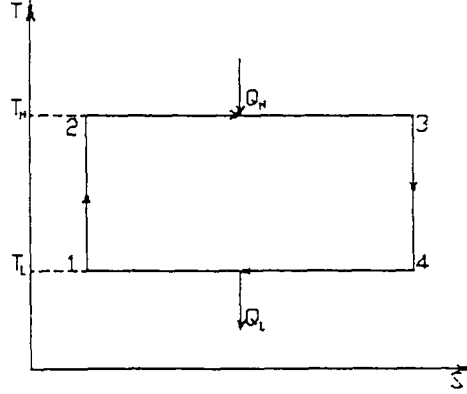
şeklinde tanımlanabilir. Bu ifadelere benzer tarzda, T_H sabit sıcaklığındaki sıcak ısı kaynağı ile, T_L sabit sıcaklığındaki soğuk ısı kaynağı arasında tersinir bir çevrim boyunca çalışan bir Carnot ısı makinasının verimi ise,

$$\eta_C = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (6.3)$$

bağıntısıyla tanımlanabilir. Bu ifade de sıcaklıklar oranı $\tau = T_L / T_H$ olarak tanımlanırsa,

$$\eta_C = 1 - \tau \quad (6.4)$$

şeklinde yazılır. Tüm Carnot makinaları $0 \leq \tau \leq 1$ şartını sağlarlar. Şekil 6.1 den de görüldüğü gibi, Carnot çevrimi iki izantropik ve iki izotermal prosesten meydana gelmiştir.



Şekil 6.1. Bir Isı Makinası Çevrimi T-S Diyagramı

Fakat, Bölüm 5 de ifade edildiği gibi Carnot çevrimi, çevrimin sabit sıcaklıkta ısı alıp verme işlemleri, iş gören akışkanın ısı kaynaklarıyla sürekli ısıl dengede olması nedeniyle ve diğer tersinmezlik kaideleri sonucunda sonsuz bir zamanda gerçekleşecektir. Çevrimden belirli miktarda iş elde etmek sonsuz zaman alacağından, çevrimin çıkış gücü sıfıra iner. Bu durum pratikte kullanılan ve bir çevrimi belirli bir zamanda tamamlayarak belli bir miktar iş üreten enerji makinalarına uymamaktadır. Bu nedenle çevrimden belirli bir güç elde edilmek isteniyorsa, oluşacak çevrim sonlu bir zamanda gerçekleşmelidir. Bu gerçekten hareketle, iki farklı sıcaklık kaynağı arasında maksimum güçte çalışan bir ısı makinasının veriminin, pratikte kullanılan ısı makinaları verimleriyle daha gerçekçi bir mukayese olanağını sağlamak amacıyla Curzon-Ahlborn tarafından yeni bir verim ifadesi ortaya konulmuştur (Curzon et.al,1975) .

6.2 CURZON - AHLBORN VERİM İFADESİNİN ELDE EDİLMESİ

Şekil 6.2.1 ve Şekil 6.2.2 de sırasıyla Curzon-Ahlborn verimini elde etmek için kullanılan T-S diyagramı ve ısı makinası modeli görülmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi, T_H sıcaklığındaki sıcak ısı kaynağından iş gören akışkana olan ısı transferi,

$$\dot{Q}_H = h_H \cdot A_H \cdot (T_H - T_W) \quad (6.2.1)$$

şeklinde ve iş gören akışkandan T_L sıcaklığındaki soğuk ısı kaynağına olan ısı transferi ise,

$$\dot{Q}_L = h_L \cdot A_L \cdot (T_C - T_L) \quad (6.2.2)$$

şeklinde yazılabilir. (6.2.1) ve (6.2.2) eşitliklerinde görülen h ısı transfer katsayısını, A ise ısı değiştirgeci alanlarını ifade etmektedir.

Şekil 6.2.1 de T-S diyagramı görülen bu çevrim iç tersinirdir ve çevrimde entropi üretimi olmadığı için,

$$\frac{\dot{Q}_H}{T_W} = \frac{\dot{Q}_L}{T_C} \quad (6.2.3)$$

eşitliği yazılabilir. Isı transfer katsayıları ile ısı değiştirici alanları çarpımları,

$$h_H \cdot A_H = K_H \quad (6.2.4)$$

$$h_L \cdot A_L = K_L \quad (6.2.5)$$

olarak tanımlanabilir. Burada K_H T_H ve T_W arasındaki termal iletkenlik, K_L ise T_C ve T_L arasındaki termal iletkenlik olarak ifade edilebilir. (6.2.3) eşitliğinden T_C çekilirse,

$$T_C = \frac{K_L \cdot T_W \cdot T_L}{[T_W \cdot (K_H + K_L) - K_H \cdot T_H]} \quad (6.2.6)$$

elde edilir. Termodinamiğin birinci kanunu gereği ısı makinasından elde edilen çıkış gücü,

$$\dot{W} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad (6.2.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. (6.2.1) ve (6.2.2) \dot{Q}_H ve \dot{Q}_L ifadeleri (6.2.7) ifadesinde yerlerine yazılırsa çıkış gücü yeniden,

$$\dot{W} = K_H \cdot (T_H - T_W) - K_L \cdot (T_C - T_L) \quad (6.2.8)$$

olarak yazılabilir. (6.2.6) eşitliğinde bulunan T_C ifadesi, (6.2.8) de yerine yazılırsa,

$$\dot{W} = K_H \cdot (T_H - T_W) - K_H \cdot K_L \cdot T_L \cdot \left[\frac{T_H - T_W}{T_W \cdot (K_H + K_L) - K_H \cdot T_H} \right] \quad (6.2.9)$$

olarak bulunur. Isı makinasından maksimum güç elde etmek için,

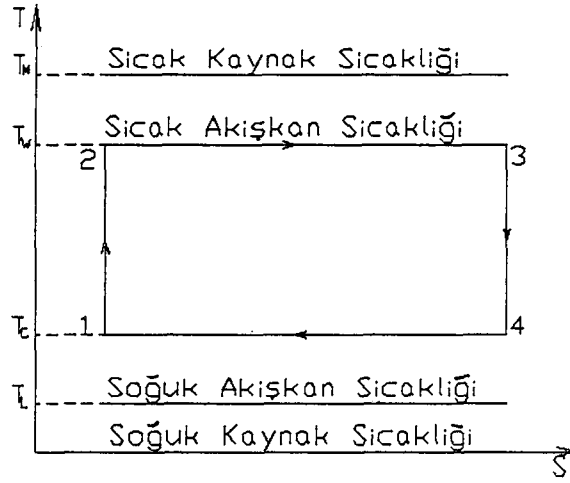
$$\partial \dot{W} / \partial T_W = 0 \quad (6.2.10)$$

şartı uygulanırsa,

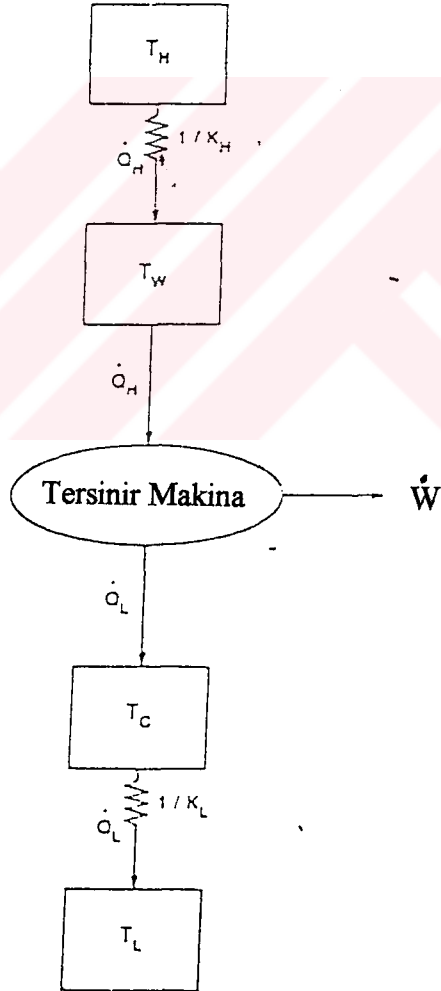
$$(K_H + K_L)^2 \cdot T_W^2 - 2 \cdot K_H \cdot (K_H + K_L) \cdot T_H \cdot T_W + K_H^2 \cdot T_H^2 - K_L^2 \cdot T_H \cdot T_L = 0 \quad (6.2.11)$$

eşitliği elde edilir. Görüldüğü gibi bu ifade T_W ' ye göre ikinci dereceden bir denklemdir.

Bu denklemin kökleri bulunursa, denklemin köklerinden biri ;



Şekil 6.2.1 Dış Tersinmez Carnot Çevrimi T-S Diyagramı



Şekil 6.2.2 Curzon-Ahlborn Verim İfadesi Eldesinde Kullanılan Isı Makinası Modeli

$$T_w = \left[\frac{K_H \cdot \sqrt{T_H} + K_L \cdot \sqrt{T_L}}{K_H + K_L} \right] \cdot \sqrt{T_H} \quad (6.2.12)$$

olarak bulunabilir. (6.2.12) ifadesi (6.2.9) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\dot{W} = K_H \cdot K_L \cdot \frac{(\sqrt{T_H} - \sqrt{T_L})^2}{K_H + K_L} \quad (6.2.13)$$

olarak bulunur. (6.2.12) ifadesi (6.2.1) eşitliğinde yerine konulursa; T_H sıcaklığındaki sıcak ısı kaynağından iş gören akışkana olan ısı transferi,

$$\dot{Q}_H = \frac{K_H \cdot K_L \cdot \sqrt{T_H}}{K_H + K_L} \cdot (\sqrt{T_H} - \sqrt{T_L}) \quad (6.2.14)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan ısı makinasının maksimum güçteki verimi ise,

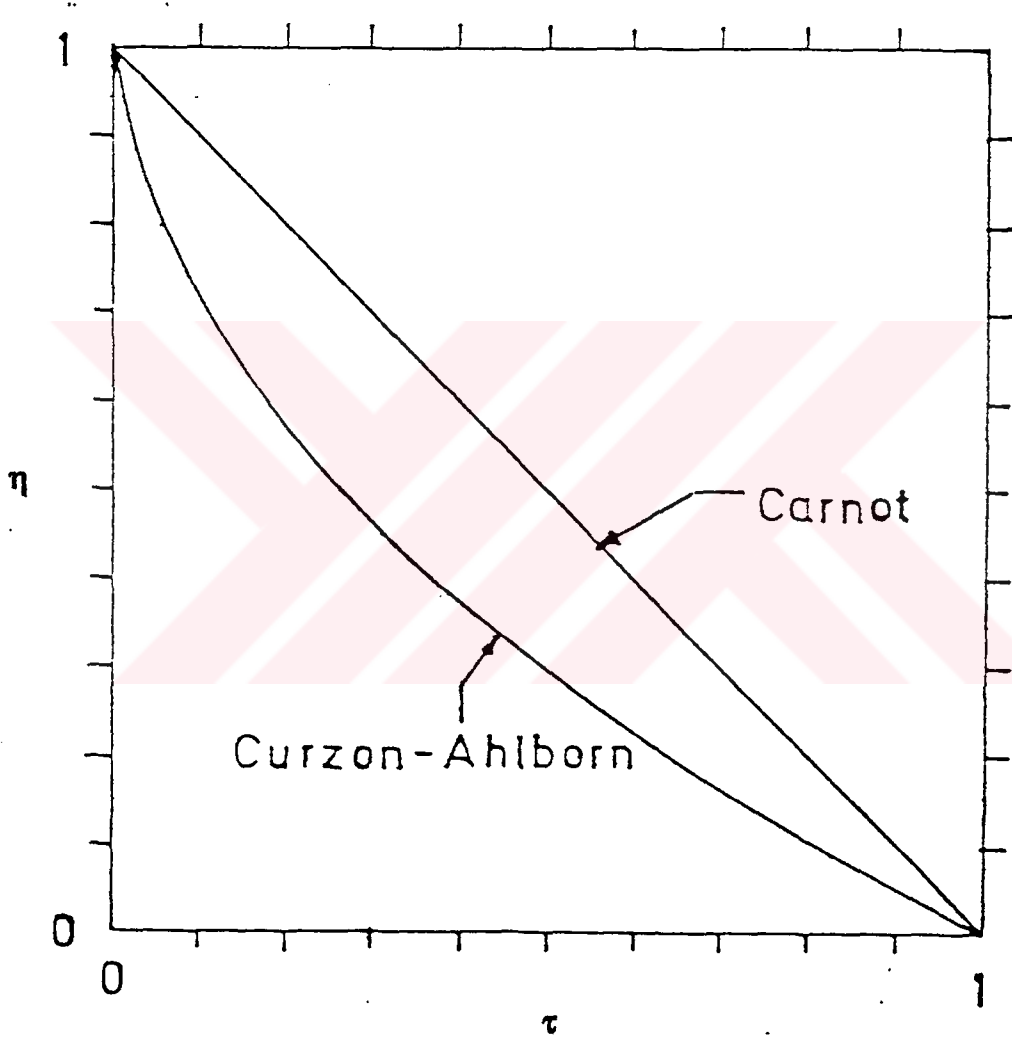
$$\eta_{C-A} = 1 - \sqrt{\frac{T_L}{T_H}} = 1 - \tau^{0.5} \quad (6.2.15)$$

olarak kolaylıkla bulunabilir (De Vos,1985) . Bu eşitlik literatürde Curzon-Ahlborn verimi olarak isimlendirilir. Eşitlikten görüldüğü gibi Carnot veriminden daima daha düşük olacak olan bu verim, T_H ve T_L sıcaklıklarının bir fonksiyonudur. Bu verimin Carnot verimiyle olan ilişkisi ise,

$$\eta_{C-A} = \frac{\eta_C}{(1 + \tau^{0.5})} \quad (6.2.16)$$

$$\frac{\eta_C}{2} \leq \eta_{C-A} \leq \eta_C \quad (6.2.17)$$

eşitlikleriyle gösterilebilir (Yavuz ve diğerleri,1990) . Burada ifadeleri verilen Carnot ve Curzon-Ahlborn verimlerinin, kaynak sıcaklıkları oranına (τ) bağlı olarak değişimi aşağıdaki şekil de gösterilebilir.



Şekil 6.2.3. Carnot ve Curzon-Ahlborn Verimleri

7. MHD GENEL KORUNUM DENKLEMLERİ

MHD jenaratör içindeki akışkan belirli bir viskoziteye sahip olduğundan, kanal içindeki akışı üç boyutlu bağıntılarla formüle etmek mümkündür. Fakat, üç boyutlu ve iki boyutlu akış durumlarında denklemler çok karışık ve içinden çıkılmaz bir hal aldığından, bağıntılar bir boyutlu hal göz önüne alınarak çıkarılacaktır. Burada, MHD kanalı için korunum denklemlerinin çıkarılışında yapılan diğer kabuller şunlardır :

- Kanal içindeki akış sürtünmesizdir.
- Kanal boyunca ısı transferi ihmal edilmektedir.
- Kanal içindeki akış kararlıdır.
- Akışkan özellikleri her bir kesit için üniformdur.
- Akışkan sürtünmesiz, sıkışabilir, mükemmel gaz kabul edilmiştir.
- Elektriksel iletkenlik (σ) skaler bir büyüklüktür.
- Sabit basınç özgül ısı (C_p) nin sıcaklıkla değişmediği ve çevrim boyunca her noktada sabit kaldığı kabul edilmiştir.

7.1 KÜTLE KORUNUM DENKLEMİ

Uzunluğu dx , 1 kesitindeki alanı 'A' ve 2 kesitindeki alanı 'A+dA' olan Şekil 7.1 deki bir diferansiyel elemanı göz önüne alalım,
Bu eleman için Reynolds Transport Denklemi yazılırsa,

$$\dot{m}_g - \dot{m}_c = - \int_{K^x} \rho \cdot u \cdot dA = 0 \quad (7.1)$$

yazılabilir (Hughes, 1967).

(7.1) eşitliği süreklilik şartından dolayı,

$$\dot{m}_g - \dot{m}_c = \dot{m} = \rho \cdot u \cdot A \quad (7.2)$$

şeklinde ifade edilebilir.

7.2 MOMENTUM DENKLEMİ

Aynı eleman için, kontrol hacmine giren momentum $\rho.A.u^2$, çıkan momentum $\rho.A.u^2 + d(\rho.A.u^2)$ ile ifade edilir ve kontrol hacmi içindeki net momentum değişimi,

$$\left[\rho.A.u^2 + d(\rho.A.u^2) \right] - \rho.A.u^2 = d(\rho.A.u^2) = \frac{d}{dx}(\rho.A.u^2)dx \quad (7.3)$$

şeklinde yazılabilir. Şekilden de görüleceği üzere elemanın 1 yüzeyine etki eden basınç kuvveti $P.A$ ve 2 yüzeyine etki eden basınç kuvveti, $(P+dP).(A+dA)$ 'dır ve $dA.dP$ çarpımı çok küçük olduğundan ihmal edilirse,

$$(P+dP).(A+dA) = P.A + P.dA + A.dP \quad (7.4)$$

elde edilir.

Yan duvarlardan diferansiyel elemana etki eden ortalama basınç, $(P + 0.5dP)$ alınır ve bu basınç kuvvetinin 'x' yönündeki bileşeni,

$$(P + 0.5dP).dA = P.dA \quad (7.5)$$

yazılabilir.

Birim hacim başına etki eden elektromagnetik kuvvet $J \times B$ olduğundan, kuvvet dengesi,

$$(P.A + P.dA) - (P.A + P.dA + A.dP) - J.B.A.dx = -A.\frac{dP}{dx}dx - J.B.A.dx \quad (7.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Newton' un ikinci kanunu gereği momentum değişimi bileşke kuvvete eşit olacaktır. (7.3) ve (7.6) eşitlikleri kullanılarak,

$$\frac{d}{dx}(\rho \cdot A \cdot u^2) \cdot dx = -A \cdot \frac{dP}{dx} \cdot dx - J \cdot B \cdot A \cdot dx \quad (7.7)$$

elde edilir. Bu eşitlikte A lar sabit olduğundan, her iki taraf A ya bölünür ve (7.2) eşitliği kullanılırsa,

$$\rho \cdot u \cdot \frac{du}{dx} + \frac{dP}{dx} = -J \cdot B \quad (7.8)$$

ifadesi elde edilebilir. Bu ifade tek boyutlu, sürtünmesiz ve magnetik alan içinde hareket eden iyonize gaza ait momentum denklemdir (Spring, 1965).

7.3. ENERJİ KORUNUM DENKLEMİ

MHD kanalının sahip olduğu, iç enerji, akış enerjisi ve kinetik enerji olmak üzere üç tip enerji olduğu düşünülürse, birim kütle başına toplam enerjisi,

$$e = e_{iç} + P \cdot v + 0.5u^2 \quad (7.9)$$

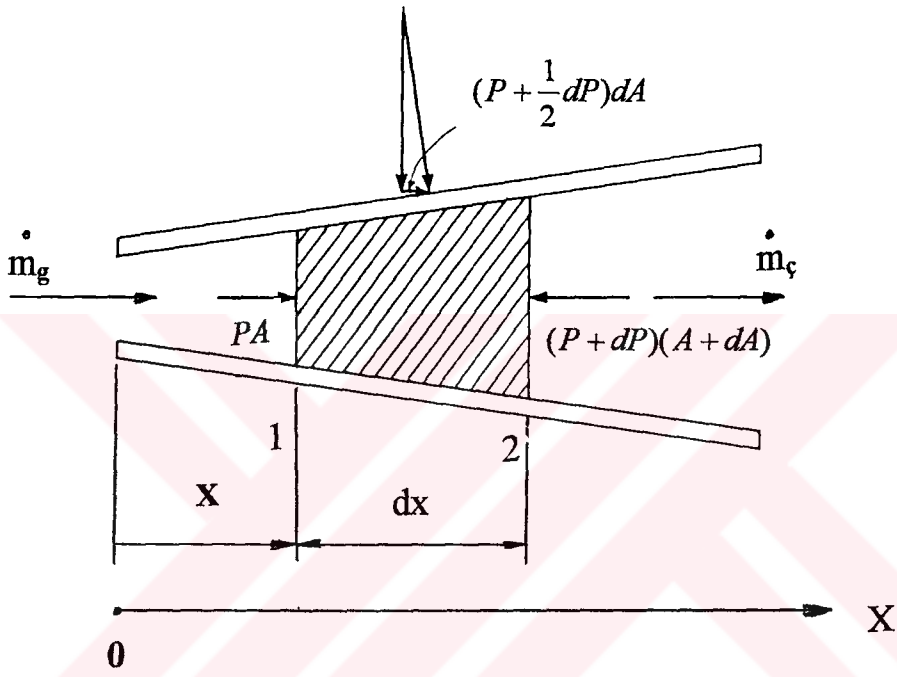
şeklinde yazılabilir. İç enerji ve akış enerjisi toplamı termodinamikte entalpi olarak isimlendirildiğinden (7.9) eşitliğini,

$$e = h + 0.5u^2 \quad (7.10)$$

şeklinde de yazabiliriz.

Kontrol hacminin 1 kesitinden kütle ile giren enerji $\rho \cdot u \cdot A \cdot (h + 0.5u^2)$ ise, kontrol hacmi içindeki net enerji değişimi,

$$d[\rho \cdot A \cdot u \cdot (h + 0.5u^2)] = \frac{d}{dx}[\rho \cdot A \cdot u \cdot (h + 0.5u^2)] \cdot dx \quad (7.11)$$



Şekil 7.1 Diferansiyel Eleman

şeklinde elde edilir.

Adyabatik ve sürekli rejimde, kontrol hacmindeki enerji değişimi ise,

$$\rho \cdot u \cdot \frac{d}{dx} (h + 0.5u^2) = -J \cdot E \quad (7.12)$$

olarak ifade edilebilir (Spring, 1965).



7.4 SABİT HIZLI MHD JENARATÖR

Bu çalışmada kullanılan sabit hızlı MHD jenaratör tipi için elektrik enerjisi üretimi, kanal içinde akmakta olan gazın entalpisindeki azalmanın sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle (7.8), (7.12) ve (3.11) eşitlikleri yardımıyla ;

$$\frac{dh}{dx} + (1 - \eta_e) \cdot \frac{d}{dx}(0.5u^2) - \frac{\eta_e}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} = 0 \quad (7.13)$$

sabit hızlı MHD jenaratör için genel denklemini elde edilebilir.

Kanal içindeki u hızı değişmediği için,

$$\frac{dh}{dx} - \frac{\eta_e}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} = 0 \quad (7.14)$$

yazılabilir.

İdeal gaz için hal denklemini ve entalpi sırasıyla,

$$P = \rho \cdot R \cdot T \quad (7.15)$$

$$h = C_P \cdot T \quad (7.16)$$

şeklinde yazılabilir. $k = C_P / C_V$ olmak üzere,

$$C_P = \frac{R \cdot k}{(k - 1)} \quad (7.17)$$

yazılabilir. (7.14) denkleminde (7.15), (7.16) ve (7.17) eşitlikleri yerlerine yazılırsa,

$$\frac{(k-1) \cdot \eta_e}{k} \cdot \frac{dP}{P} = \frac{dT}{T} \quad (7.18)$$

eşitliği elde edilir. (7.18) eşitliği ,

$$\frac{(k-1) \cdot \eta_e}{k} \cdot \int_{P_1}^P \frac{dP}{P} = \int_{T_1}^T \frac{dT}{T} \quad (7.19)$$

şeklinde entegre edildiğinde,

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{\eta_e(k-1)}{k}} \quad (7.20)$$

kanal boyunca sıcaklıklar oranını basınçların oranına bağlayan bağıntı elde edilir (Spring,1965).

7.5 SABİT MACH SAYILI MHD JENARATÖR

Sabit mach sayılı MHD jenaratör, gazın kinetik enerjisinin entalpisine oranı sabit kalacak şekilde enerji dönüşüm prensibine dayanır. Bu oran mach sayısı tarafından tesbit edilir (Spring,1965).

$$\text{Gazın kinetik enerjisi / Gazın Entalpisi} = \frac{0.5u^2}{C_p \cdot T} \quad (7.21)$$

Mach sayısı, kanal içindeki akışkan hızının ses hızına oranı olarak tanımlanır. İdeal bir gaz için ise,

$$M^2 = \frac{u^2}{k \cdot R \cdot T} \quad (7.22)$$

şeklinde ifade edilir. (7.17) eşitliği yardımıyla, (7.21) eşitliği yeniden,

$$\text{Gazın kinetik enerjisi} / \text{Gazın Entalpisi} = 0.5(k-1).M^2 \quad (7.23)$$

yazılabilir.

(7.13) ifadesinde, (7.15), (7.16) ve (7.22) ifadelerini yerlerine yazarsak,

$$\frac{k}{(k-1).\eta_e} \left[1 + 0.5(k-1).(1-\eta_e).M^2 \right] \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dx} = \frac{1}{P} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (7.24)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte,

$$\beta = \frac{k}{(k-1).\eta_e} \left[1 + 0.5(k-1).(1-\eta_e).M^2 \right] \quad (7.25)$$

tanımlaması yapıp ifade düzenlenirse,

$$\beta \cdot \int_{T_1}^T \frac{dT}{T} = \int_{P_1}^P \frac{dP}{P} \quad (7.26)$$

şeklinde bulunan ifade entegre edilirse,

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (7.27)$$

elde edilir (Spring,1965). Böylelikle, sabit mach sayılı MHD jenaratör için de sıcaklıklar oranını basıçlar oranına bağlayan ifade elde edilmiş olur.

8. MAKSİMUM GÜÇ ÇIKIŞINDA SABİT HIZLI VE SABİT MACH SAYILI MHD JENARATÖR ÇEVİMLERİ

Şekil 8.1 ve Şekil 8.2 de genel şeması ve T-S diyagramı görülen MHD çevrimi genel olarak Brayton çevrimine benzer bir görünüm içerisindedir. Brayton çevrimindeki gaz türbinin yerini bu çevrimde MHD jenaratör almıştır. Bu çevrimdeki prosesler şu şekilde oluşmaktadır ;

- 1 → 2 Kompresörde adyabatik sıkıştırma,
- 2 → 5 Rejenaratörde sabit basınçta ön ısıtma,
- 5 → 3 Yanma odasında ısı verilmesi,
- 3 → 4 MHD jenaratörde genişleme,
- 4 → 6 Rejenaratöre sabit basınçta ısı verilmesi,
- 6 → 1 Soğutucu da sabit basınçta ısı çekilmesi.

8.1 SABİT HIZLI MHD JENARATÖR ÇEVİRİMİ

8.1.1 Çevrim Sıcaklıklarının ve Basınç Kaybının Belirlenmesi

Bölüm 7 de sabit hızlı MHD jenaratöre ait basınç oranının sıcaklık oranlarına bağlı ifadesi (7.20) eşitliğinden,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\eta_c(k-1)}{k}}$$

olarak bulunmuştur. Bu ifade, çevrimde 3 → 4 işlemi için,

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\eta_e(k-1)}{k}} \quad (8.1)$$

şeklini alır.

Çevrimde kompresörün izantropik verimi ise,

$$\eta_c = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1} \quad (8.2)$$

şeklinde yazılabilir (Van Wylen et.al,1993).

1 \longrightarrow 2' izantropik işlemi için ise,

$$\frac{T_2'}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (8.3)$$

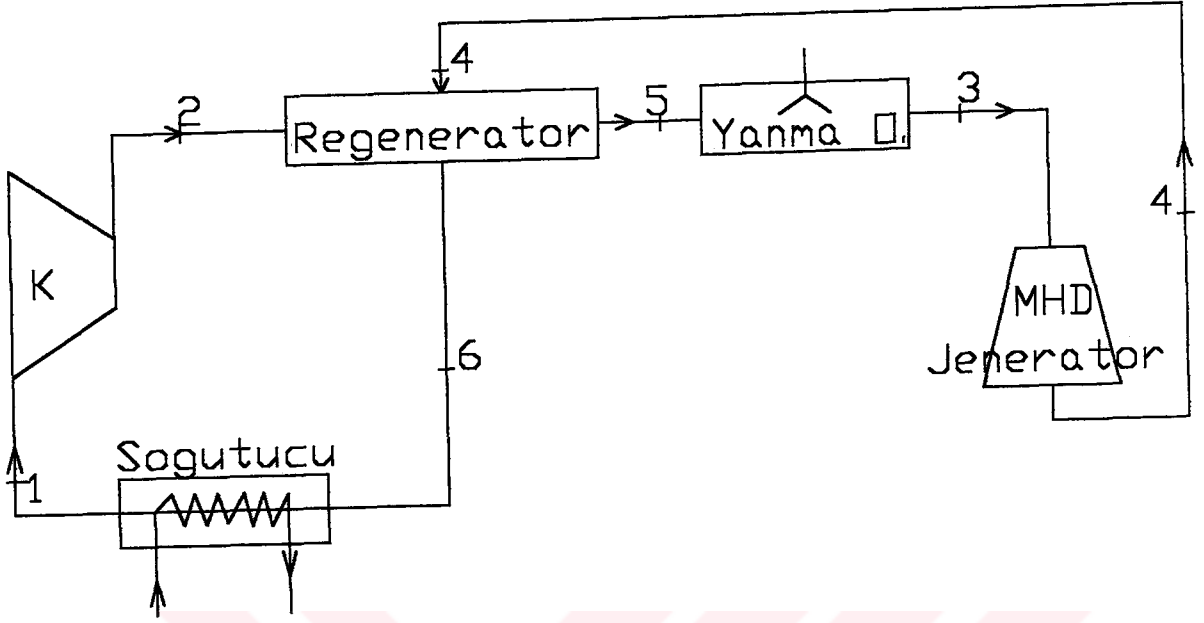
olarak yazılabilir ve (8.2) ile (8.3) eşitlikleri kullanılarak T_2 sıcaklığını,

$$T_2 = T_1 \cdot \left[1 + \frac{1}{\eta_c} \left(\text{Pr}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (8.4)$$

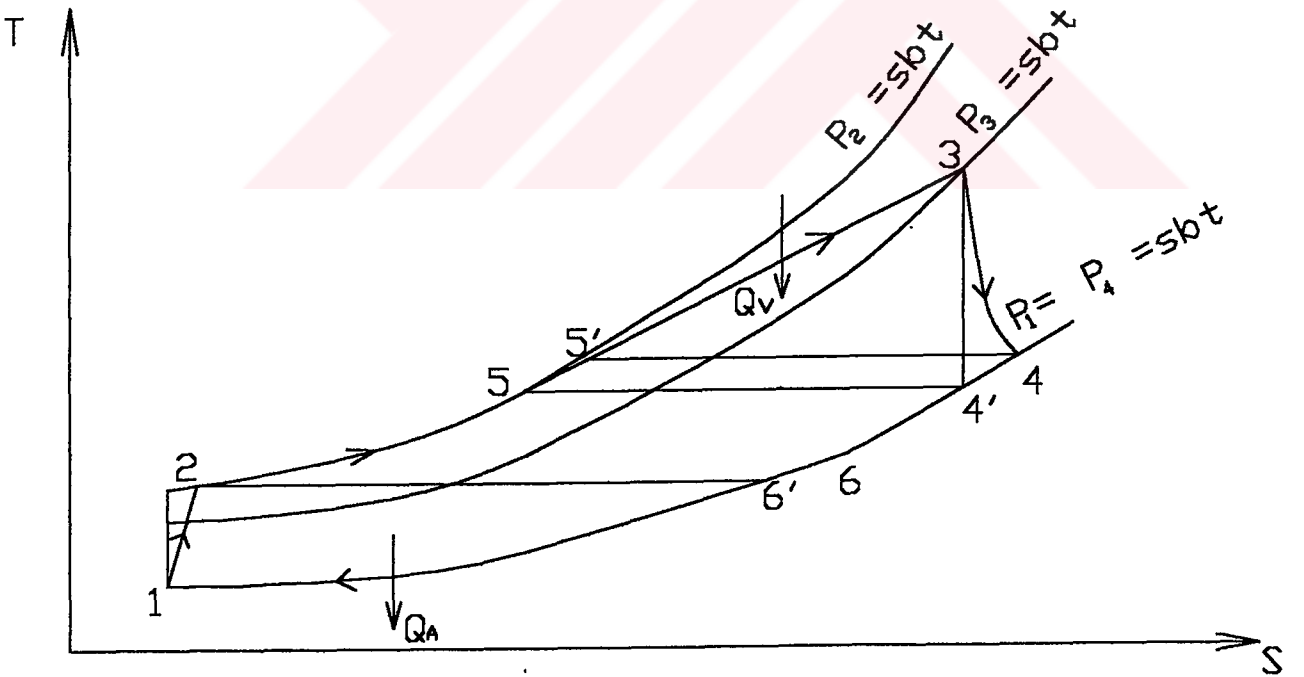
şeklinde bulabiliriz. (8.4) denkleminde görülen Pr ifadesi basınç oranı olarak adlandırılır ve

$$\text{Pr} = \frac{P_2}{P_1} \quad (8.5)$$

olarak ifade edilmiştir.



Şekil 8.1. MHD Jenaratör Genel Çevrim Şeması



Şekil 8.2. MHD Çevrimine Ait T-S Diyagramı

Rejenaratör verimi ise,

$$\eta_R = \frac{T_5 - T_2}{T_5' - T_2} \quad (8.6)$$

yazılabilir. Bu eşitlikte $T_5' = T_4$ olduğundan denklem,

$$\eta_R = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (8.7)$$

olarak yazılabilir.

Rejenaratör kısmında alınan ve verilen ısıların eşitliği ise,

$$m.C_P.(T_5 - T_2) = m.C_P.(T_4 - T_6) \quad (8.8)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan T_6 sıcaklığı ise,

$$T_6 = T_4 - (T_5 - T_2) \quad (8.9)$$

olarak bulunabilir.

Yanma Odasındaki Basınç Kaybı :

MHD jenaratör basınç oranı parametresi,

$$\theta_{MHD} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\eta_e(k-1)}{k}} \quad (8.10)$$

Kompresör basınç oranı parametresi,

$$\theta_c = \frac{T_2'}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (8.11)$$

ve yanma odasındaki basınç kaybı için,

$$\rho_b = \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (8.12)$$

olarak tanımlanabilir. (9.11) eşitliğindeki $\Delta P = P_2 - P_3$, yanma odasındaki basınç kaybı olarak tanımlanmıştır (Şahin ve diğerleri,1996) .

Bundan dolayı,

$$\theta_{MHD} = (\rho_b \cdot \theta_c)^{n_e} \quad (8.13)$$

olarak yeniden yazılabilir.

Denklem (8.7) ve denklem (9.9),(9.11) ve (9.12) kullanılarak T_4 sıcaklığı,

$$T_4 = T_3 \cdot (\rho_b \cdot \theta_c)^{-n_e} \quad (8.14)$$

şeklinde bulunabilir.

(8.7) eşitliğinden de T_5 sıcaklığı,

$$T_5 = T_2 + \eta_R \cdot (T_4 - T_2) \quad (8.15)$$

olarak bulunur.

Bu şekilde çevrimdeki sıcaklık noktaları ve yanma odasında oluşan basınç kaybı belirlenmiş olur.

Şekil 8.1 ve Şekil 8.2 de genel çevrim şeması ve T-S diyagramı verilen bu sistem için, verilen ısı;

$$\dot{Q}_H = \dot{m} \cdot C_P \cdot (T_3 - T_5) \quad (8.16)$$

atılan ısı;

$$\dot{Q}_L = \dot{m} \cdot C_P \cdot (T_6 - T_1) \quad (8.17)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu sistemden elde edilebilecek güç $\dot{W} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$ olduğundan, çıkış gücü,

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot C_P \cdot [(T_3 - T_5) - (T_6 - T_1)] \quad (8.18)$$

şeklinde bulunabilir. (8.18) eşitliğinde, daha önce bulunmuş olan sıcaklıklar yerlerine yazılır ve denklem düzenlenirse,

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot C_P \cdot \left[T_3 - \frac{T_1}{\eta_C} \cdot \left(Pr^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) - T_3 \cdot \rho_b^{-\eta_c} \cdot Pr^{\frac{-\eta_c \cdot (k-1)}{k}} \right] \quad (8.19)$$

olarak bulunabilir.

Çevrimden maksimum güç elde edebilmek için,

$$\frac{d\dot{W}}{d(Pr)} = 0 \quad (8.20)$$

şartı (8.19) eşitliğine uygulanırsa, maksimum güç elde etmek için gerekli optimum Pr basınç oranı,

$$Pr_{\text{opt}} = \left(\frac{T_3 \cdot \eta_e \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\eta_e}}{T_1} \right)^{\frac{k-1}{(1+\eta_e)}} \quad (8.21)$$

olarak bulunur.

(8.21) ifadesi (8.19) eşitliğinde yerine konursa, çevrimden elde edilebilecek maksimum güç,

$$\dot{W}_{\text{max.}} = \dot{m} \cdot C_P \cdot T_3 \cdot \left[1 - \rho_b^{-\eta_e} \cdot \left(\frac{\eta_e \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\eta_e}}{\tau} \right)^{\frac{-\eta_e}{1+\eta_e}} \right] - \dot{m} \cdot C_P \cdot \frac{T_1}{\eta_C} \left[\left(\frac{\eta_e \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\eta_e}}{\tau} \right)^{\frac{1}{1+\eta_e}} - 1 \right]$$

(8.22) şeklinde bulunur. (8.22) eşitliğinde $\tau = T_1 / T_3$ sıcaklıklar oranı olarak tanımlanmıştır.

Şekil 8.2 de T-S diyagramı verilen bu çevrimin verimini,

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} \quad (8.23)$$

olarak tanımlayabiliriz.

(8.23) eşitliğinde maksimum güç çıkışında verimi bulmak için \dot{W} yerine (8.22) ifadesi kullanılır ve (8.21) eşitliğinde bulunan optimum Pr ifadesi (8.23) eşitliğinde yerine yazılırsa, maksimum güç çıkışında sabit hızlı MHD jeneratör için verim ifadesini,

$$\eta_s = \frac{\left[1 - \rho_b^{-\eta_e} \left(\frac{\eta_e \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\eta_e}}{\tau} \right)^{\frac{-\eta_e}{1+\eta_e}} - \frac{\tau}{\eta_C} \left[\left(\frac{\eta_e \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\eta_e}}{\tau} \right)^{\frac{1}{1+\eta_e}} - 1 \right] \right]}{\left[1 - \rho_b^{-\eta_e} \cdot \eta_R \left(\frac{\eta_e \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\eta_e}}{\tau} \right)^{\frac{-\eta_e}{1+\eta_e}} + \tau \cdot (\eta_R - 1) \left[1 + \frac{1}{\eta_C} \left[\left(\frac{\eta_e \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\eta_e}}{\tau} \right)^{\frac{1}{1+\eta_e}} - 1 \right] \right] \right]}$$

(8.24) şeklinde ifade edebiliriz.

(8.24) eşitliğinde, elektriksel verim η_e , kompresör verimi η_c , rejanaratör verimi η_R ve sıcaklıklar oranı τ ,

$$0 \leq \eta_e \leq 1$$

$$0 \leq \eta_c \leq 1$$

$$0 \leq \eta_R \leq 1$$

$$0 \leq \tau \leq 1$$

değerleri arasında değişmektedir.



8.2 SABİT MACH SAYILI MHD JENARATÖR ÇEVİRİMİ

Sabit mach sayılı MHD jenaratöre ait basınç oranlarının sıcaklığa bağlı ifadesi, (7.27) eşitliğinden,

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

olarak bulunmuştur. 3 \longrightarrow 4 prosesi için bu ifade,

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (8.25)$$

şeklini alır. (8.25) eşitliğinde görülen β , (7.25) eşitliğinde,

$$\beta = \frac{k}{(k-1) \cdot \eta_e} \left[1 + 0.5(k-1) \cdot (1 - \eta_e) \cdot M^2 \right]$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Yanma odasındaki basınç kaybından dolayı sabit mach sayılı MHD jenaratör basınç kayıp katsayısını (8.11), (8.12) ve (8.25) eşitliklerini kullanarak;

$$\theta_{MHD} = (\rho_b \cdot \theta_c)^\alpha \quad (8.26)$$

şeklinde tanımlayabiliriz. (8.26) eşitliğinde görülen α ise,

$$\alpha = \frac{\eta_e}{\left[1 + 0.5(k-1) \cdot (1 - \eta_e) \cdot M^2 \right]} \quad (8.27)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Sabit mach sayılı MHD jenaratör çevriminde, çevrimin yaptığı işi daha önce verilen (8.18),

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot C_P \cdot [(T_3 - T_5) - (T_6 - T_1)]$$

eşitliği ile bulabiliriz. (8.18) eşitliğinde, belirlenmiş olan sıcaklıklar yerlerine yazılır ve denklem düzenlenirse, sabit mach sayılı MHD jenaratör çevriminin yaptığı işi ,

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot C_P \cdot \left[T_3 - \frac{T_1}{\eta_C} \cdot \left(Pr^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) - T_3 \cdot \rho_b^{-\alpha} \cdot Pr^{\frac{-\alpha(k-1)}{k}} \right] \quad (8.28)$$

eşitliği ile bulabiliriz.

Sabit hızlı MHD jenaratör için yapılan işlemlere benzer tarzda çıkış gücünü maksimum yapan basınç oranını bulmak için (8.28) eşitliğine, (8.20) eşitliğinde belirtilen şart uygulanırsa, çıkış gücünü maksimum yapan optimum basınç oranı ;

$$Pr_{opt} = \left(\frac{\eta_C \cdot \alpha \cdot \rho_b^{-\alpha}}{\tau} \right)^{\frac{k}{(k-1)(1+\alpha)}} \quad (8.29)$$

olarak belirlenir.

(8.29) eşitliği, (8.28) eşitliğindeki \dot{W} ifadesinde yerine yazılırsa, çevrimden elde edilebilecek maksimum güç,

$$\dot{W}_{max.} = \dot{m} \cdot C_P \cdot T_3 \cdot \left[1 - \rho_b^{-\alpha} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\alpha}}{\tau} \right)^{\frac{-\alpha}{1+\alpha}} \right] - \dot{m} \cdot C_P \cdot \frac{T_1}{\eta_C} \cdot \left[\left(\frac{\alpha \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\alpha}}{\tau} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} - 1 \right]$$

(8.30) şeklinde bulunur.

Maksimum güç çıkışında verim ifadesini bulmak için sabit hızlı MHD jenerator için yapılan işlemler tekrarlanır ve (8.23) eşitliğinde ifadeler yerlerine yazılırsa,

$$\eta_M = \frac{\left[1 - \rho_b^{-\alpha} \left(\frac{\alpha \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\alpha}}{\tau} \right)^{\frac{-\alpha}{1+\alpha}} - \frac{\tau}{\eta_C} \left[\left(\frac{\alpha \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\alpha}}{\tau} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} - 1 \right] \right]}{\left[1 - \rho_b^{-\alpha} \cdot \eta_R \left(\frac{\alpha \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\alpha}}{\tau} \right)^{\frac{-\alpha}{1+\alpha}} + \tau \cdot (\eta_R - 1) \left[1 + \frac{1}{\eta_C} \left[\left(\frac{\alpha \cdot \eta_C \cdot \rho_b^{-\alpha}}{\tau} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} - 1 \right] \right] \right]}$$

(8.31) , Sabit mach sayılı MHD jenerator için maksimum güçte verim ifadesi de bulunmuş olur.

(8.31) eşitliğinde de, elektriksel verim η_e , kompresör verimi η_C , rejanaratör verimi η_R ve sıcaklıklar oranı τ ,

$$0 \leq \eta_e \leq 1$$

$$0 \leq \eta_C \leq 1$$

$$0 \leq \eta_R \leq 1$$

$$0 \leq \tau \leq 1$$

değerleri arasında değişmektedir.

Maksimum güç çıkışında, sabit hızlı ve sabit mach sayılı MHD jeneratorler için bulunmuş olan verim ifadeleri karakter olarak aynı ifadelerdir. (8.24) eşitliğindeki η_e nin yerini, (8.31) eşitliğinde α almıştır.

Denklem (8.24) de çevrimin kayıpsız, iç tersinmezliklerin olmadığı hali göz önüne alınır ve $\eta_e = 1$, $\eta_R = 0$, $\eta_C = 1$, $\rho_b = 1$ teorik şartları (8.24) eşitliğinde yerlerine yazılırsa,

$$\eta_S = \eta_{C-A} = 1 - \tau^{0.5} \quad (8.32)$$

sabit hızlı MHD jeneratörde, belirtilen şartlarda maksimum güç çıkışında verimin Curzon-Ahlborn verimine eşit olduğu görülür.

Benzer şekilde, (8.27) eşitliğinde $\eta_e = 1$ olduğunda $\alpha = 1$ değerini almaktadır. α 'nın bu değeri ve $\eta_R = 0$, $\eta_C = 1$, $\rho_b = 1$ şartları (8.31) eşitliğinde yerlerine yazılırsa,

$$\eta_M = \eta_{C-A} = 1 - \tau^{0.5} \quad (8.33)$$

olarak maksimum güç çıkışında teorik şartlarda sabit mach sayılı MHD jeneratör için de verimin Curzon-Ahlborn verim ifadesine eşit olduğu görülmektedir.

SONUÇ :

Yapılan bu çalışmada, ilk olarak elektrik enerjisine direkt olarak dönüşümün prensipleri anlatılmış ve bu dönüşümün yararları üzerinde kısaca durulmuştur. Direkt enerji dönüşüm sistemlerinden, termoelektrik jenaratörler, termoiyonik dönüştürücüler, fotovoltaiik güneş pilleri ve yakıt pillerinin kısa bir tanıtımı yapılmıştır. Direkt enerji dönüşüm sistemleri içinde hiç şüphesiz en önemli yere sahip olan MHD jenaratörlerin genel tanıtımı yapılmış, MHD jenaratörlerin çalışma prensipleri üzerinde durulmuş, bu jenaratörlerin kullanım amacı, ve MHD jenaratörünün kullanıldığı çevrimler hakkında bilgi verilmiştir. Sabit hızlı ve sabit mach sayılı MHD jenaratör tipleri için sıcaklık oranlarını, basınç oranlarına bağlayan ifadeler çıkarılmıştır.

Sonlu zaman termodinamiğinin MHD jenaratör gaz soğutmalı reaktör çevrimine uygulanması isimli çalışma ilk olarak Aydın (1991) tarafından yapılmış, bu çevrim için elde edilen maksimum güçte verim ifadeleri, Curzon-Ahlborn verim ifadeleriyle karşılaştırılmıştır. Bunu takiben MHD güç çevrimlerinin maksimum güç yoğunluğu kullanılarak analizi ise Şahin (1996) tarafından yapılmış, kullanılan çevrim modelinde kompresördeki tersinmezlikler de dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ise, sabit hızlı ve sabit mach sayılı MHD jenaratör çevrimlerine maksimum güç şartı uygulanarak her iki jenaratörün kullanıldığı çevrimin maksimum güç şartında verim ifadeleri ve çevrimlerden elde edilebilecek maksimum güçlerin hangi koşullarda sağlanacağı, başka bir ifadeyle maksimum güç şartlarının sağlandığı dizayn parametreleri belirlenmiştir. Çevrimde kompresördeki, rejenaratördeki ve yanma odasındaki basınç kayıpları gibi iç tersinmezlikler de dikkate alınmıştır. Ayrıca rejenaratörün çevrim verimine olan etkisi de incelenmiştir.

Eklerde verilen grafiklerde görüldüğü gibi, maksimum güçte verim ifadelerinin sıcaklık oranlarına ve elektriksel verime bağlı değişimleri gösterilmiştir. Diğer grafiklerde, kompresör veriminin maksimum güç şartlarındaki verimi nasıl etkilediği görülmektedir. Bununla beraber rejenaratör veriminin de maksimum güç şartlarında verime olan etkisi incelenmiştir. Grafikler çizilirken, k ve M sayıları akışkanın cinsine ve akışa bağlı sabitler olduğu göz önünde bulundurularak, $k = 1.4$, $M = 0.7$ değerleri eşitliklerde kullanılmıştır.

Aynı zamanda mach sayısının verime olan etkisini gözlemek için $M = 0.9$ için maksimum güçte verim ifadesi $M = 0.7$ olduğu durumdaki şartlarla karşılaştırılmıştır.

Grafiklerden elde edilen sonuçları yorumlarsak ;

- 1- $\eta_e = 1$ olduğunda (8.1) ve (8.25) eşitlikleri termodinamikte ideal bir durum olan izantropik genişlemeye dönüşür ve her iki jenaratör çevrimi Brayton çevrimi olur.
- 2- $\eta_e = 1$ olduğunda kanal içindeki elektriksel kayıplar sıfır olacağından, gaza verilen enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüşür. Bu ise ideal bir duruma karşılık gelir.
- 3- (8.24) ve (8.31) eşitliklerinde her iki jenaratör tipi için elde edilen maksimum güçte verim ifadelerinin teorik çevrim şartlarında Curzon-Ahlborn verim ifadesine eşit oldukları gösterilmiştir.
- 4- Ek 1 ve Ek 2' de görüleceği üzere, kayıplı durumda ($\eta_c = 0.85$) bulunan maksimum güçte verim değerleri, kayıpların olmadığı ve rejenaratörün kullanılmadığı ($\eta_R = 0$) durumdaki verim değerlerine, sıcaklık oranının küçük değerlerinde oldukça yakın değerler almaktadır. Bu durum, ilk halde kayıpların olmasına karşın, sistemde kullanılan rejenaratörün verime olan büyük etkisini göstermektedir.
- 5- Ek 3' de sabit hızlı ve sabit mach sayılı MHD jenaratör çevrimlerinin, maksimum güçte verim-sıcaklık oranı grafikleri görünmektedir. Burada sabit hızlı MHD jenaratörün kullanıldığı çevrim veriminin, sabit mach sayılı MHD jenaratör veriminden daha yüksek olduğu görülmektedir.
- 6- Ek 4' de kompresör veriminin çevrim verimine olan etkisi görülmektedir. Fakat kompresör verimindeki her bir artış, verimde aynı oranda bir yükselişi sağlamamaktadır. Kompresör verimindeki artışlar özellikle elektriksel verimin küçük değerlerinde verimde daha fazla bir artış sağlamaktadır.
- 7- Ek 5' de rejenaratörün verim üzerine olan etkisi görülmektedir. Görüleceği gibi rejenaratör verimindeki artışlar çevrim verimini özellikle elektriksel verimin düşük olduğu değerlerde daha fazla arttırmaktadır.
- 8- Ek 6' da sabit hızlı MHD jenaratör ve Curzon-Ahlborn için çizilen maksimum güç-verim graiklerinden görüleceği üzere, verimin maksimumuna ulaştığı nokta olan 0.9 değeri, Carnot verimini temsil etmekte, fakat bu noktada güç sıfır olmaktadır.

Maksimum güçte teorik şartlar için verim değeri 0.68 olmakta ve bu verim değeri Curzon-Ahlborn verimine tekabül etmektedir. Sabit hızlı MHD çevriminde ise kayıplı durumlar göz önüne alındığında maksimum güç şartlarının elde edildiği durumda verim değeri yaklaşık olarak 0.59 değerini almakta, çevrimden maksimum verimin elde edildiği durumda ise, maksimum güç elde edilememektedir. Bu nedenle çevrimin maksimum verim ya da maksimum güç şartlarında çalıştırılması kullanım yeri ve amacına göre bir seçimi gerektirmektedir. Pratikte kullanılan ve belirli bir güç üreten ısı makinelerinin birçoğu maksimum verim şartlarında değil, maksimum gücü verecek şartlarda dizyn edilir ve çalıştırılırlar. Yapılan bu çalışmanın en önemli noktasını ise, her iki jenaratör çevriminden elde edilebilecek maksimum güç şartlarının belirlenmiş olması oluşturmaktadır. Bununla beraber her iki şartın arasında bir nokta için seçim yapılabilir ve bu şartın sağlandığı parametreler kolaylıkla belirlenebilir.

- 9- Sabit mach sayılı MHD jenaratörde mach sayısının çevrim verimine olan etkisi Ek 7’ de açıkça görülmektedir. Mach sayının 0.7 olduğu durumda elde edilen verim değeri, bu sayının 0.9 değeri için elde edilen verim değerinden az da olsa büyüktür. Kanal içindeki gazın akış hızı belirli bir değer üzerine çıktıkça, kayıplar nedeniyle verim değeri azalmaktadır.
- 10- Teknolojideki ilerlemelere paralel olarak, kanal içindeki gazın sıcaklığı 3500 °K gibi yüksek değerlere ulaştırılır ve bu durumda meydana gelecek ısı transfer kayıpları makul bir seviyede tutulabilirse, çevrim verimi Ek 1 ve Ek 2’de verilen grafiklerden görüleceği üzere, % 80 ve hatta bu değer üzerine çıkmaktadır ki, bu verim değeri çevrimde verimi artırıcı ilave önlemler alınmadan sağlanmaktadır. Ulaşılan bu yüksek verim değerinin çevrimde kombine elektrik enerjisi üreten sistemlerin kullanılmasıyla daha da artacağı aşikardır ve belki de böyle yüksek verim değerlerine günümüzde kullanılan hiçbir enerji üreten sistem ulaşamayacaktır.

KAYNAKLAR

Andersen,B.,Berry,R.S.,Nitzan,A.Salamon,P.,1977. “ Thermodynamics in Finite Time I. The Step Carnot Cycle “,Phy. Rev. Volume 15,p.p.2086-2093

Andersen,B.,Salamon,P.,Berry R.S.,1984.” Thermodynamics in Finite Time “, Physics Today,p.p.62-69

Angrist,W.S.,1982. “ Direct Energy Conversion “,In:F.Kreith,Allyn and Bacon, Inc.,Boston Massachusetts

Archie, W. C.,1991. “ Principles of Energy Conversion ”,In:J.J.Corrigan,MacGraw-Hill,Inc.,Singapore

Aybers,N.,1990.” Mühendislik Termodinamiğinin Esasları “,Birsen Yayınevi,İstanbul

Aybers,N.,Şahin,B.,1995.” Enerji Maliyeti “,Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını,Yayın No:299, İstanbul

Aydın,M.,1991.” Sonlu Zaman Termodinamiğinin MHD Jenaratör Gaz Soğutmalı Reaktör Çevrimine Uygulanması “, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul

Aydın,M.,Yavuz,H.,1993.” Application of Finite Time Thermodynamics to MHD Power Cycles “, Energy Vol. 18,No.9,p.p.907-911

Bejan,A.,1988.” Theory of Heat Transfer-Irreversible Power Plants “,Int.J.Heat and Mass Transfer,p.p.1211-1219

Coombe,R.A.,Sims,G.D.,1964” Magnetohydrodynamic Generation of Electrical Power
 “,Modern Electrical Engineering Series,London Chapman and Hall

Cropper,W.H.,1987.” Carnot’s Function : Origins of the Thermodynamic of
 Temperature “,Am.J.Phys. Vol.55,p.p.120-129

Cuzon,F.L.,Ahlborn,B.,1975.” Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power
 Output “, Appl.J.Phys. Volume 43,p.p.22-24

Devins,W.D.,1982.” Energy:Its Physical Impact on The Environment “,McGraw-
 Hill,I2nc.,USA

De Vos,A.,1985.” Efficiency of Some Heat Engines Operating at Maximum Power
 Conditions “,Am.J.Phys. Vol.58,p.p.570-573

Gordon,J.M.,1989.” Maximum Power Point Charecteristics of Heat Engines as a
 General Thermodynamic Problem”,Am.J.Phys. Vol.57,p.p.1136-1142

Gordon,J.M.,1990.” Observations on Efficiency of Heat Engines at Maximum Power
 “,Am.J.Phys. Vol.53,p.p.370-375

Hughes,W.F.,Brighton,J.A.,1967.” Theory and Problems of Fluid Dynamics “,
 MacGraw-Hill, Inc.,New York

Irving Granet,P.E.,1985.” Thermodynamics and Heat Power “,Queensborough
 Community College,Reston Publishing Company,Inc.,A Prentice-Hall Company,Reston-
 Virginia

Leff,H.S.,1987.” Thermal Efficiency at Maximum Work Output: New Results for Old
 Heat Engines “,Am.J.Phys. Vol.55,p.p.602-609

Öztürk,A.,Kılıç,A.,1984.” Termodinamik Problemleri “,Kıpaş Dağıtımçılık,İstanbul

Rosa,R.J.,1973.” MHD Power Generation “, Transaction on Plasma Science, p.p.3-12

Rubin,M.H.,1979.” Optimal Configuration of a Class of Reversible Heat Engines I “,
Phy.Rev. Volume 19,p.p.1272-1276

Salamon P.,Nitzan A.,Andersen B.,Berry R.S.,1980.” Minimum Entropy Production and
the Optimization of Heat Engines “, Phy.Rev. Volume 21,p.p.2115-2129

Salamon P.,Nitzan A.,1981.” Finite Time Optimization of a Newton’ s Law Carnot
Cycle “, J.Chem.Phys. Volume 74,p.p.3546-3560

Sheparel,W.S.,1987.” MHD Power Generation Prospects for Commercial and Space
Applications”,Transactions on Plasma Science

Spiring,K.H.,1965.” Direct Generation of Electricity “,Academic Press, London

Sutton,G.W.,1966.” Direct Energy Conversion”, McGraw-Hill,Inc.,USA

Şahin,B.,Kodal,A.,Yılmaz,T.,Yavuz,H.,1996.” Maximum Power Density Analysis of an
Irreversible Joule-Brayton Engine “,J.Appl.Phys.,p.p.1162-1167

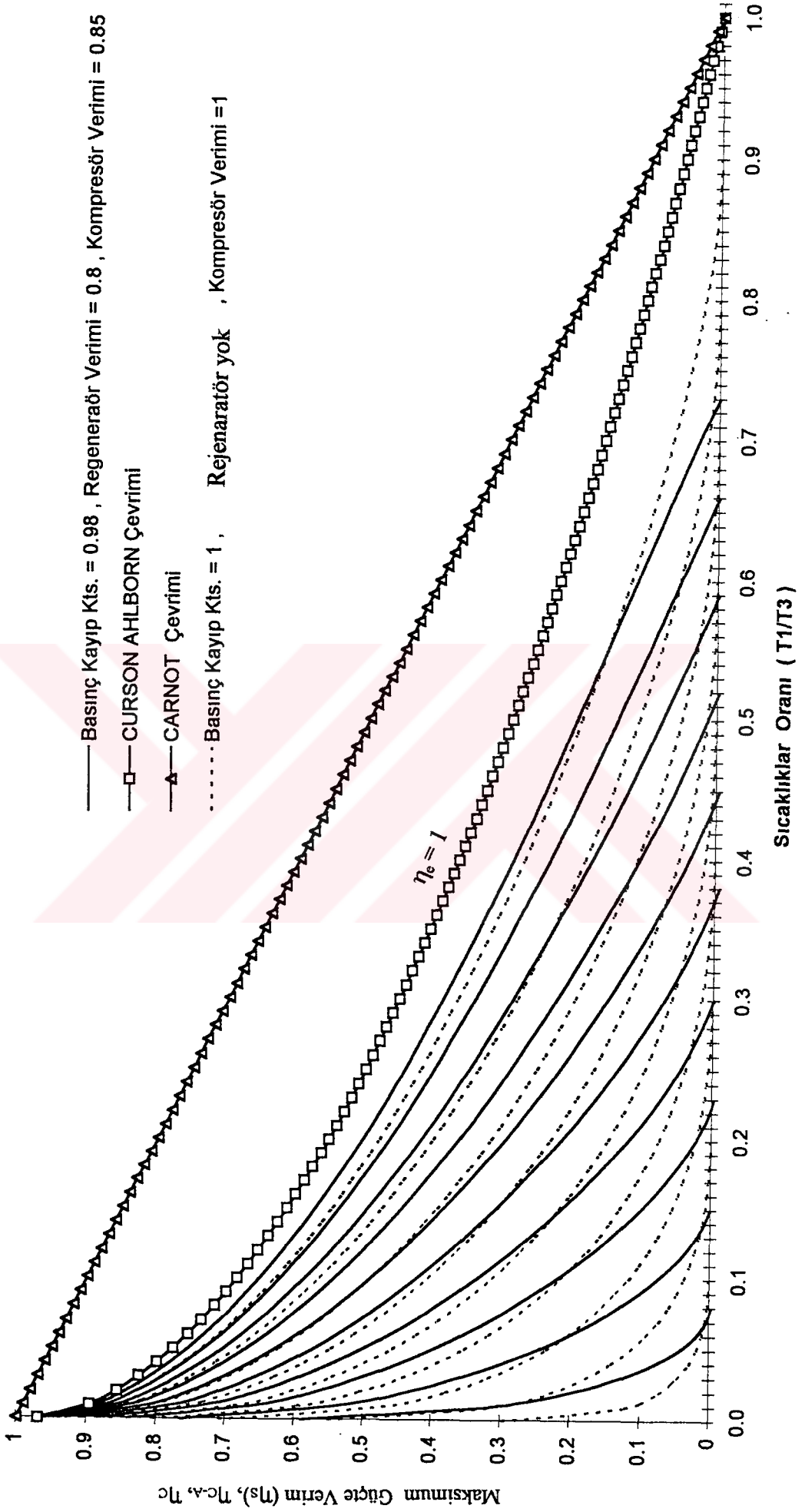
Şahin,B.,Kodal,A., Yavuz,H.,1996.” A Performance Analysis for MHD Power Cycles
Operating at Maximum Power Density “,J.Appl.Phys.

Van Wylen, G.,Sonntag, R., Borgnakke, C.,1994.” Fundamentals of Classical
Thermodynamics”,John Willey&Sons,Inc.,USA

Wu,C.,Kiang,R.L.,1992." Finite Time Thermodynamic Analysis of a Carnot Engine With Internal Irreversibility",Energy Volume 17,No.12.,p.p.1173-1178

Yavuz,H.,Göktun,S.,Özkaynak,S.,1990." Sonlu Zaman Termodinamiğinin Ist Makinalarına Uygulanması",Workshop on Second Law of Thermodynamics, Erciyes Üniversitesi, Kayseri



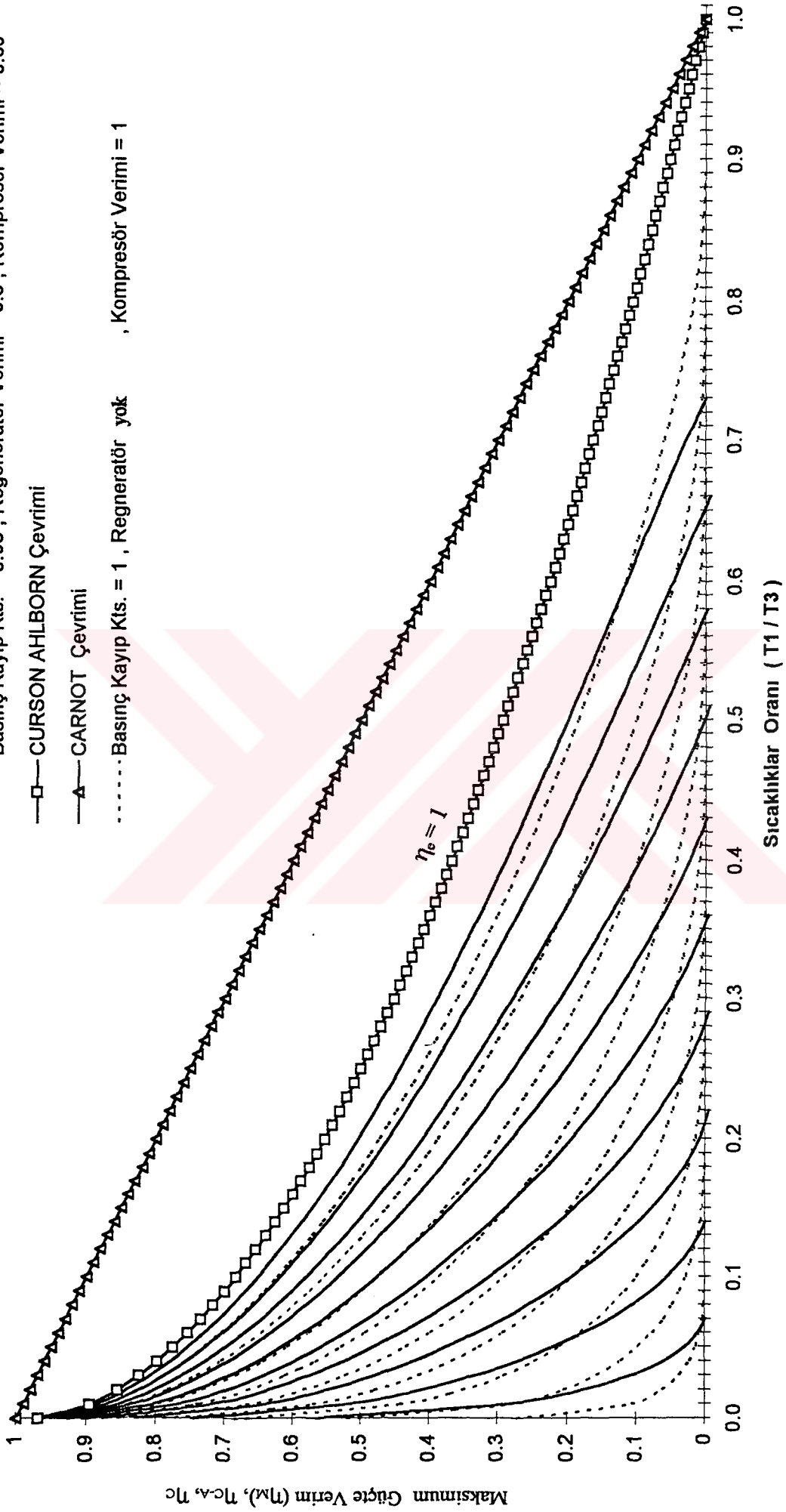


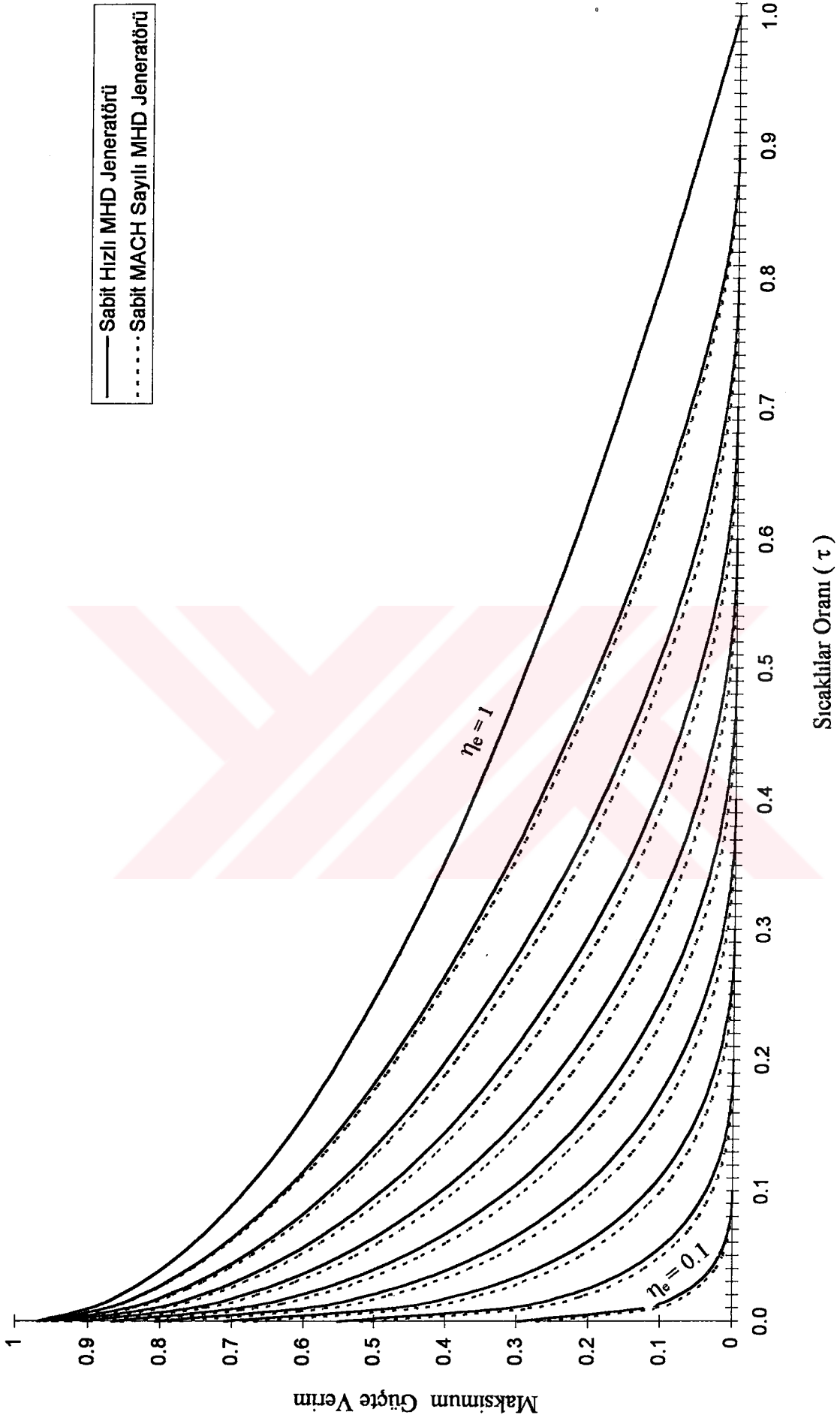
— Basınç Kayıp Kts. = 0.98 , Regeneratör Verimi = 0.8 , Kompresör Verimi = 0.85

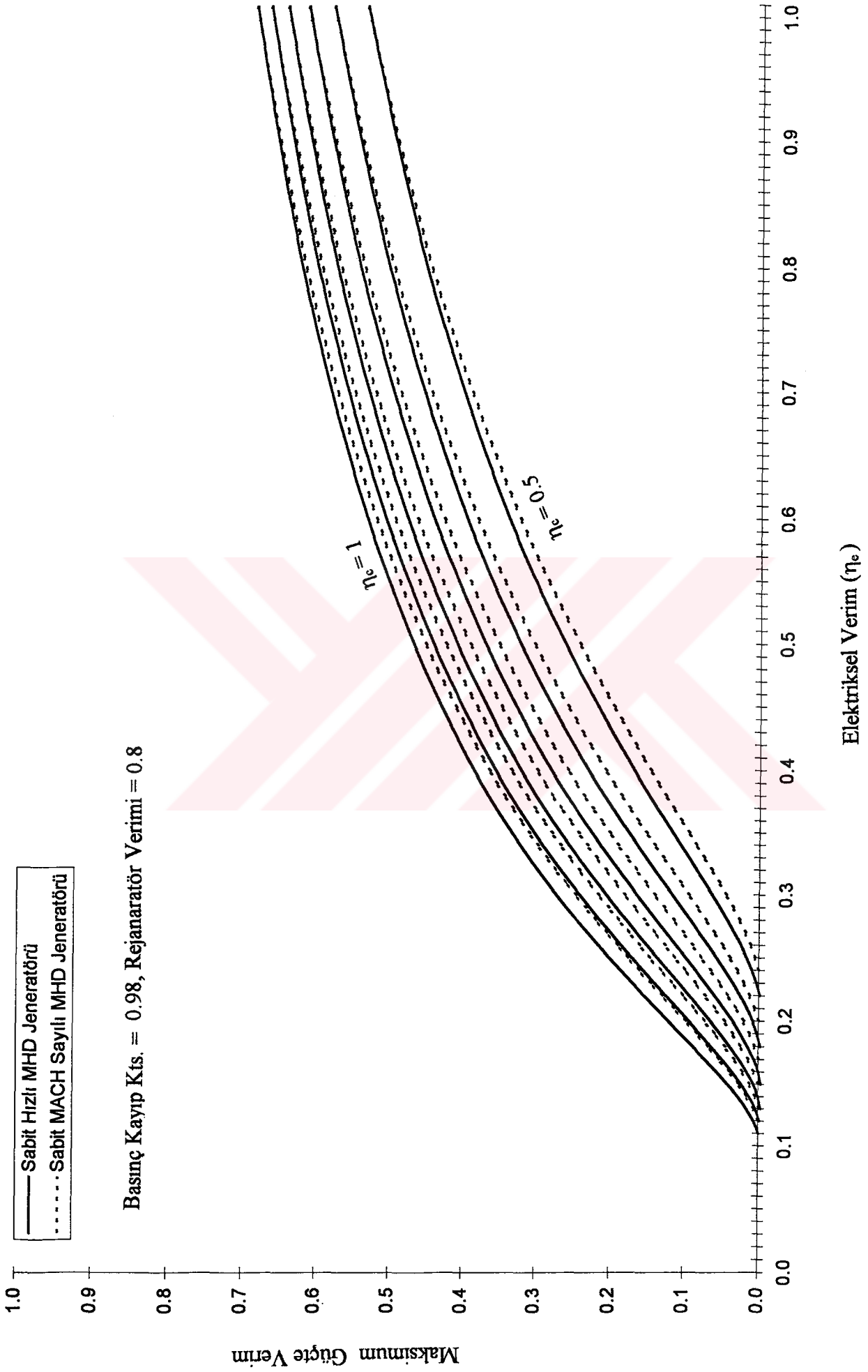
—□— CURSON AHLBORN Çevrimi

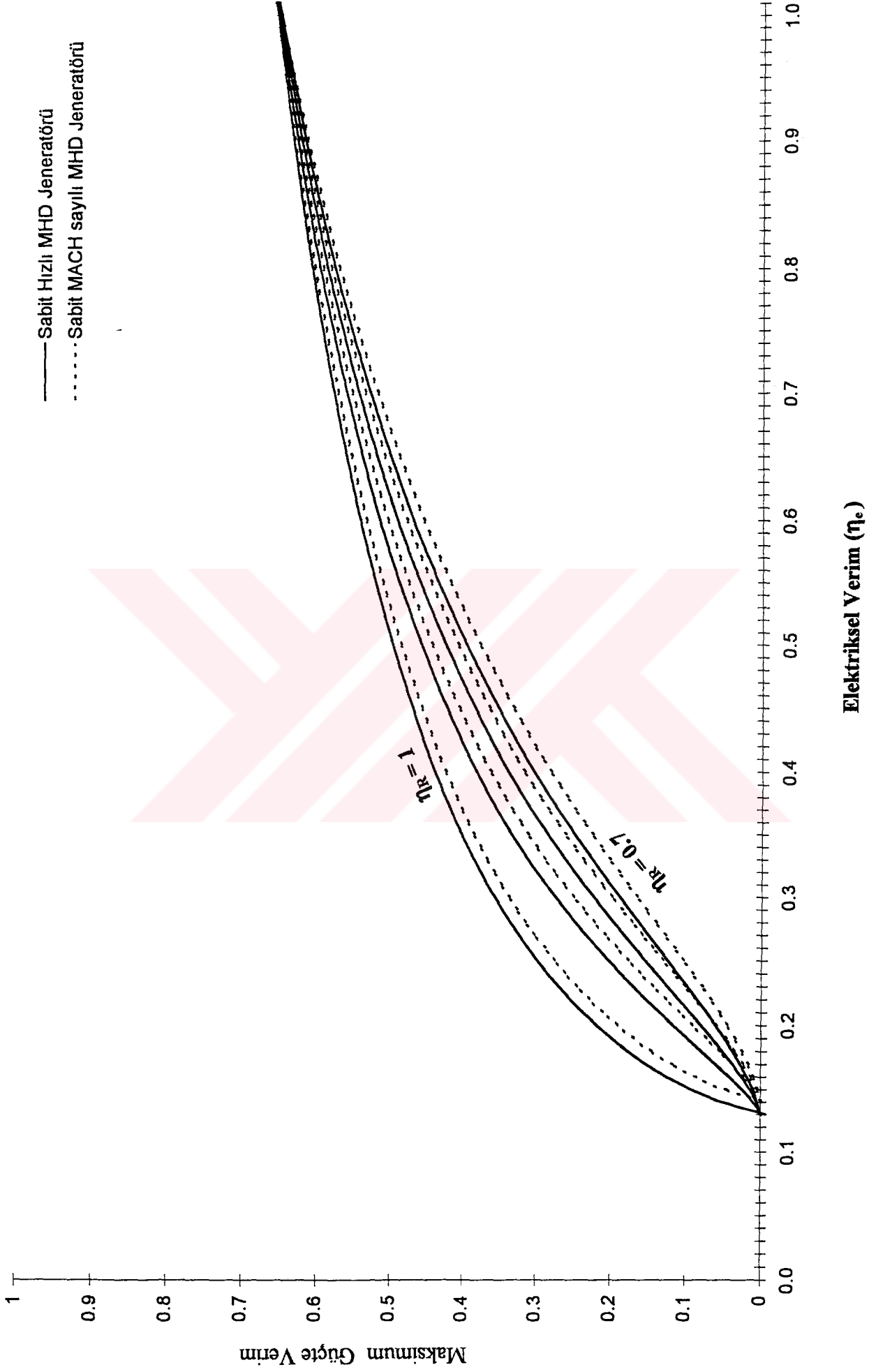
—△— CARNOT Çevrimi

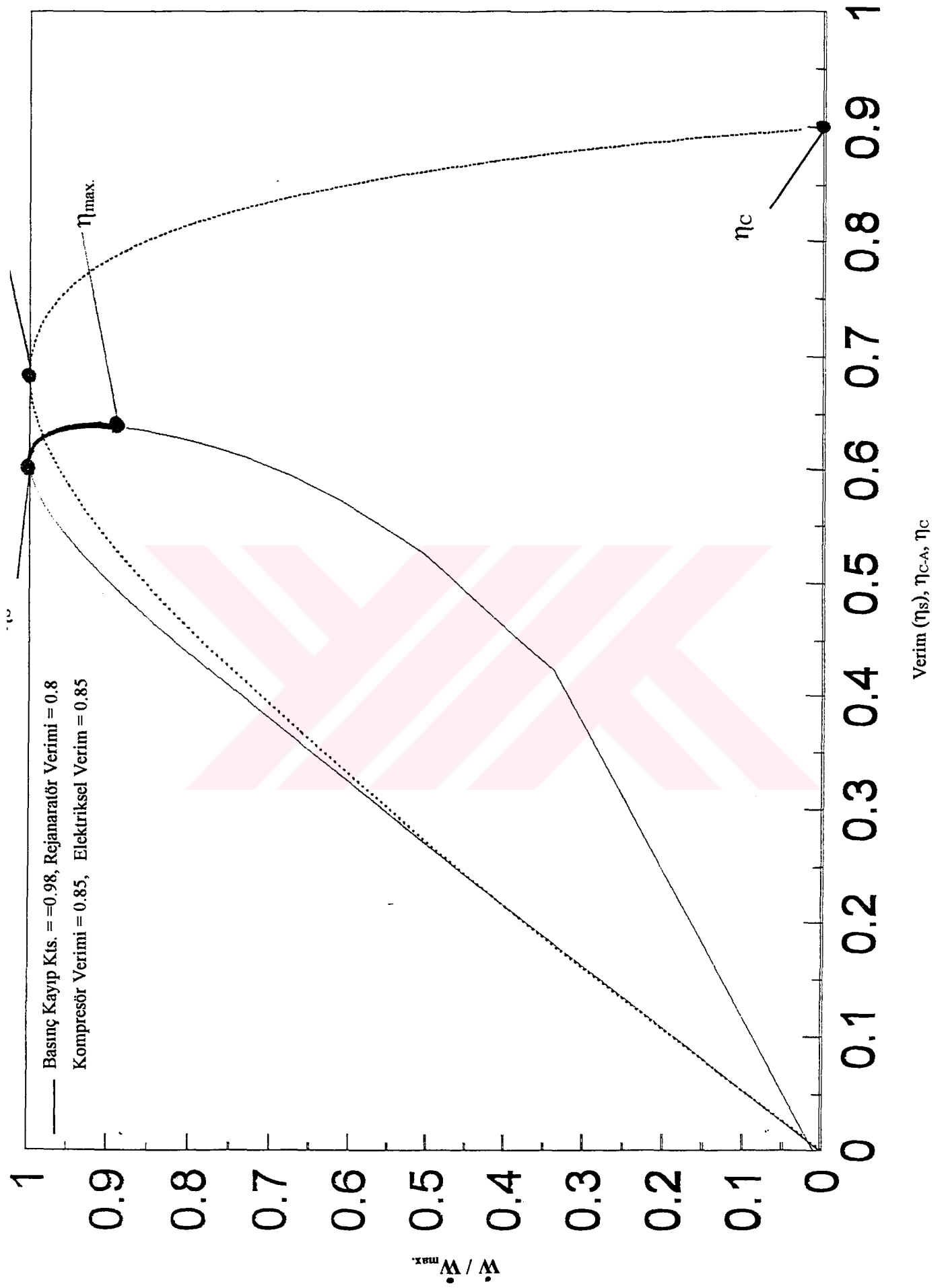
..... Basınç Kayıp Kts. = 1 , Regeneratör yok , Kompresör Verimi = 1

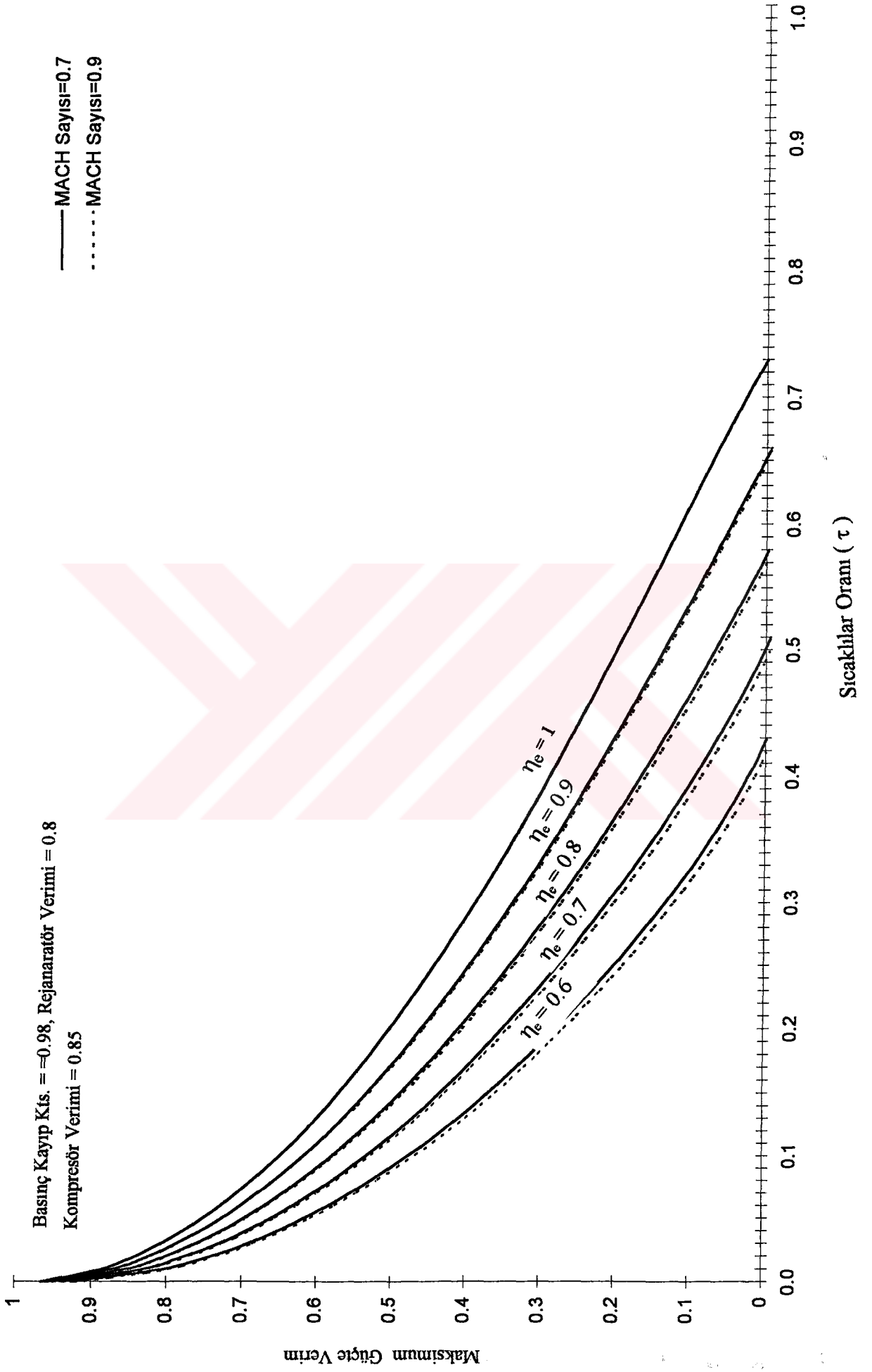












ÖZGEÇMİŞ

- Doğum Yeri ve Tarihi** : Ankara, 1973
- Lise** : İzmir Atatürk Lisesi, 1990
- Üniversite** : Yıldız Teknik Üniversitesi,
Makina Fakültesi,
Gemi İnşaatı ve Makinaları Mühendisliği Bölümü, 1994
- İş Durumu** : Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı Mühendisliği
Bölümünde Araştırma Görevliliği, 1995 -
(Halen Bu Bölümde Görevini Sürdürmektedir.)

