T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZIN (LNG) KRİYOJENİK ENERJİSİNİ KULLANARAK GÜÇ ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI: ÖRNEK ÇALIŞMA MARMARA EREĞLİSİ LNG ALIM TERMİNALİ

S.Orkun DEMİRPOLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA, 2007

T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZIN (LNG) KRİYOJENİK ENERJİSİNİ KULLANARAK GÜÇ ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI: ÖRNEK ÇALIŞMA MARMARA EREĞLİSİ LNG ALIM TERMİNALİ

S.Orkun DEMİRPOLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 23/08/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şefik BİLİR
Üye

Yrd. Doç. Dr. Rafet YAPICI
Üye

Yrd. Doç. Dr. H. Kürşad ERSOY
Danışman

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZIN (LNG) KRİYOJENİK ENERJİSİNİ KULLANARAK GÜÇ ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI: ÖRNEK ÇALIŞMA MARMARA EREĞLİSİ LNG ALIM TERMİNALİ

S.Orkun DEMİRPOLAT

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç.Dr. H. Kürşad ERSOY

2007- 55 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. Şefik BİLİR

Yrd. Doç. Dr. Rafet YAPICI

Yrd. Doç. Dr. H. Kürşad ERSOY

Bu çalışmada, LNG alım terminallerinde, LNG'nin doğalgaza dönüştürülmesi esnasında, açık Rankine, kapalı Rankine ve açık- kapalı bileşik Rankine çevrimleriyle güç üretimi araştırılmıştır. Kapalı Rankine çevriminde propan, açık Rankine çevriminde ise metan aracı akışkan olarak düşünülmüştür. Marmara Ereğlisi LNG Alım Terminali'nden (LNGMAT) temin edilen veriler kullanılarak; öngörülen çevrim türüne, türbin giriş basınçlarına, evaporatör ve kondenser sıcaklıklarına bağlı olarak terminalde üretilebilecek güç miktarları belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, açık Rankine çevrimi ile terminaldeki sıvı pompalarında halen tüketilen enerjinin % 93'ünün karşılanabileceği tespit edilmiştir. Açık-kapalı bileşik Rankine çevriminde açık Rankine türbin giriş basıncının optimum değeri 150 bar olarak bulunmuştur. Türbin giriş basıncının ve evaporatör çıkış sıcaklığının artmasıyla, kondenser çıkış sıcaklığının ise azalmasıyla, LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanan kapalı Rankine ve açık-kapalı bileşik Rankine çevriminden elde edilecek gücün arttığı tespit edilmiştir. Bileşik çevrimin kapalı Rankine kısmında türbin giriş basıncı 4.74 bar, kondenser çıkış sıcaklığı 193 K, evaporatör çıkış sıcaklığı 273 K ve açık Rankine kısmında ise türbin giriş basıncı 150 bar seçildiğinde, LNGMAT'da sıvı pompaları için gerekli gücün karşılanabileceği ve ek olarak 8.47 MW değerinde güç üretilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: LNG, kriyojenik enerji, güç üretimi, tekrar gazlaştırma.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF POWER GENERATION CYCLE UTILIZING THE CRYOGENIC ENERGY OF LIQUEFIED NATURAL GAS (LNG): CASE STUDY FOR MARMARA EREGLİSİ LNG RECEIVING TERMINAL

S.Orkun DEMİRPOLAT

Selcuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. H. Kürşad ERSOY

2007- 55 Sayfa

Jury: Prof. Dr. Şefik BİLİR

Assist. Prof. Dr. Rafet YAPICI

Assist. Prof. Dr. H. Kürşad ERSOY

Power generation during re-gasifying of LNG (i.e. from liquid to natural gas) is investigated by using open Rankine, closed Rankine and combined cycles (open-closed Rankine) in the LNG receiving terminals. Propane and methane are used as working fluids in the closed and open Rankine cycles, respectively. Power generation capacities of the system are determined according to the types of proposed cycles, inlet pressures of turbines, evaporator and condenser temperatures by using of the data supplied from Marmara Ereglisi LNG Receiving Terminal (LNGMAT).

From the results it is found that 93% of energy consumption of the existing liquid pumps in the terminal can be reduced by using open Rankine cycle. Optimum turbine inlet pressure of the open Rankine cycle part is calculated as 150 bar in the combined Rankine cycle. It is determined that power generation of the combined Rankine cycle, utilizing the cryogenic energy of LNG, increases with increasing turbine inlet pressure, increasing evaporator temperature and decreasing condenser temperature. As a conclusion, for the combined Rankine cycle, under the conditions of turbine inlet pressure of 4.74 bar, condenser exit temperature of 193 K, evaporator exit temperature of 273 K in the part of the closed Rankine cycle and turbine inlet pressure of 150 bar in the part of the open Rankine cycle, all the required energy for the liquid pumps in the LNGMAT can be obtained and approximately 8.47 MW of excess power can be generated.

Keywords: LNG, cryogenic energy, power generation, re-gasification.

ÖNSÖZ

LNG alım terminallerinde güç üretimi üzerine araştırmalar, özelikle son yıllarda artarak devam etmektedir. Çalışmaların büyük bölümü uzak doğu ülkelerinde ve ABD'de kurulu veya kurulacak tesisleri kapsamaktadır. Literatür araştırması sonucunda, Türkiye'de bu konu ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Hâlbuki Türkiye'de 6 Milyar Nm^3/yıl kapasitedeki Marmara LNG Alım Terminali, 1994 yılından beri çalışmaktadır. İkinci bir LNG alım terminali ise, yakın zamanda gazlaştırma işlemlerine başlayacak olan İzmir Aliağa LNG Alım Terminali'dir ve 10 Milyar Nm^3/yıl kapasitede planlanmıştır. LNG alım terminallerinde güç üretimi üzerine araştırmaların yoğunlaşması ve bu konunun Türkiye'yi de yakından ilgilendirmesi, bu çalışmanın çıkış noktasıdır.

Hazırlanan bu tez çalışması, Marmara Ereğlisi LNG Alım Terminali'ne uygulanabilecek güç üretim metotlarını ve bunların ısıl analizlerini kapsamaktadır. Bu nedenle, hem BOTAŞ hem de adı geçen terminal yetkilileri ile görüşülerek tesis yerinde incelenmiş ve tesisin gaz akış diyagramları temin edilmiştir. Yapılan ısıl analizlerde terminalden sağlanan bu veriler kullanılmıştır. Sunulan bu tez çalışmasının dışında, bu konuda araştırmacıların görüşlerini, eleştirilerini, katkılarını almak ve tartışılmasını sağlamak amacıyla bu tez çalışmasından üç adet bildiri üretilmiştir. Bunlar;

1) ICCI'da (Uluslararası Kojenerasyon Konferansı 30-31 Mayıs 2007, İstanbul) tartışmaya açılan, "LNG'nin Kriyojenik Enerjisini Kullanarak Güç Üretiminin Araştırılması" başlıklı çalışma,
2) Enerji Verimliliği Kongresi'nde (1-2 Haziran 2007, Kocaeli) sunulan, "LNG Alım Terminallerinde Direkt Genleşme Metodu İle Enerji Geri Kazanımı" konulu bildiri,
3) Teskon 2007'de (18-21 Ekim, İzmir) sunulacak olan, "LNG'nin Kriyojenik Enerjisini Kullanan Güç Çevriminin Analizi" adlı çalışmalardır.

S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan bu çalışmanın, Türkiye'deki LNG alım

terminallerine yönelik bilimsel çalışmalara öncülük edeceği ve faydalı olacağı kanaatindeyim.

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Kürşad ERSOY' a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, bu çalışmam süresince büyük bir sabırla bana destek olan, aileme ve değerli eşim Öğr. Gör. Havva DEMİRPOLAT' a sonsuz teşekkür ederim.

S.Orkun Demirpolat

İÇİNDEKİLER

ÖZET iii
ABSTRACT iv
ÖNSÖZ v
İÇİNDEKİLER vi
SİMGELER ix
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
3. TEORİK ESASLAR 9
3.1. Rankine Çevrimi 9
3.1.1. İdeal Rankine Çevrimi 9
3.1.2. Gerçek Rankine Çevrimi 10
3.1.3. Rankine Çevriminde Verim Artırma Yöntemleri 12
3.1.3.1. Kondenser Sıcaklığının Azaltılması (Yoğuşturucu Basıncının Düşürülmesi) 13
3.1.3.2. Evaporatör Çıkış Sıcaklığının Arttırılması (Buharın Kızdırılması) 14
3.1.3.3. Türbin Giriş Basıncının Arttırılması (Kazan Basıncının Yükseltilmesi) 14
3.2. LNG Alım Terminallerinde, Açık Rankine Çevrimi İle Güç Üretimi 16
3.3. LNG Alım Terminallerinde, Kapalı Rankine Çevrimi İle Güç Üretimi 18
3.4. LNG Alım Terminallerinde, Açık-Kapalı (Bileşik) Rankine Çevrimi İle Güç Üretimi 20
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 22
4.1. Açık Rankine Metodu(Direkt Genleşme) ile Enerji Üretimi 23
4.2. Kapalı Rankine Metodu ile Enerji Üretimi 27
4.3. Açık-Kapalı (Bileşik) Rankine Metodu ile Güç Üretimi 33
4.4.Örnek Çalışma: Marmara LNG Alım Terminalinde (LNGMAT) Güç Üretimi 40
4.4.1. LNGMAT'a Açık Rankine Çevriminin Uygulanması 40

4.4.2. LNGMAT'a Kapalı Rankine Çevriminin Uygulanması 42
4.4.3. LNGMAT'a Bileşik Rankine Çevriminin Uygulanması 45
4.4.4. LNGMAT'a Uygulanan Üç Farklı Metodun Kıyaslanması 48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 52
6. KAYNAKLAR 54

SİMGELER

h	Özgül entalpi, (kJ/kg)
m	Kütle debisi, (kg/s)
P	Basınç, (bar)
Q	Isı gücü, (kW)
q	Transfer edilen özgül ısı miktarı, (kJ/kg)
T	Sıcaklık, (K, ^{o}C)
W	İş, (kJ/kg)
η	Verim

Kısaltmalar

LNG	Sıvılaştırılmış doğalgaz
LNGMAT	Marmara LNG alım terminali

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlar grubundan hidrokarbon esaslı bir yakıt olan doğalgaz renksiz, kokusuz, havadan hafif, zehirsiz bir gazdır. Bileşiminde % 90'nı metan olmak üzere, etan, propan, bütan, karbondioksit, oksijen ve azot gazları bulunmaktadır. Doğal gaz zehirleyici değildir. Çevre dostu 'yeşil yakıt' olarak da adlandırılan doğal gaz, temiz yakıt özelliği sayesinde birçok sektörel alanda ısınma veya enerji üretimi amacıyla kullanılmaktadır.

Tükettiği enerjinin % 23'ünü doğal gazdan karşılayan Türkiye, ihtiyacı olan doğal gazın % 7'sini kendisi üretmektedir. Kalan miktarını ithal etmektedir. Türkiye mevcut doğalgaz ithalatının % 80'nini boru hatları ile sağlamaktadır. Ülkeye boru hatları ile ithal edilen doğal gazın % 65'i Rusya Federasyonu'ndan, % 35'i de İran'dan karşılanmaktadır(http://www.botas.gov.tr).

Doğal gaz ihracatı yapan ülkeler politik, stratejik ve teknik nedenlerden dolayı karşılıklı ticari anlaşmalara zaman zaman uymamaktadırlar. Özellikle kış mevsiminde doğalgaz kullanımında yaşanacak bir aksaklık, ısınma amaçlı evsel kullanımlarda halkın mağduriyetine, hammadde ve enerji kaynağı olarak sanayide büyük ekonomik zararlara sebep olacaktır.

Bu nedenle bazı ülkeler doğal gaz arz kaynaklarının çeşitlendirilmesi, arz güvenliği ve esnekliğinin arttırılması için LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz) ithalatı yapmaktadırlar. Bu ülkeler sadece doğal gaz arz kaynaklarını çeşitlendirmek amacıyla değil, kaynak ile tüketici arasında ki mesafe çok uzunsa (> 4000 km) (http://www.halliburton.com) boru hattı döşemek yerine, ekonomik açıdan daha avantajlı olan LNG'yi de ithal ederler. Bu ülkelere en iyi örnek Japonya'dır. Doğal gazın tümünü ithal eden Japonya'da birçok LNG alım terminali bulunmaktadır.

Türkiye ise, halen Cezayir'den 4 milyar Nm^3/yıl ve Nijerya'dan 1.2 milyar Nm^3/yıl olmak üzere toplam 5.2 milyar Nm^3/yıl doğalgaza eşdeğer LNG ithalatı yapmaktadır. 1994 yılında işletmeye alınan Tekirdağ'ın Marmara Ereğlisi'nde bulunan BOTAŞ LNG Alım Terminali, 2006 yılında ~ 4.4 milyar Nm^3 doğal gazı tüketim hattına göndermiştir. Ülkemizde ikinci LNG alım terminali ise 2001 yılında kurulan ve bu yıl hizmete giren 10 milyar Nm^3/yıl kapasiteye sahip İzmir Aliağa

LNG Alım Terminali'dir (http://www.alto.org.tr). Ülke için gerekli olan doğal gazın %20'sini halen LNG olarak ithal eden Türkiye, LNG alım terminallerine yaptığı yeni yatırımlar ile bu payı artırmayı planlamaktadır.

Terminallere deniz yolu ile 1 bar basınçta ve $-160^{o}C$ sıcaklıkta getirilen LNG, tüketiciye gönderilmeden önce gazlaştırılır. Terminalde LNG gazlaştırılırken genelde deniz suyundan veya daldırılmış buharlaştırıcılardan faydalanılır. Deniz suyu ile buharlaştırmak için ~8 kWh/tonLNG enerji tüketilirken, daldırılmış buharlaştırıcılarda ~200 kWh/tonLNG enerji tüketilir (Kaneko ve ark. 2004). LNG tekrar gaz haline dönerken çevreden büyük miktarda ısı çekmektedir. Bu durumdan faydalanmak için LNG alım terminallerinin yanına elektrik santralleri veya soğuk hava depoları kurulabilir.

Doğalgazı sıvılaştırmak için 850 kWh/tonLNG enerji tüketimi olurken (Liu ve You 1999), tekrar gazlaştırmak için bir önceki paragrafta bahsedilen miktarlarda enerji tüketimi söz konusudur. Hâlbuki LNG'yi tekrar gazlaştırmak için enerji tüketmek yerine LNG'nin kriyojenik enerjisinden faydalanılarak 240 kWh/tonLNG elektrik enerjisi üretilebilir(Liu ve You 1999). Bu tür terminallerde enerji üretimi, LNG'nin soğuk enerjisinin kullanılması ile veya LNG'nin basıncını yükseltip gazlaştırıldıktan sonra türbinden geçirerek (direkt genleşme metodu) mümkündür. Fakat bahsedilen enerji üretimi Marmara Ereğlisi LNG Alım Terminali'nde bulunmamaktadır. Marmara Ereğlisi LNG Alım Terminali'nde de LNG'yi tekrar gazlaştırmak için deniz suyundan faydalanıldığı gibi, doğal gaz tüketiminin arttığı zamanlar buharlaştırma işlemini hızlandırmak için deniz suyuna daldırılmış buharlaştırıcılar da kullanılmaktadır.

Son yıllarda LNG alım terminallerinde güç üretimi üzerine çalışmaların yoğunlaşması ve bu konunun iki adet toplam ~16 milyar Nm^3/yıl kapasiteli LNG alım terminallerine sahip Türkiye'yi de yakından ilgilendirmesi, bu çalışmanın çıkış noktasıdır.

Hazırlanan bu tez çalışması, Marmara Ereğlisi LNG Alım Terminali'ne uygulanabilecek güç üretim metotlarını ve bu metotların ısıl analizlerini kapsamaktadır. Söz konusu terminalden temin edilen veriler kullanılarak, üç değişik (Açık Rankine, Kapalı Rankine, Bileşik Açık-Kapalı Rankine) metot uygulaması ile üretilebilecek güç miktarları tespit edilmiştir. Elde edilen güç üretim miktarlarının

çalışma şartlarına bağlı olarak belirlenmesi ve mevcut tesisin işletme maliyetlerini düşürerek ek enerji üretebilmesi için, terminale önerilen güç üretim yöntemlerinin karşılaştırmalı sonuçlarının sunulması, bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Enerji ihtiyacının her geçen gün arttığı ve enerji kaynaklarının giderek azaldığı dünyamızda, LNG'nin kriyojenik enerjisi kullanılarak güç üretimi üzerine yapılan bilimsel çalışmaların önemi her geçen gün artmaktadır. Literatür araştırmasında rastlanan ve LNG alım tesislerinde uygulanan güç üretim metotları, üç ana grupta toplanabilir. Bunlar;

1) Sadece Rankine çevrimlerini kullanan güç üretim metotlarıdır. Bu grup, kendi içinde üç ayrı şekilde düzenlenebilmektedir. Sadece açık Rankine, sadece kapalı Rankine ve son olarak ta bileşik açık - kapalı Rankine çevrimleriyle güç üretilmesidir.
2) Sadece gaz türbin çevrimiyle güç üretilmesidir.
3) Bileşik Rankine ve Brayton çevrimleriyle güç üretimidir.

İlk yöntemde LNG'nin sadece kriyojenik enerjisinin kullanıldığı ve herhangi bir şekilde güç üretimi için tüketilmediği, son iki metot ta ise terminalde gazlaştırılan LNG'nin güç üretmek amacıyla en azından bir kısmının tüketildiği de burada vurgulanmalıdır. Yukarda verilen ve üç ana kategoride toplanan güç üretme metotlarını kapsayan araştırmaların detayları aşağıda sunulmuştur.

Cotana ve Pispola (2005), sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) tekrar gazlaştırılması sırasında direkt genleşme yoluyla enerji geri kazanımını araştırdılar. LNG'nin basınçlandırılması esnasında kullanılan sıvı pompaları için gerekli enerjiyi karşılamak amacıyla LNG alım terminallerinde açık Rankine çevrimini öngörmüşlerdir. Tüketiciye gönderilen basma hattında doğal gazın basıncı 80 bar civarında olmasına rağmen, LNG'nin, önce 150 bar basınca bir sıvı pompası ile çıkarıldıktan sonra deniz suyu ile gazlaştırıldığını ifade ettiler. Daha sonra gaz haline gelen akışkan bir türbinden geçirilerek tekrar 80 bar basınca indirildi. Böylece türbinden ~32 kJ/kg değerinde net iş elde edilebileceğini belirlediler. 70 kg/s debi ve yıllık $3x10^9$ m^3 gaz üretimi için ~1.8 MW değerinde bir enerji geri kazanımının (yılık ~13.6 GWh elektrik enerjisi) elde edilebileceğini ifade ettiler.

Liu ve You (1999), LNG'nin kriyojenik enerjisinin bir Rankine çevriminde kullanılmasını araştırdılar. Yaptıkları çalışmada bir ton LNG üretimi için ~850 kWh

elektrik enerjisi tüketildiğini, LNG'nin soğuk enerjisinin kullanılması ile tekrar gazlaştırılması esnasında, ~240 kWh'lik bölümünün geri kazanılabileceğini ifade ettiler. LNG'nin kriyojenik ekserjisinin kullanımı için düşük(5 bar), orta(20 bar) ve yüksek basınçlı(70 bar) üç ayrı karma çevrim önerdiler. Yüksek basınçlı karma çevrimde; LNG'yi önce Propan kullanan Rankine güç çevriminin kondenserinden atılan ısı ile daha sonra deniz suyu ile gazlaştırılacağını ifade ettiler. Tekrar gaz durumuna gelen LNG'nin bir bölümü tüketim hattına verilirken diğer bölümü bir türbinden geçirilerek tekrar LNG'nin ön ısıtılmasında kullanılmak üzere LNG hattına gönderildi. 450 MW gücündeki bir çevrimin ~150 t/h LNG tükettiğini, orta basınçlı karma çevrim kullanıldığında ise 11.7 MW gücünde bir enerji geri kazanımı olacağını belirttiler.

Bisio ve Tagliafico (2000), yakın bir gelecekte muhtemelen LNG tüketiminin artması nedeniyle, çevre sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta ve sıvı fazda bulunan LNG'nin fiziksel ekserjisinin kullanımının daha önemli hale geleceğini ifade ederek bu konuyu incelediler. Güç çevriminde ısıl verimin, maksimum ve minimum sıcaklıklara (Yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağı ile düşük sıcaklıktaki ısı kaynağı sıcaklıklarına) bağlı olduğunu, LNG gazlaştırma tesislerinde -160 ^{o}C civarındaki ortamı düşük sıcaklıktaki ısı kaynağı olarak kullanmanın güç çevriminin verimini teorik olarak yaklaşık %13 artıracağını ifade ettiler. Bundan başka, bu soğuk ortamın, kriyojenik soğutmada da kullanılabileceğini de belirttiler.

Qiang ve ark. (2004), 110 K sıcaklıktaki LNG'nin fiziksel ve kimyasal ekserji veriminin yüksek olduğunu belirttiler. Güç üretimi esnasında düşük sıcaklıktaki ısı kaynağının sıcaklığının ısıl verime etkisini araştırdılar. LNG gazlaştırma tesislerinde Rankine çevrimi ile güç üretimini incelemek için, 60^{o}C ile -60 ^{o}C arasında çalışan Rankine güç çevriminde akışkan olarak propan kullanıldığını düşündüler. LNG önce Rankine çevriminin kondenserinden atılan ısı ile sonra deniz suyu ile gazlaştırıldıktan sonra bir türbinden geçirilerek tüketim hattına gönderildi(açık-kapalı bileşik Rankine çevrimi). Böylece hem Rankine çevriminin verimi arttı hem de gazlaştırma için gerekli enerji karşılanmış oldu. Güç çevriminin ısıl ve ekserji veriminin kondenser sıcaklığı arttıkça düştüğünü belirlediler. Türbin giriş basıncının yükseltilmesi ve yoğuşma sıcaklığının düşürülmesi ile ısıl ve ekserji verimini % 30-40 oranında arttırılabileceğini de vurguladılar. Yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağı

kullanıldığında (> 70 ^{o}C), güç üretiminin % 3 ile % 5 oranında artacağını da ifade ettiler.

Cho ve ark. (2005), LNG alım terminallerinde LNG'nin buharlaştırılması için ısıya ihtiyaç varken, bir güç çevriminin ise çevreye ısı atması gerektiğini vurguladılar. Bu durumda LNG alım terminali ve güç üretim tesisinin dikkatli bir entegrasyonunun bir sinerji oluşturabileceğini belirttiler. Bu birleşmenin güç üretimini artıracağını, bakım ve işletme maliyetini ise %20-25 civarında düşüreceğini ifade ettiler.

Punwani (2003), Gaz türbin çevrimlerinde kompresör giriş sıcaklığının 59^{o}F (15 ^{o}C)'dan 100 ^{o}F (~ 38 ^{o}C)'ye çıktığında güç üretiminin % 27 azaldığını, bu nedenle özellikle yaz mevsiminde kompresör girişinde havanın sıcaklığının LNG kullanılarak düşürülebileceğini belirtti.

Kaneko ve ark. (2004), Enerji geri kazanımını sağlamak için, alt çevrim olarak ters Brayton ve üst çevrim olarak doğal gaz yakıtlı klasik gaz türbin çevriminin yeni bir kombinasyonu olan MGT'nin (Mirror gas türbine) kullanılması gerektiğini savundular. Gaz türbini çevriminde ortama atılan ısıyı LNG'yi gazlaştırmakta kullanarak, gaz haline gelen akışkanın bir türbinde genişletilerek tüketim hattına verilmeden önce güç üretildiğini ifade ettiler. MGT kullanıldığında ortama atılan ısının %20'sinin faydalı işe dönüştürülebileceğini belirlediler.

Zhang ve Lior (2006), CO_2 ve diğer atık gaz emisyonları neredeyse sıfıra yakın olan yüksek verimli LNG yakıtlı yeni bir güç tesisi öngördüler. Tesislerde kullanılan bir Brayton ve bir de Rankine çevriminden oluşan kombine sistemi incelediler. Her iki çevrimde de CO_2 gazının kullanıldığını ifade ettiler. LNG'nin, Rankine çevriminin kondenserini ve Brayton çevriminin kompresör girişinde CO_2 gazını soğutmakta kullanıldığını ve böylece LNG'nin ısı alarak gazlaştırıldığını belirttiler. Havanın bir ASU (air seperation unit)'dan geçirilip diğer bileşenleri atılarak, sadece ayrıştırılan (O_2) gazı doğal gaz (CH_4) ile Brayton çevriminin kazanında yakıldığını ifade ettiler. Böylece yeni sistemin net enerji verimini % 66, ekserji verimini ise % 52 buldular.

Qiang ve ark. (2005), LNG'nin fiziksel ekserjisinin iyileştirilmesinin ve soğuk enerjisinin yeniden kullanılmasının çevreye ve enerji tasarrufuna etkilerini araştırdılar. LNG'nin fiziksel ekserjisinin iyileştirilmesi sadece enerji tasarrufunu

etkilemediğini, aynı zamanda çevreyi de koruduğunu vurguladılar. Kombine güç çevirimlerinde, kondenser çıkış sıcaklığının düşürülmesi ve türbin giriş basıncının yükseltilmesi ekserji verimini % 40-50 arasında arttıracağı sonucuna vardılar. Gaz türbin güç üretim çevrimlerinde LNG'nin soğuk enerjisinin kullanılması ve türbin giriş havası sıcaklığının düşürülmesi ile daha fazla güç çıktısının olacağını belirttiler. Türbin giriş hava sıcaklığının 10 K düşürülmesi ile güç üretiminin % 10 ve çevrim veriminin %2 daha yükselebileceğini belirlediler. Böylece sistemin ekserji verimin % 50 arttırılabileceğini vurgulamış oldular. Yine bu çalışmada, LNG'nin soğuk enerjisini kullanarak otomobil iklimlendirmesi yapılabileceğini ifade ederek bunun için bir sistem önerisinde bulundular.

Choi ve Chang (1999), LNG'nin soğuk enerjisinden faydalanılarak üç değişik güç üretim çevrimini birbiri ile kıyasladılar. Bu güç çevirimleri; Açık Rankine çevrimi, kapalı rankine çevrimi ve kapalı Brayton çevrimidir. LNG'nin gazlaştırılması esnasında türbin giriş basınç değişiminin ve kütle debisinin ısıl verime etkisini araştırdılar. 1 kg LNG ile açık Rankine çevriminde 337 kJ, kapalı Rankine çevriminde 370 kJ ve Brayton çevriminde 863 kJ enerji üretilebileceğini hesapladılar. Aynı zamanda, optimum türbin giriş basınç değerine göre her bir güç çevrimi için termodinamik verim analizi yaptılar. Kapalı Rankine ve Brayton çevrimlerinde kullanılan farklı akışkanların güç üretim verimini etkilediği sonucuna vardılar. Bu çevrimlerden pratikte ısıl verimi en yüksek olan güç üretim metodunun açık Rankine çevrimi olduğunu vurguladılar.

Sugiyama (2001), LNG' nin kriyojenik enerjisi ile güç üretimini iki ayrı metot halinde inceleyip, bu metotların birleştirilmesi ile güç üretiminin değişimini araştırdı. Bunlar direkt genleşme metodu, kapalı Rankine çevrimi ve iki sistemin birleştirilmesi ile bileşik çevrim metotlarıdır. Bu metotların kullanıldığı LNG alım terminallerinde havanın ayrıştırılmasının diğer klasik yöntemlere göre elektrik tüketiminin % 50 oranında azaltılacağını ifade etti. Bir ton LNG ile Direkt genleşme metodundan 35 kWh, kapalı Rankine güç çevriminden 29 kWh ve bileşik sistemden ise 46 kWh elektrik enerjisi üretilebileceğini belirtti. Ayrıca bileşik güç çevrimi kullanılan tesislerde CO_2 emisyonunun daha da azalacağını vurguladı.

Otsuka (2006), Japonya'daki Senboku LNG Alım Terminali'nde gazlaştırma prosesinin kapasitesini ve güç üretim metotlarını araştırdı. Kriyojenik güç üretimi

yapan tesislerde buharlaştırıcı olarak deniz suyu yanında farklı akışkan (propan) ile bir kapalı rankine çevrimi kullanılması gerektiğini ifade etti. Böylelikle her iki güç çevriminin birlikte kullanılması ile iki ayrı türbinden daha fazla miktarda güç üretimi sağlanacağı sonucuna vardı. Bu bileşik güç çevriminin yeni kurulacak LNG alım terminallerine uygulanabileceğini belirtti.

Yukarıda bahsedilen araştırmalardan da anlaşılacağı gibi, LNG'nin kriyojenik enerjisi kullanarak güç üretimi üzerine çalışmalar günceldir ve son yıllarda LNG tüketiminin yaygınlaşması ile bu konunun önemi gittikçe artmaktadır. Güç üretim metotları üzerine yapılan çalışmalarının tamamında, LNG'nin soğuk enerjisinden faydalanma olgusu ve atık gazlar yönünden çevreye olumlu etkisi vurgulanmıştır.

Literatür taraması esnasında, Türkiye'de bulunan LNG alım terminallerinde güç üretimi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Türkiye'de halen iki adet LNG alım terminali vardır. Bunlardan Marmara Ereğlisi'nde bulunan LNG alım terminali 6 Milyar Nm^3/yıl kapasitededir. Şu günlerde, ikinci LNG alım terminali 10 Milyar Nm^3/yıl kapasiteli İzmir Aliağa tesisi de hizmete girmiştir. Marmara Ereğlisi'nde bulunan LNG alım terminali yerinde gezilmiş, gazlaştırmada kullanılan yöntem tespit edilmiştir. Buna göre, adı geçen tesiste LNG'nin tekrar gazlaştırılması esnasında deniz suyu ve daldırılmış buharlaştırıcılar kullanılmakta ve LNG'nin soğuk enerjisi çevreye atılmaktadır. Bu tez çalışmasında, mevcut LNG alım terminalinde doğalgazı tüketmeden sadece soğuk enerjisinden faydalanarak güç üretim metotları incelenecektir. Bu nedenle, gaz türbinli çevrimler göz önüne alınmamış, tesisten sağlanan veriler kullanılarak sadece Rankine çevrimleri (açık Rankine, kapalı Rankine ve açık-kapalı bileşik Rankine) ile elde edilebilecek güç miktarları araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araştırma esnasında, güç üretimini etkileyen başlıca faktörlerden olan türbin giriş basınçlarının, buharlaştırıcı ve kondenser sıcaklıklarının etkileri de göz önüne alınmıştır.

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Rankine Çevrimi

Pratikte değeri olan en basit buhar çevrimi, Rankine çevrimi olarak adlandırılmaktadır. Termodinamik bir çevrim olan Rankine çevrimi, ısının süreklilik içinde işe dönüştürülmesini sağlayan, buharın kullanıldığı enerji santralleri için ideal çevrimdir. Bu basit çevrim, elektrik jeneratörünü çeviren buhar türbinini, kazandan sağlanan buharın beslemesi üzerine kuruludur. Türbinden çıkan buhar kondensere girer ve buradan yoğuşan buhar, sıvı olarak pompa ile tekrar kazanı besler.

Bu çevrimde yapılan sıvının kızgın buhar haline getirilmesi ve tekrar kondenserde doymuş sıvı haline getirilmesi Carnot çevriminde karşılaşılan pek çok zorluğu da ortadan kaldırır (Çengel ve Boles 1996).

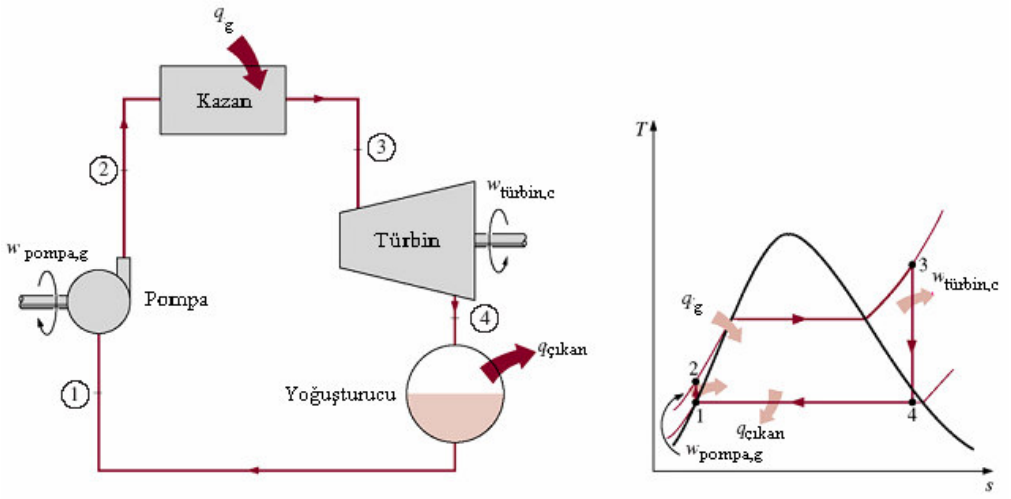
3.1.1. İdeal Rankine Çevrimi

Buharlı güç santralleri için tersinmezliklerin ihmal edildiği ideal Rankine çevriminin Şekil 3-1'de şeması ve T-s diyagramı görülmektedir.

İdeal Rankine çevrimimde dört hal değişimi vardır.

1-2 Düşük basınçtaki sıvı, pompa tarafından izentropik sıkıştırılarak yüksek basınç ile kazana pompalanır.

2-3 Yüksek basınçlı sıvı bir dış ısı kaynağı (kazan) ile sabit basınç altında kızdırılmış buhar halini alana dek ısıtılır. Isı kaynağı olarak kömür, doğalgaz veya nükleer ısı kullanılabilir. Bu araştırmada ise ısı kaynağı olarak deniz suyu veya atık ısının kullanımı öngörülmüştür.



Şekil 3.1 İdeal Rankine Çevrimi (Çengel ve Boles 1996)

3-4 Kızgın buhar, türbinde sabit entropide izentropik olarak genişler ve bir mili döndürerek iş yapar. Mil elektrik üretimi için jeneratöre bağlanmıştır.

4-1 Türbinden çıkan buhar sabit basınçta ısı kaybederek yoğuşturucuya (kondenser) girer. Sıvı-buhar karışımı göl, akarsu veya atmosfere ısı vererek sabit basınçta doymuş sıvı halini alır. Bu araştırmada ise kondenserin ısısını LNG'ye verdiği düşünülmüştür. Sıvı daha sonra tekrar pompaya girerek çevrimi tamamlar.

3.1.2. Gerçek Rankine Çevrimi

İdeal Rankine güç çevrimindeki akış sürtünmeleri ve çevreye verilen ısı kayıpları göz önünde tutulursa çevrimdeki tersinmezliklerden dolayı gerçek buharlı güç çevrimi incelenir. Gerçek şartlarda çevrimin, pompa ile sıkıştırma ve türbinde genişleme aşamaları izentropik değildir. Bundan dolayı gerçekte pompa için gereken

güç ihtiyacı artar ve türbinden elde edilen iş azalır. Açık sistemler için termodinamiğin birinci kanunu yardımıyla aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir.

Pompa için gerekli iş miktarı, W_P ;

$$W_P = h_2 - h_1 \quad (1)$$

Kazandan elde edilen ısı miktarı, q_g ;

$$q_g = h_3 - h_2 \quad (2)$$

Türbinde elde edilen iş miktarı, W_T ;

$$W_T = h_3 - h_4 \quad (3)$$

Yoğuşturucudan (kondenser) transfer edilen ısı miktarı, $q_ç$;

$$q_ç = h_4 - h_1 \quad (4)$$

Rankine çevriminin ısıl verimi, η_{th} ;

$$\eta_{th} = \frac{Wnet}{q_g} = 1 - \frac{q_ç}{q_g} \quad (5)$$

Çevrimin net işi, W_{net} ;

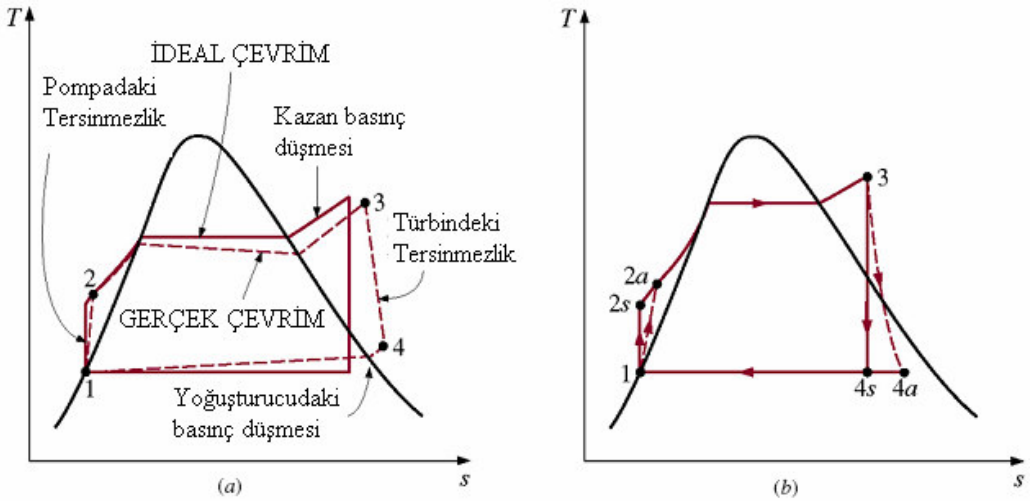
$$W_{net} = q_g - q_ç = W_T - W_P \quad (6)$$

Gerçek pompa ve türbinin izentropik pompa ve türbinden farkı, adyabatik verim (η) ile belirtilebilir.

$$\eta_P = \frac{h_{2S} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (7)$$

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4S}} \quad (8)$$

Burada 2 ve 4 indisleri sırasıyla pompa ve türbinin gerçek çıkış hallerini, 2s ve 4s indisleri ise izentropik çıkış hallerini belirtmekte ve Şekil 3-2'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 3.2 (a) Gerçek buharlı güç çevriminin ideal Rankine çevriminden farklılığı

(b) Pompa ve türbindeki tersinmezliklerin ideal Rankine çevrimi üzerindeki etkisi (Çengel ve Boles 1996)

3.1.3. Rankine Çevriminde Verim Artırma Yöntemleri

Buharlı güç santrallerinde ısıl verimin arttırılması yakıt tüketimini önemli miktarda azaltmaktadır. Enerji, üretilirken kayba uğramaması için yapılması gerekli düzenlemeler şunlardır;

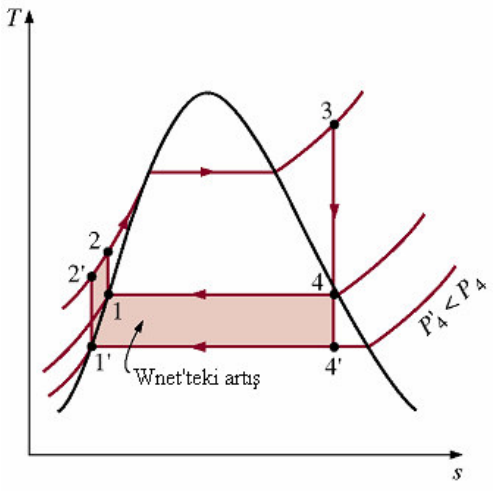
- Kondenser sıcaklığının azaltılması (yoğuşturucu basıncının düşürülmesi),
- Evaporatör çıkış sıcaklığının arttırılması (buharın kızdırılması),
- Türbin giriş basıncının arttırılması (kazan basıncının yükseltilmesi)

3.1.3.1. Kondenser Sıcaklığının Azaltılması (Yoğuşturucu Basıncının Düşürülmesi)

Buhar çevrimindeki yoğuşturucunun çalışma basıncı düşürülürse, buna bağlı olarak akışkanın sıcaklığı düşer. Şekil 3-3'de görüldüğü gibi net iş taralı alan kadar artar.

Buhar, türbini terk ederken yoğuşturucu basıncının düşmesi nem konsantrasyonunun artmasına neden olur. Eğer akışkan % 10'luk bir nem oranı ile düşük basınçta türbini terk eder ise, sıvı zerrecikleri türbin kanatlarında aşınmalara sebep olarak türbin verimini azaltır.

Bu yöntem aslında, iki ısı kaynağı arasında çalışan bir ısı makinesinin düşük sıcaklıktaki ısı kaynağının sıcaklığının (T_L) azaltılmasıyla, çevrim veriminin artması prensibine dayanır. Yukarıda anlatılan yöntemde yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağı ortalama sıcaklığında (T_H) değişme olmazken, düşük sıcaklıktaki ısı kaynağı sıcaklığı (T_L) düşürülmüştür. Bu da ideal Carnot çevrimi için yazılan $\eta_{th} = (1-(T_L/T_H))$ denklemine göre ısıl verimini arttırır.



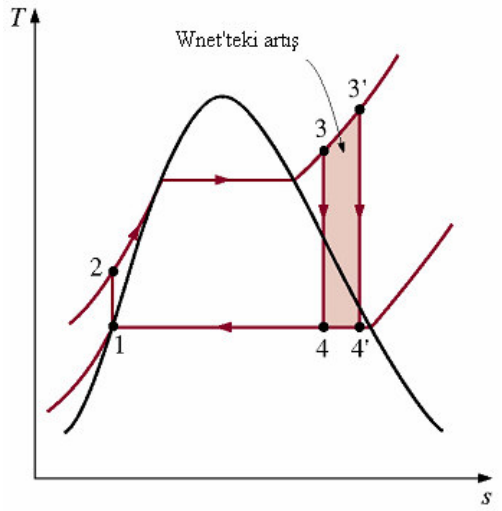
Şekil 3.3 Yoğuşturucu basıncının düşürülmesinin ideal Rankine çevrimi üzerindeki etkisi (Çengel ve Boles 1996)

3.1.3.2. Evaporatör Çıkış Sıcaklığının Arttırılması (Buharın Kızdırılması)

Evaporatörden sabit basınçta çıkan akışkan kızdırılır. Şekil 3-4'de görüldüğü gibi net iş taralı alan kadar artar. 3-3' hal değişim eğrisi altında kalan alan çevrime fazladan verilen ısıyı göstermektedir. Böylece hem net iş hem de çevrime giren ısı miktarı artmaktadır. Ancak net etki ısıl verimi arttırma yönündedir (Çengel ve Boles 1996).

Buharı kızdırmak, T-s diyagramında görülebileceği gibi türbin çıkışındaki kuruluk derecesini 4 halinden 4' haline getirerek arttırmıştır. Böylece türbinde verim düşmesi engellenecektir.

Bu yöntemde, iki ısı kaynağı arasında çalışan bir ısı makinesinin yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağı ortalama sıcaklığının (T_H) yükseltilmesi hedeflenmiştir. T_3 sıcaklığından T_3' sıcaklığına arttırılması T_H ortalama sıcaklığını nispeten yükseltir.



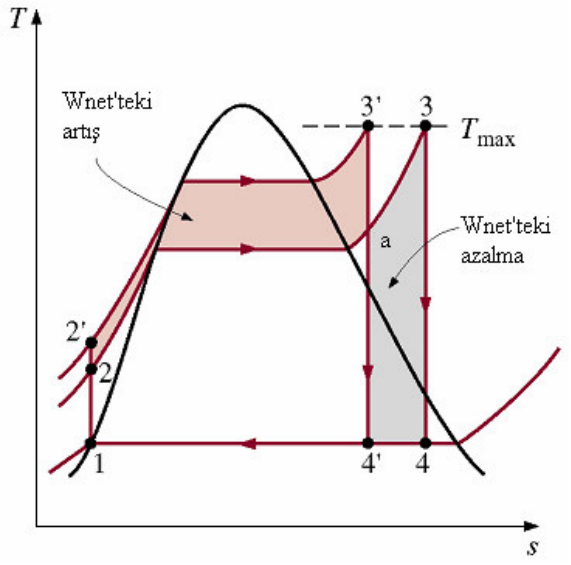
Şekil 3.4 Buharı kızdırmanın ideal Rankine çevrimi üzerindeki etkisi (Çengel ve Boles 1996)

3.1.3.3. Türbin Giriş Basıncının Arttırılması (Kazan Basıncının Yükseltilmesi)

Buharlı güç çevriminin verimini yükseltebilen bir diğer etki ise Şekil 3-5'de gösterilmiştir. Kazan çalışma basıncının arttırılması, akışkanın buharlaştırma sıcaklığını yükseltir. Böylece buhara verilen ısı miktarı ve buna bağlı olarak da ısıl verim yükselir. 3-4-4'-a-3 aralığında net iş azalır.

T-s diyagramında gözlenebildiği üzere türbin giriş basıncının arttırılması ile türbin çıkışındaki akışkanın kuruluk derecesinin azaldığı görülmektedir. Bu etki önceki bölümde belirtildiği üzere türbin verimini azaltır. Bunu önlemek için türbinde ara ısıtma yapılmalıdır.

Bu yöntem aslında, iki ısı kaynağı arasında çalışan bir ısı makinesinin düşük sıcaklıktaki ısı kaynağının sıcaklığının (T_L) azaltılmasıyla, çevrim veriminin artması prensibine dayanır. Yukarıda anlatılan yöntemde T_H ortalama sıcaklığı arttırılır. Bu da ideal Carnot çevrimi için yazılan $\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ denklemine göre ısıl verimini arttırır.



Şekil 3.5 Kazan basıncının yükseltmenin ideal Rankine çevrimi üzerindeki etkisi (Çengel ve Boles 1996)

3.2. LNG Alım Terminallerinde, Açık Rankine Çevrimi İle Güç Üretimi

Bu yöntemde LNG, tüketim hattı için gerekli basınç değerinin üzerinde bir basınca çıkarılır. Bunun için ilave bir sıvı pompasına ihtiyaç vardır. Yüksek basınçlı LNG gazlaştırıldıktan sonra bir türbinden geçirilerek güç üretilirken, basıncı, doğal gaz tüketim hattı basıncına kadar düşürülür. Sistemin; tesisat şeması Şekil 3.6'da, P-h diyagramı ise Şekil 3.7'de sunulmuştur. Depodan "1" durumunda alınarak birinci kademe sıvı pompası ile basıncı artırılan LNG, "2", durumunda ikinci kademe sıvı pompasına girer. İkinci kademe sıvı pompasını "3" durumunda terk eden LNG'nin basıncı tüketim hattı doğal gaz basıncındadır. Mevcut sistemde; A, B valfleri açık ve C, D ,E , F valfleri kapalı iken "3" durumundaki LNG önce birinci ısı değişicisinde (Buharlaştırıcı-1) deniz suyu veya daldırılmış buharlaştırıcı ile gazlaştırılır. Daha sonra tüketicinin kullanımına sunulması için dağıtım hattına "7" durumunda gönderilir.

Enerji geri kazanımı için önerilen sistemde ise; A, B valfleri kapalı ve C, D, E, F valfleri açık tutulacaktır. Böylece, "3" durumundaki LNG önce 3 nolu sıvı pompasına (P_3) girer ve basıncı "4" durumuna çıkarılır sonra birinci ısı değişicisine (Buharlaştırıcı-1) girerek "5" durumuna kadar gazlaştırılır. "5" durumundaki doğal gaz türbine girerek "6" durumuna genişler ve bu esnada güç üretilir. Türbinde genişleyen doğal gazın sıcaklığı da bir miktar düşer. Bu nedenle türbinden "6" durumunda çıkan doğal gaz ikinci ısı değişicisine (Buharlaştırıcı-2) girerek "7" durumuna kadar ısıtılır ve sıcaklığı tekrar yükseltilerek tüketim hattına sevk edilir.

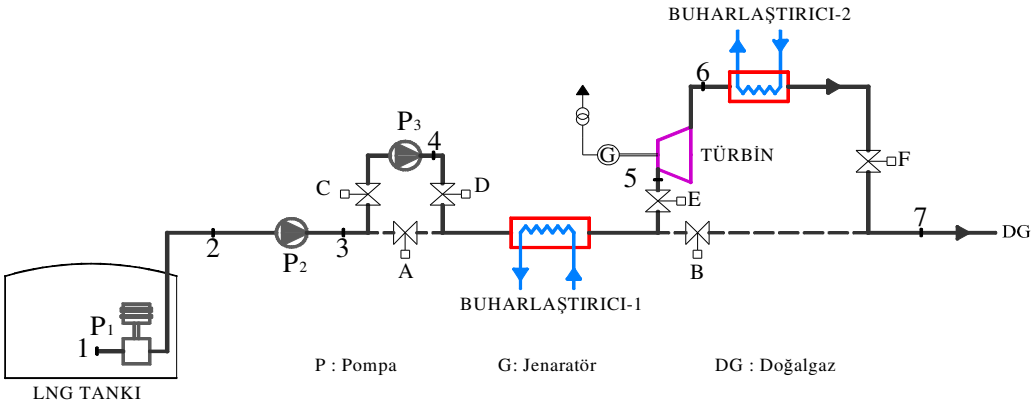
Bu yöntemle, sistemde elde edilen net güç W_{net}, deniz suyundan alınan toplam ısı miktarı $Q_{top,}$:

$$W_{net}= W_T - (W_{P1}+W_{P2}+W_{P3}) \quad (9)$$

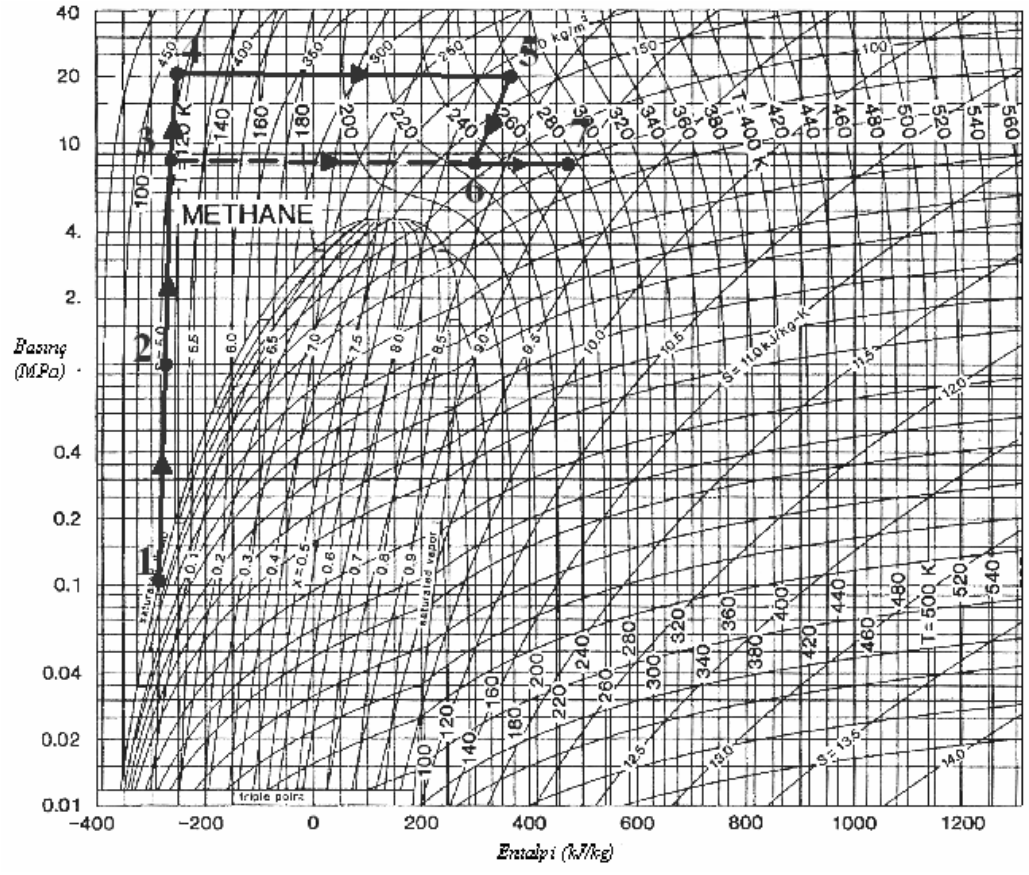
$$W_{net}=m_{LNG}\{(h_6-h_5)-((h_2-h_1)+(h_3-h_2)+(h_4-h_3))\} \quad (10)$$

$$Q_{top}= Q_1+Q_2 \quad (11)$$

$$Q_{top}= m_{LNG}\{(h_5-h_4)+(h_7-h_6)\} \quad (12)$$



Şekil 3.6 Açık Rankine çevrimi (direkt genleşme metodu) (Cotana ve Pispola, 2005)



Şekil 3.7 Direkt genleşme metodu P-h diyagramı

3.3. LNG Alım Terminallerinde, Kapalı Rankine Çevrimi İle Güç Üretimi

Yakın bir gelecekte muhtemelen LNG tüketiminin artması nedeniyle, çevre sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta ve sıvı fazda bulunan LNG'nin fiziksel ekserjisinin kullanımı daha önemli hale gelecektir(Bisio ve Tagliafico 2000). Kriyojenik sıcaklığa sahip olan LNG düşük sıcaklıktaki enerji kaynağı, deniz suyu ise yüksek sıcaklıktaki enerji kaynağı olarak düşünülerek, bu iki sıcaklık(kaynak) arasında çalışan bir Kapalı Rankine çevrimi öngörülebilir. Böyle bir çevrimin tesisat şeması Şekil 3.8'de, P-h diyagramı ise Şekil 3.9'de verilmiştir. Şekil 3.8'de alt tarafında LNG'nin gazlaştırma prosesi(1,2,3,4,5), üst tarafında ise LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanan bir Kapalı Rankine çevrimi (a,b,c,d) görülmektedir. LNG P_1 ve P_2 sıvı pompaları ile basıncı 85 bar değerine ulaştıktan sonra buharlaştırıcı görevi gören 1 ve 2 nolu buharlaştırıcılardan geçerek gazlaştırıldıktan sonra 82 bar ve 0^oC de tüketim hattına gönderilir. Şekil 3.8'de üst tarafta bulunan Rankine çevriminde iş gören akışkan olarak propan seçilmiştir. 3 nolu buharlaştırıcıya 'a' durumunda sıkıştırılmış sıvı olarak giren propan, deniz suyundan aldığı ısı ile buharlaşır ve 'b' durumuna ulaşır. Daha sonra türbinden geçerek 'c' durumuna genişleyen propan burada güç üretir. Türbinden çıkan gaz durumundaki propan Rankine çevrimi için yoğuşturucu (kondenser) görevini yapan ısı değişicisinden geçerken, LNG'ye ısısını vererek onu buharlaştırırken, kendisi yoğuşarak 'd' durumuna gelir. Daha sonra da P_3 sıvı pompasından geçerek tekrar basıncı artırılarak 'a' durumuna ulaşılır.

Sistemde elde edilen net güç W_{net}, deniz suyundan alınan toplam ısı miktarı $Q_{top,}$ ve sistemin net ısıl verimi η_{sist}:

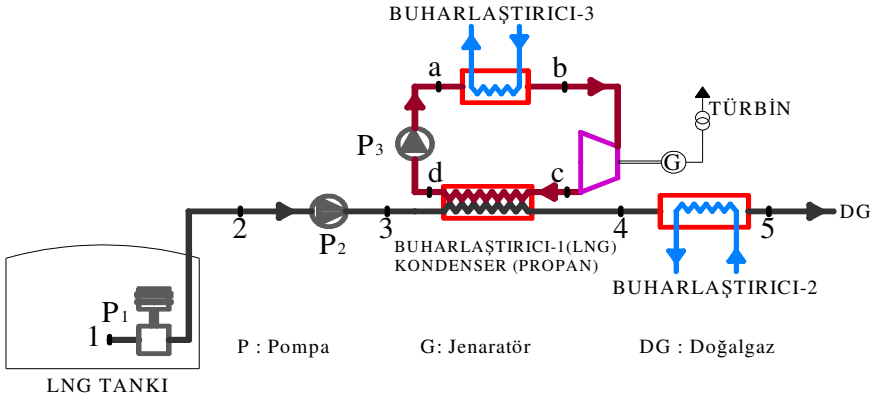
$$W_{net}=(W_T - W_{P3})-(W_{P1}+W_{P2}) \quad (13)$$

$$W_{net}=m_{propan}((h_b-h_c)-(h_a-h_d)) - m_{LNG}(h_3-h_1) \quad (14)$$

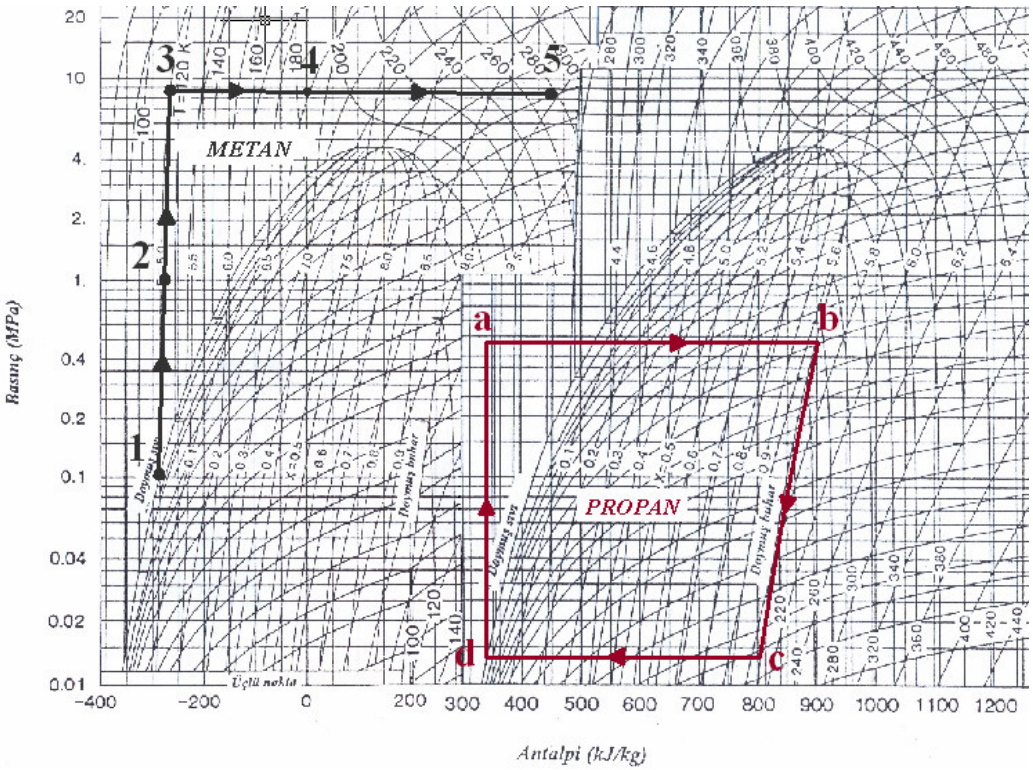
$$Q_{top}= Q_2+Q_3 \quad (15)$$

$$Q_{top}= m_{LNG}\,(h_5-h_4)+ m_{propan}(h_b-h_a) \quad (16)$$

$$\eta_{sist.}= \frac{W_{net}}{Q_{top}} \quad (17)$$



Şekil 3.8 Kapalı Rankine metodu (Ersoy ve Demirpolat 2007)



Şekil 3.9 Kapalı Rankine metodu, P-h diyagramı

3.4. LNG Alım Terminallerinde, Açık-Kapalı (Bileşik) Rankine Çevrimi İle Güç Üretimi

Bu yöntem, daha önce anlatılan ilk iki yöntemin(açık rankine, kapalı Rankine) birleştirilmesi ile elde edilir. Şekil 3.10'da bu yöntemin tesisat şeması, Şekil 3.11'de ise P-h diyagramı sunulmuştur. Şekil 3.10'da bileşik sistemin alt tarafında yine LNG'nin gazlaştırılma prosesi, sol üstte kapalı Rankine çevrimi, sağ üstte ise açık Rankine çevrimi gösterilmiştir. Daha önceki iki metotta da olduğu gibi kapalı Rankine çevriminde propan, açık Rankine çevriminde ise doğal gaz (metan) dolaşmaktadır.

Kısım 3.3'dekine benzer şekilde W_{net}, $Q_{top,}$ ve η_{sist}:

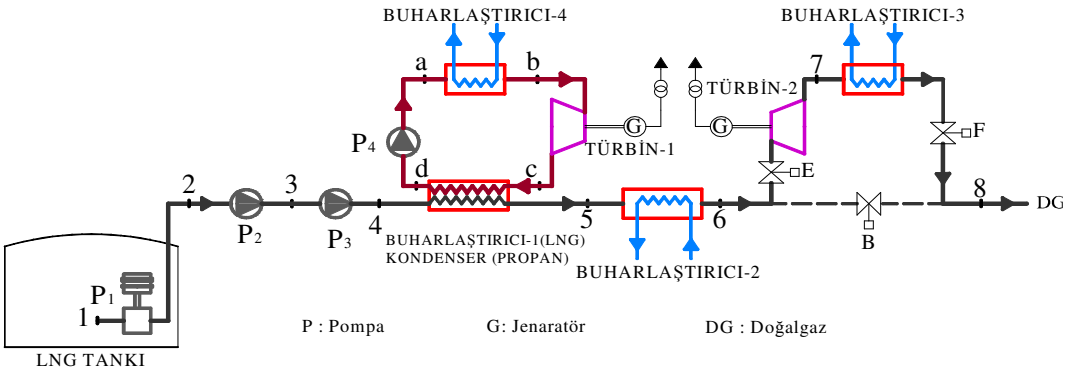
$$W_{net}= (W_{T1}-W_{P4})+(W_{T2}-(W_{P1}+W_{P2}+W_{P3})) \quad (18)$$

$$W_{net}=m_{propan}((h_b-h_c)-(h_a-h_d))+ m_{LNG}((h_6-h_7)-(h_4-h_1)) \quad (19)$$

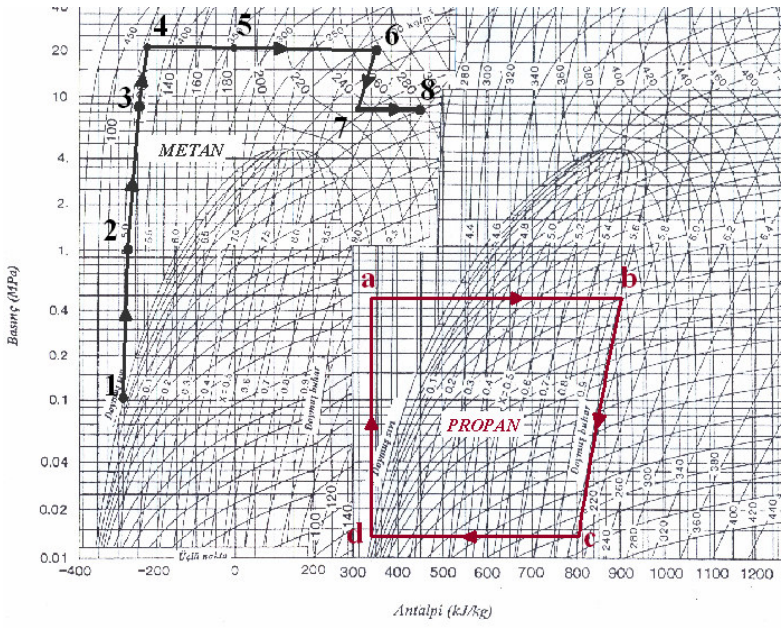
$$Q_{top}= Q_2+Q_3+Q_4 \quad (20)$$

$$Q_{top}= m_{LNG}((h_6-h_5)+(h_8-h_7))+ m_{propan}(h_b-h_a) \quad (21)$$

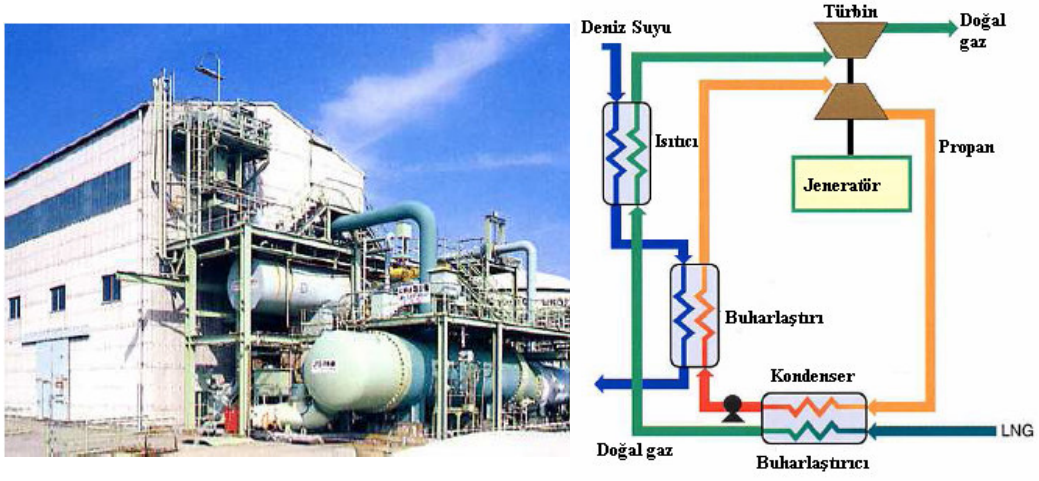
$$\eta_{sist.}= \frac{W_{net}}{Q_{top}} \quad (22)$$



Şekil 3.10 Terminalde bileşik açık-kapalı Rankine metodu için tesisat şeması (Ersoy ve Demirpolat 2007)



Şekil 3.11 Terminalde açık-kapalı bileşik Rankine metodu için P-h diyagramı (Ersoy ve Demirpolat 2007)



Şekil 3.12 Senboku LNG alım terminalinin genel görünümü ve terminalde kullanılan bileşik Rankine tesisat şeması (Otsuka, T. 2006)

Şekil 3.12'de Japonya Kansai bölgesinde kurulu Senboku LNG Alım Terminali'nin genel görünümü ve 1982'den beri güç üretimi için LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanan bileşik Rankine çevriminin tesisat şeması görülmektedir. Bu tesisat ile Şekil 3.10'da verilen tesisat şeması birbirine benzemektedir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışma için yapılan literatür araştırmasında, (Zhang ve Lior 2006; Bisio ve Tagliafico 2002; Velautham ve ark. 2001) LNG'nin termodinamik özellikleri yerine basitleştirmek amacıyla saf metanın (CH_4) termodinamik özelliklerinin alındığı görülmüştür. Türkiye'de LNG alım terminallerinden biri olan Marmara LNG Alım Terminali'nde (LNGMAT) ise, LNG'nin hacimsel olarak %90.98 'i metandır (Botaş LNG Terminali Proses Akış Diyagramı, 1986). Bu nedenle bu araştırmada da literatürdeki gibi LNG yerine saf metanın termodinamik özellikleri dikkate alınmıştır.

LNG Alım Terminali'nde enerji üretimi, terminalde gazlaştırılarak tüketim hattına sevk edilen doğal gazın basıncına da bağlıdır. Tüketim hattına sevk basıncı ise doğal gazın kullanım amacına göre değişir. Genelde kullanım amacına bağlı olarak istenen basınç değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu çizelgeye göre uzun mesafeli dağıtım hatları için ortalama 70 bar basınç değeri istenmektedir. LNGMAT'nde doğal gazın tüketim hattına sevk basıncı ise 82 bar'dır (Botaş LNG Terminali Proses Akış Diyagramı 1986). Bu çalışmada da LNGMAT'da güç üretimi konusu araştırılırken terminal çıkış basıncı 82 bar olarak alınmıştır. Her bir LNG buharlaştırıcısındaki basınç düşüşü, Cotana ve Pispola'ya (2005) benzer şekilde 3 bar kabul edilmiştir.

Çizelge 4.1 Doğal gazın değişik kullanım amaçları için istenen basınç değerleri (Bisio ve Tagliafico 2002)

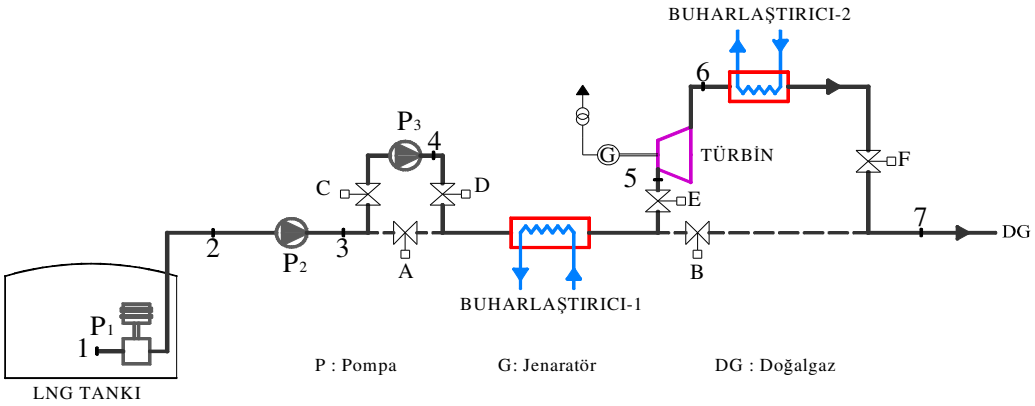
Buharlı güç santralleri	6 bar
Kombine çevrim güç santralleri	25 bar
Bölgesel dağıtım	30 bar
Uzun mesafeli dağıtım	70 bar

Bu çalışmada, terminalde gazlaştırılan LNG tüketilmeden enerji üretimi amaçlanmıştır. Bu nedenle, dünyada bazı terminallerde örnekleri görülen ve literatür araştırmasında da rastlanan Brayton çevrimli güç üretim metotları yerine, LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanan Rankine çevrimi ile güç üretim metotları incelenmiştir. Araştırma üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, LNG'yi iş gören akışkan olarak kullanan açık Rankine çevriminin terminale uygulanması araştırılmıştır. İkinci aşamada ise aracı akışkan olarak propan kullanan kapalı Rankine çevrimi incelenmiştir. Son olarak da bu iki çevrimin bileşiminin LNG terminaline uygulanması araştırılmıştır. Bu üç aşamada, kg başına enerji üretiminin tesisin parametrelerine (türbin giriş basınçları, evaporatör çıkış sıcaklığı, kondenser sıcaklığı) bağlı olarak değişimi de dikkate alınmıştır. Daha sonra, örnek çalışma için LNGMAT'dan temin edilen LNG kütle debisi, basıncı ve sıcaklık değerleri kullanılarak terminalde bu üç farklı yöntemle güç üretimi araştırılmıştır.

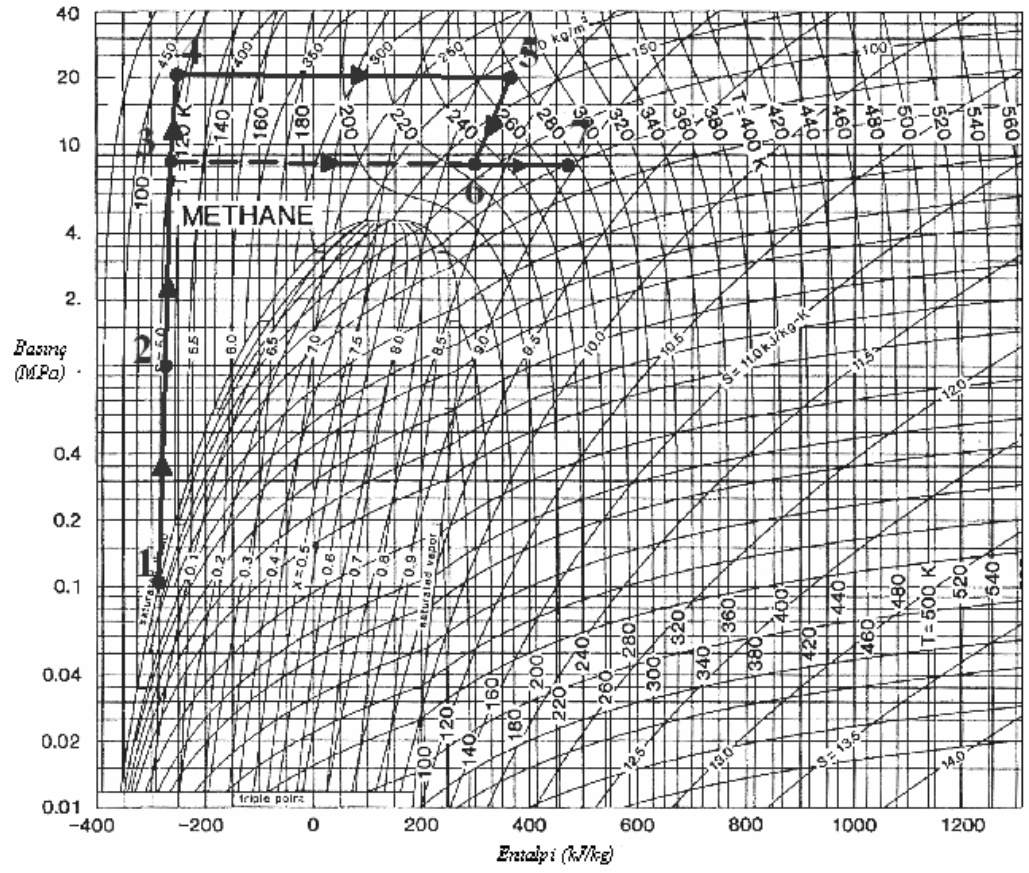
Metanın termodinamik özellikleri belirlenirken Prof. Goodwin tarafından geliştirilen ve excelde çalışabilen TPX (Thermodynamic Properties for Excel) programı kullanılmıştır. Propanın özellikleri ise Ashrae(1993)'den temin edilmiştir.

4.1. Açık Rankine Metodu(Direkt Genleşme) ile Enerji Üretimi

Kısım 3.2'de detayları verilen metot ile enerji üretiminin, terminalde enerji kazanımı için kullanılabileceği ifade edilmektedir (Cotona ve Pispola,2005; Demirpolat ve Ersoy 2007). Açık Rankine metodunun terminale uygulanması Şekil 4.1'de verilmiştir. Terminalde LNG tankının basınç ve sıcaklığı sırasıyla 1,05 bar ve 112,07 K'dir (Botaş LNG Terminali Proses Akış Diyagramı 1986). Terminalden tüketim hattına doğal gazın sevk basınç ve sıcaklığı ise (7 durumu) 82 bar ve 273 K'dir. Mevcut sisteme bir pompa (P_3), bir türbin ve ikinci bir buharlaştırıcı ilave edilerek güç üretimi için açık Rankine çevrimi oluşturulmuştur. Türbin giriş basıncı 200 bar için sistemin P-h diyagramı ise Şekil 4.2'de sistemin termodinamik özellikleri Çizelge 4.2'de ve çevrimin entalpi farkları ise Çizelge 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.1 LNG alım terminaline direkt genleşme metodunun uygulanması



Şekil 4.2 Direkt genleşme metodu P-h diyagramı.

Çizelge 4.2 Açık Rankine çevrimi için tesisin basınç ve sıcaklık değerleri

Açık Rankine	**1**	**2s**	**2**	**3s**	**3**	**4s**	**4**	**5**	**6s**	**6**	**7**
T (K)	112.07	112.30	112.46	114.38	115.68	118.57	120.63	273	226.4	228.91	273
P (bar)	1.05	10	10	85	85	203	203	200	85	85	82

Çizelge 4.3 Açık Rankine çevrimi için tesisin entalpi fark değerleri

Açık Rankine	**1-2s**	**1-2**	**2-3s**	**2-3**	**3-4s**	**4-5**	**5-6s**	**5-6**	**6-7**
Δh (kj/kg)	2.12	2.65	17.68	22.10	27.60	575.30	72.02	57.61	175.13

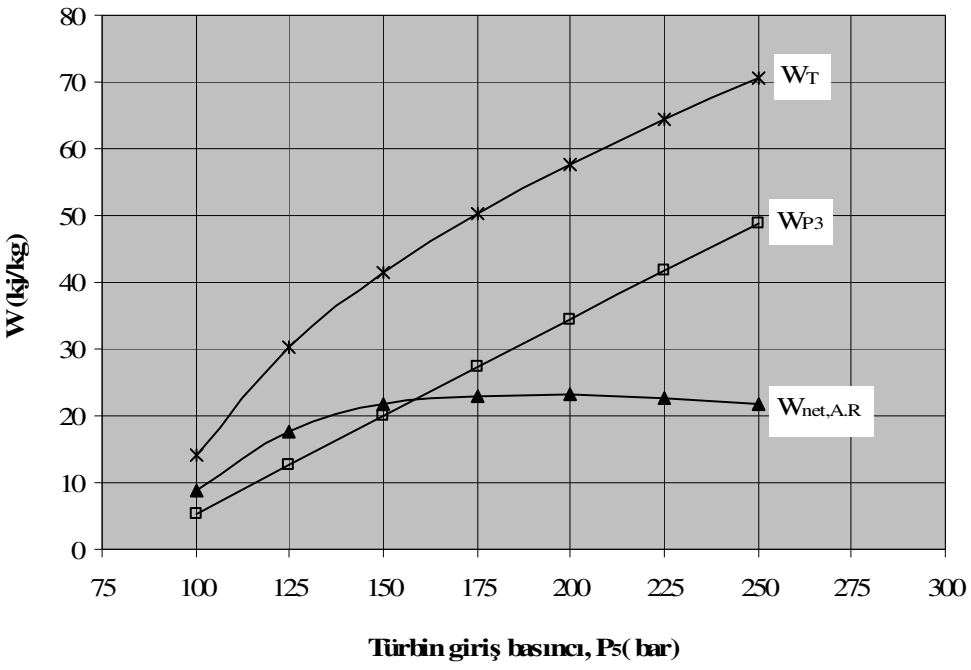
Bu uygulamada enerji üretimini etkileyen başlıca faktör türbin giriş basıncıdır. Türbin giriş basıncının değişimi ile elde edilebilecek kg_{LNG} başına enerji miktarı araştırılmıştır.

Açık Rankine çevriminin uygulanması ile çevrimden elde edilecek kg_{LNG} başına net işin (W_{netAR}) türbin giriş basıncı ile değişimi Şekil 4.3'de sunulmuştur. Türbin giriş basıncı arttıkça türbinden elde edilen iş (W_T) artmakta ancak, 3 nolu sıvı pompasında LNG'yi bu basınca çıkarmak için gerekli iş (W_{P3}) tüketimi de buna paralel olarak artmaktadır. Açık Rankine çevriminden elde edilecek kg_{LNG} başına net iş (W_{netAR}), türbin giriş basıncı 200 bar değerine gelinceye kadar artmakta ve 23.12 kJ/kg değerine ulaşmaktadır. Türbin giriş basıncı 200 bar'dan itibaren artırılmaya devam edilse bile net iş miktarı hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu nedenle Şekil 4.3'den de görüldüğü gibi, türbin giriş basıncı için optimum değer, 200 bar'dır. Açık Rankine çevriminde; 3. kademe pompanın tükettiği enerji miktarı (W_{P3}), türbin giriş basıncı (P_5) ile lineer olarak değişirken, türbinden elde edilen enerjinin miktarı (W_T) 200 bar basınç değerine kadar W_{P3} eğrisine göre daha dik seyretmektedir. 200 bar'dan sonra ise W_{P3} ve W_T eğrileri paraleldirler. Bu nedenle optimum türbin giriş basıncı 200 bar olarak elde edilmiştir.

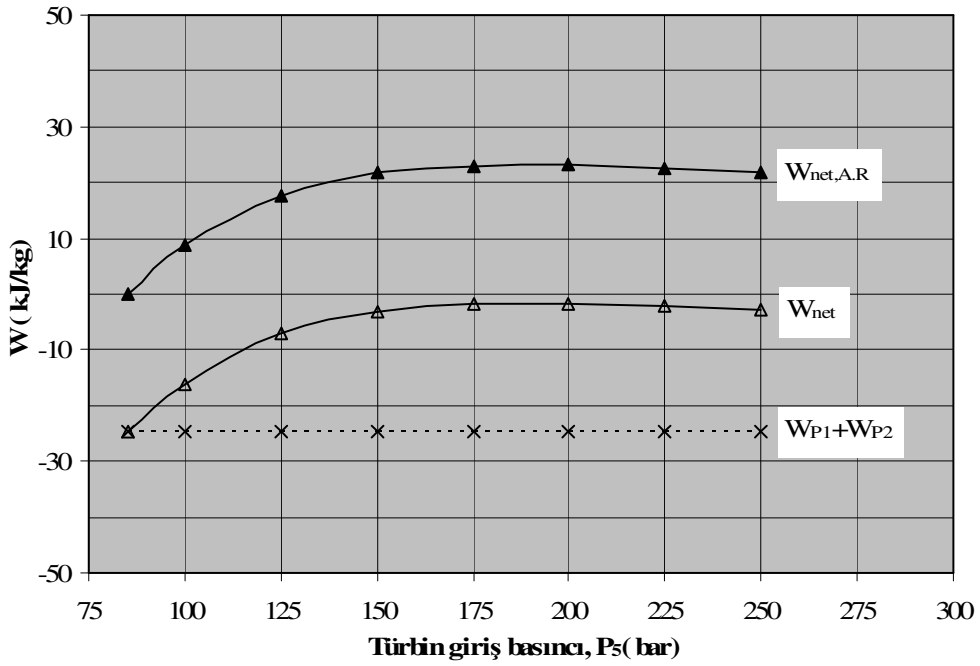
Şekil 4.4'de türbin giriş basıncına bağlı olarak sistemden elde edilen net iş W_{net} ve açık Rankine çevriminden elde edilen net iş W_{netAR}'nin değişimi

sunulmuştur. Açık Rankine çevrimi uygulanmadan önce sistemde W_{p1} ve W_{p2} enerjilerini tüketen iki adet sıvı pompası vardır. Tesisin 1. kademe pompası LNG'yi 10 bar basınca çıkarırken, 2. kademe pompası 10 bar'dan 85 bar basınca çıkarmaktadır. Açık Rankine çevriminden elde edilen net işten (W_{netAR}) bu pompalar için gerekli iş çıkartıldığında, sistemden elde edilen kg_{LNG} başına net iş (W_{net}) bulunabilir.

Türbin giriş basıncının, W_{netAR} üzerine etkisi 85 bar-150 bar aralığında, 150 bar - 200 bar aralığına göre oldukça yüksektir. Tesise açık Rankine çevrimi uygulandığında tesisin sıvı pompalarında (W_{P1}+ W_{P2})



Şekil 4.3 Açık Rankine çevriminde türbin giriş basıncı ile pompa, türbin ve çevrim net işinin değişimi



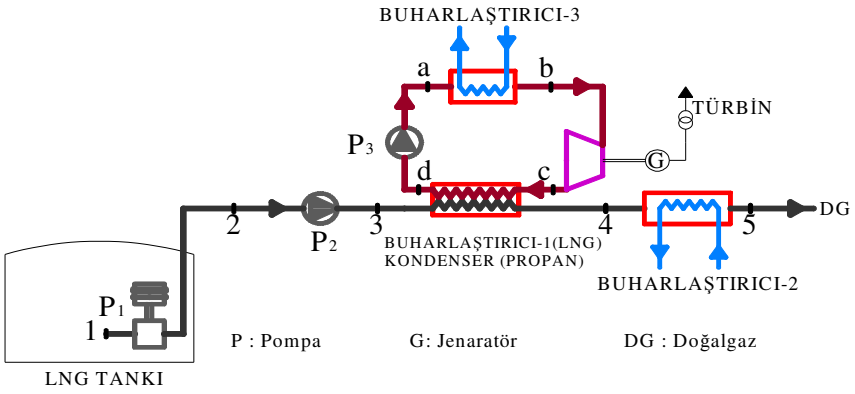
Şekil 4.4 Türbin giriş basıncı ile LNG tesisinin net işi (W_{net}) ve açık Rankine çevrim net işinin (W_{netAR}) değişimi

4.2. Kapalı Rankine Metodu ile Enerji Üretimi

Bu kısımda kapalı Rankine çevrimi uygulanan LNG tesisinde güç üretimi araştırıldı. Kısım 4.1'de araştırılan LNG'yi akışkan olarak kullanan açık Rankine çevriminden farklı olarak, kapalı Rankine çevriminde iş gören akışkan olarak propan tercih edilmiştir. Bu metotta, tesiste herhangi bir değişiklik yapılmadan sadece LNG'nin kriyojenik enerjisi kullanan ve LNG ile deniz suyu (veya atık su) sıcaklığı arasında çalışan bir kapalı Rankine çevrimi öngörülmüştür. Araştırmada, enerji üretimini etkileyen önemli faktörler göz önüne alındı. Bunlar; kondenser sıcaklığı, evaporatör sıcaklığı ve türbin giriş basıncıdır. Bu faktörlerin enerji üretimine etkisi ile ilgili detaylar Kısım 3.1.3'de verilmiştir. Kapalı Rankine çevriminin (a-b-c-d-a) LNG tesisine uygulanması Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

Şekil 4.5'de gösterilen tesiste bulunan iki ayrı akışkanın (LNG ve Propan) termodinamik özellikleri Çizelge 4.4'de, entalpi farkları Çizelge 4.5'te ve P-h diyagramı ise Şekil 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6'da ise LNG tesisine uygulanan kapalı Rankine çevriminin parametreleri sunulmuştur.



Şekil 4.5 LNG alım terminaline Propan akışkanlı kapalı Rankine çevriminin uygulanması (Ersoy ve Demirpolat 2007)

Çizelge 4.4 Kapalı Rankine çevrimi uygulanan tesiste, akışkanların basınç ve sıcaklık değerleri

LNG hattı	**1**	**2s**	**2**	**3s**	**3**	**4**	**5**
T (K)	112.07	112.30	112.46	114.46	115.80	183.00	273.00
P (bar)	1.05	10	10	88	88	85	82

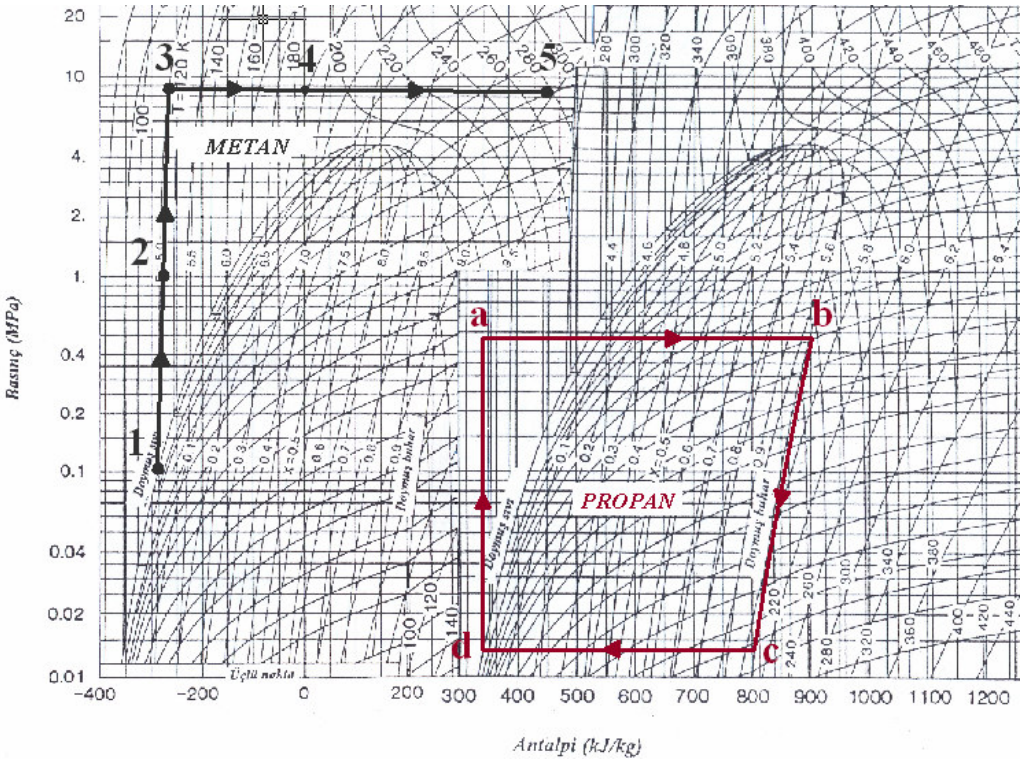
Kapalı Rankine (Propan)	**d**	**as**	**a**	**b**	**cs**	**c**
P (bar)	0.128	4.74	4.74	4.74	0.128	0.128
T (K)	193	193	193	273	193	193

Çizelge 4.5 Kapalı Rankine çevrimi uygulanan tesiste, entalpi fark değerleri

LNG hattı	**1-2s**	**1-2**	**2-3s**	**2-3**	**3-4**	**4-5**
Δh (kj/kg)	2.12	2.65	18.38	22.98	252.85	473.58
Kapalı Rankine (Propan)	**d-as**	**d-a**	**a-b**	**b-cs**	**b-c**	**c-d**
Δh (kj/kg)	0.37	0.46	563.24	117.50	94.00	469.70

Çizelge 4.6 Kapalı Rankine çevriminin parametreleri

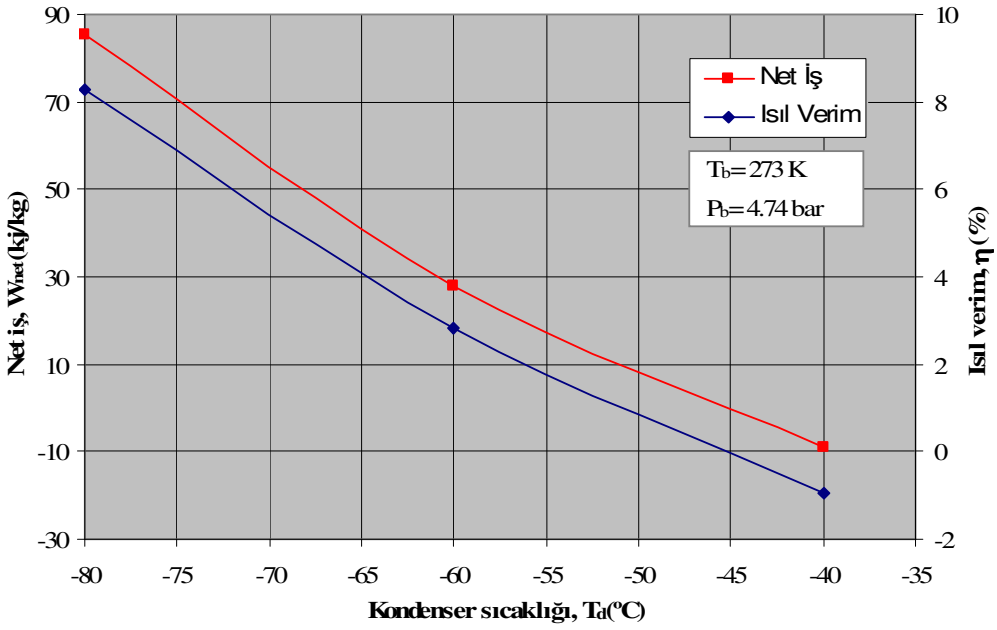
Türbinin izentropik verimi	0.8
Pompa izentropik verimi	0.8
Evaporatör çıkış sıcaklığı (K), T_b	273 - 363
Kondenser çıkış sıcaklığı (K), T_d	193 - 233
Türbin giriş basıncı (bar), P_b	2.43 – 4.74



Şekil 4.6 Kapalı Rankine metodu, P-h diyagramı (Ersoy ve Demirpolat 2007)

Kapalı Rankine metodunun tesise uygulanmasında, kapalı Rankine çevrimindeki farklı kondenser sıcaklıkları T_d için elde edilebilecek kg başına net iş üretimi ve sistemin ısıl verimi Çizelge 4.6'da verilen diğer parametreler sabit alınarak araştırıldı. Sistemdeki her akışkan için basınç ve sıcaklık değerleri Çizelge 4.4' te verilmiştir.

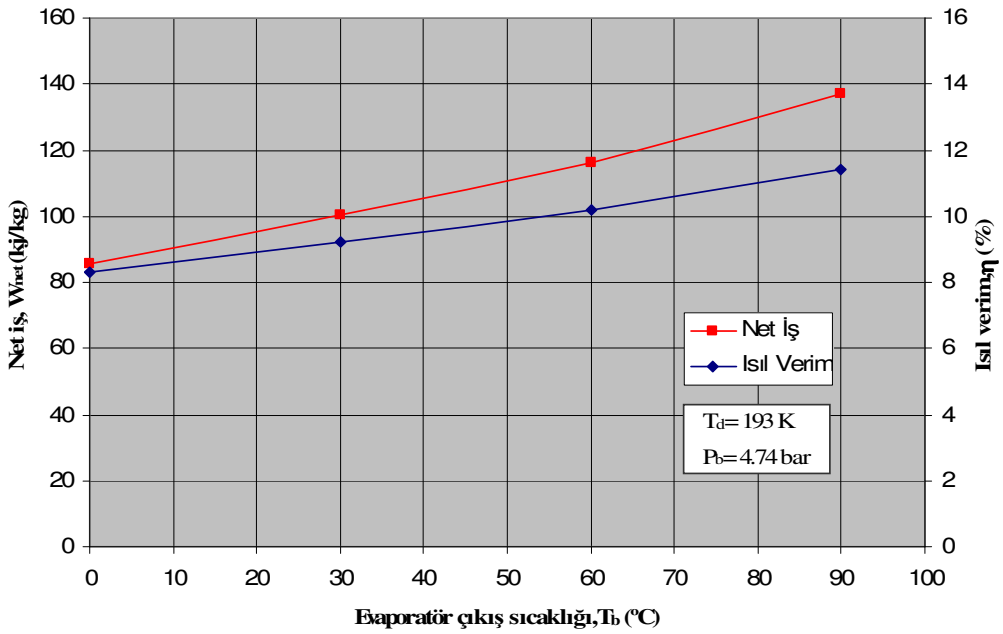
Tesisin LNG hattında sadece gazlaştırma prosesi gerçekleştirilirken, LNG'nin kriyojenik enerjisinden faydalanılacak şekilde sisteme entegre edilen propan akışkanlı kapalı Rankine çevriminden güç üretilmektedir. LNG hattında gazlaştırma işlemi için kullanılan Buharlaştırıcı–1, kapalı Rankine çevrimi için kondenser görevini yapmaktadır. Kondenser sıcaklığının azaltılması Kısım 3.1.3.1'de belirtildiği şekilde net işin ve ısıl verimin artmasına sebep olur.



Şekil 4.7 Kapalı Rankine çevriminde kondenser sıcaklığının LNG tesisinin net işine ve ısıl verimine etkisi

Kondenser sıcaklık değişiminin, net işe ve ısıl verime etkisi Şekil 4.7'deki grafikte gösterilmiştir. Kapalı Rankine çevriminden, kütle debisi kg başına elde edilecek net iş, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi kondenser sıcaklığı (T_d) -40 ^oC'den -80 ^oC'ye düşürüldüğünde net iş ~ -9 kJ/kg'dan ~ 85 kJ/kg değerine ulaşmaktadır. Net işe paralel olarak ısıl verimde artar.

Aynı tesiste, kapalı Rankine çevrimindeki evaporatör (Buharlaştırıcı–3) çıkış sıcaklığının arttırılması ile net işin ve ısıl verimin değişimi de araştırılmıştır. Çizelge 4.4'de verilen LNG hattı değerleri değişmezken, kapalı Rankine çevriminde Çizelge 4.6'teki diğer parametreler sabit alınarak sadece evaporatör çıkış sıcaklık değerleri (T_b) 0 ^oC ile 90 ^oC aralığında değiştirilmiştir. Söz konusu sıcaklık aralığında, kapalı Rankine ve tüm sistemde kg başına net iş üretimi ile ısıl verimin değişimi grafikleri Şekil 4.8'de verilmiştir.

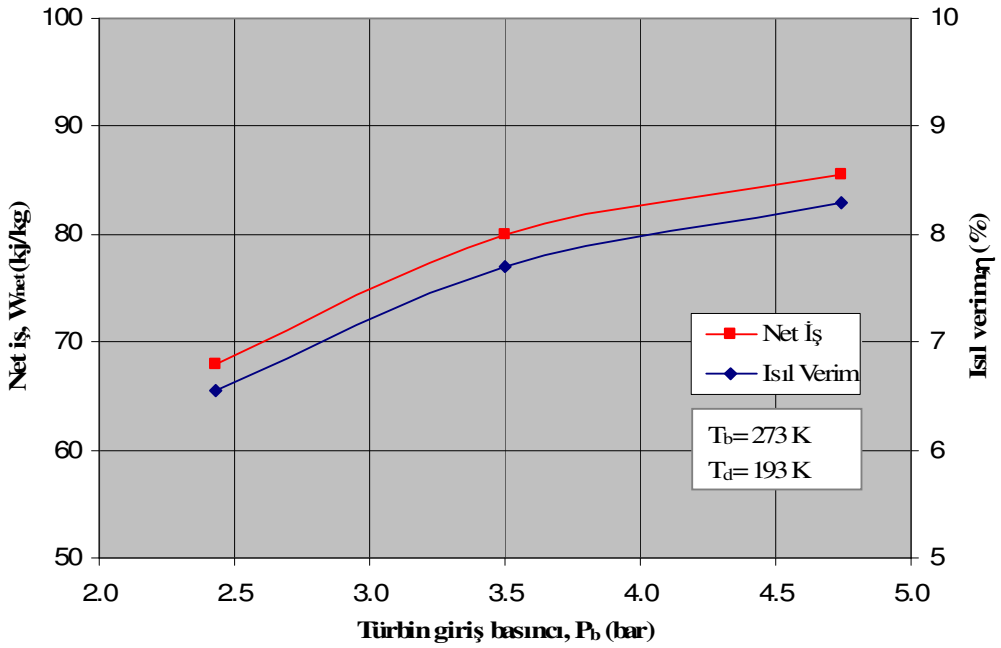


Şekil 4.8 Kapalı Rankine çevriminde evaporatör çıkış sıcaklığının LNG tesisinin net işine ve ısıl verimine etkisi.

Sistemdeki Buharlaştırıcı-3'ün çıkış sıcaklığının 0 ^oC den 90 ^oC'ye arttırılması ile tesiste kütle debisi kg başına net iş ~ % 60 oranında artış gösterirken, LNG tesisinin ısıl verimi ~ % 37 oranında artmıştır.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'den, tesisin net iş ve ısıl verim üzerine kondenser sıcaklığındaki değişimin evaporatör sıcaklığındaki değişmeye oranla daha etkili olduğu söylenebilir.

Tesisin veriminin arttırılması yönünde yapılan bir diğer çalışmada Kısım 3.1.3.3'de belirtilen kapalı Rankine çevrimindeki türbin giriş basıncının arttırılması yöntemidir. Tesise bu yöntemin uygulanması ile kütle debisi kg başına net iş ve ısıl verimin değişimi araştırılmıştır.



Şekil 4.9 Kapalı Rankine çevriminde türbin giriş basıncının LNG tesisinin net işine ve ısıl verimine etkisi.

Yapılan analiz esnasında Çizelge 4.4'deki LNG hattı değerleri kullanılırken, kapalı Rankine çevrimi için türbin giriş basıncı P_b diğer tüm parametreler sabit alınarak 2.43 bar ile 4.74 bar aralığında arttırılmıştır. Bu basınç

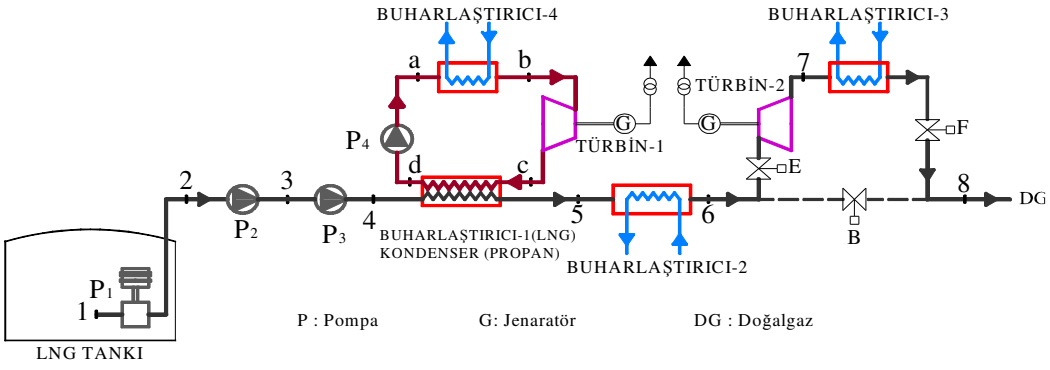
aralığında sistemin net iş üretimi ile ısıl veriminin değişim grafikleri Şekil 4.9'da verilmiştir.

Şekil 4.9'da, türbin giriş basıncının 2.43 bar'dan 4.74 bar'a arttırılması sonucu LNG tesisinin kg başına net işinin ~ % 26, ısıl verimi de net işin artışına paralel olarak ~ % 26.5 oranında arttığı görülmektedir.

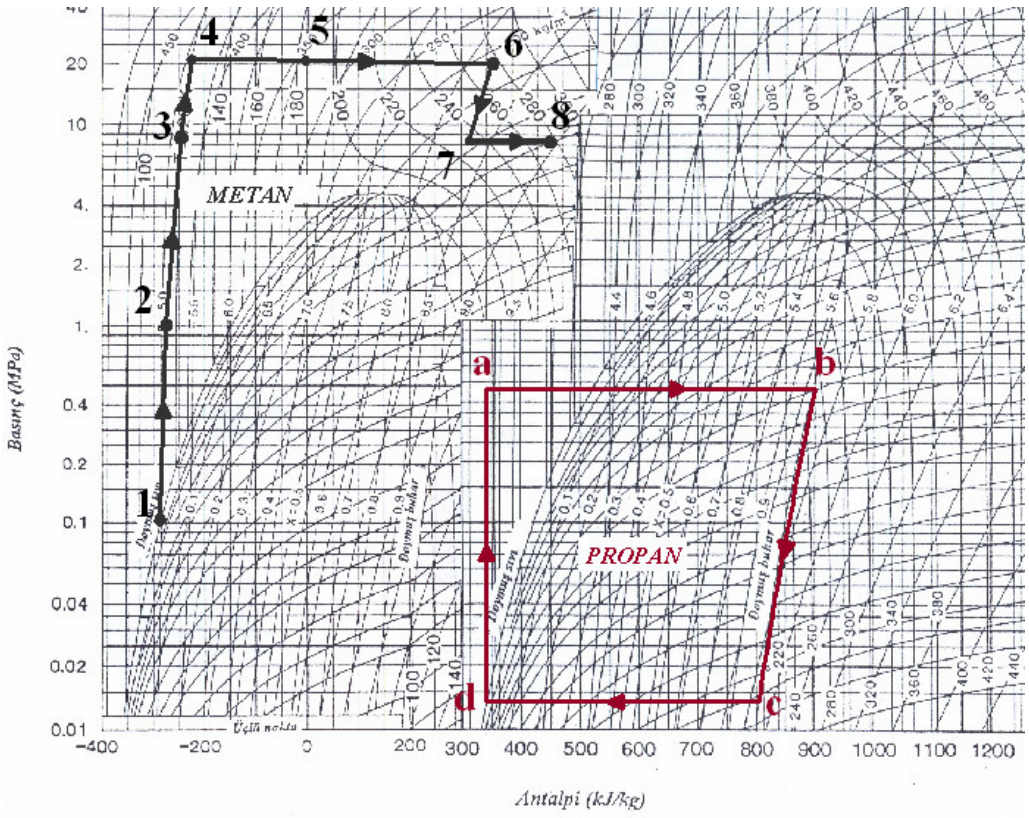
4.3. Açık-Kapalı (Bileşik) Rankine Metodu ile Güç Üretimi

Kısım 3.4'de bahsedilen bileşik çevrimin tesis şeması Şekil 4.10'da sunulmuştur. Bu ön görülen metotta iş gören akışkan olarak LNG'yi kullanan açık Rankine çevrimi ile yine iş gören akışkan olarak propan kullanan kapalı Rankine çevrimi birlikte tesise uygulanmıştır. Böylece daha çok iş üretimi ve ısıl verim elde edilebilecektir.

Tesiste kullanılan akışkanların (LNG ve propan) termodinamik değerleri Çizelge 4.7'de, tesisteki durumlar arası entalpi farkları Çizelge 4.8'de ve P-h diyagramı Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.10 LNG alım terminaline Bileşik Açık-Kapalı Rankine çevrimi uygulaması (Ersoy ve Demirpolat 2007)



Şekil 4.11 Terminalde Bileşik Açık-Kapalı Rankine metodu için P-h diyagramı (Ersoy ve Demirpolat 2007)

Çizelge 4.7 Bileşik Açık-Kapalı Rankine çevrimi uygulanan tesiste, akışkanların basınç ve sıcaklık değerleri

Açık Rankine	**1**	**2s**	**2**	**3s**	**3**	**4s**	**4**	**5**	**6**	**7s**	**7**	**8**
T (K)	112.07	112.3	112.46	114.38	115.68	118.64	120.75	183	273	226.4	228.91	273
P (bar)	1.05	10	10	85	85	206	206	203	200	85	85	82

Kapalı Rankine (Propan)	**d**	**as**	**a**	**b**	**cs**	**c**
P (bar)	0.128	4.74	4.74	4.74	0.128	0.128
T (K)	193	193	193	273	193	193

Çizelge 4.8 Bileşik Açık-Kapalı Rankine çevrimi uygulanan tesiste, entalpi fark değerleri

Açık Rankine (LNG)	**1-2s**	**1-2**	**2-3s**	**2-3**	**3-4s**	**3-4**	**4-5**	**5-6**	**6-7s**	**6-7**	**7-8**
Δh (kj/kg)	2.12	2.65	17.68	22.10	28.29	35.37	215.40	359.03	72.02	57.61	175.13

Kapalı Rankine (Propan)	**d-as**	**d-a**	**a-b**	**b-cs**	**b-c**	**c-d**
Δh (kj/kg)	1.09	1.36	558.19	140.66	112.53	447.02

Tesiste LNG'nin basıncı, P_3 pompası ile daha önce bulunan ve optimum basınç olan 200 bar'a çıkartıldığı düşünülerek araştırma gerçekleştirilmiştir.

Bileşik Rankine metodunun LNG tesisine uygulanması ile elde edilebilecek güç miktarları ve ısıl verim analizleri için kullanılan çevrim parametreleri açık ve kapalı Rankine çevrimi için Çizelge 4.9'da verilmiştir. Bu parametre aralıklarında değişkenlik gösteren LNG tesisinin net işi ve ısıl verimi Kısım 3.1.3'de belirtilen verim arttırma yöntemlerine göre incelenmiştir.

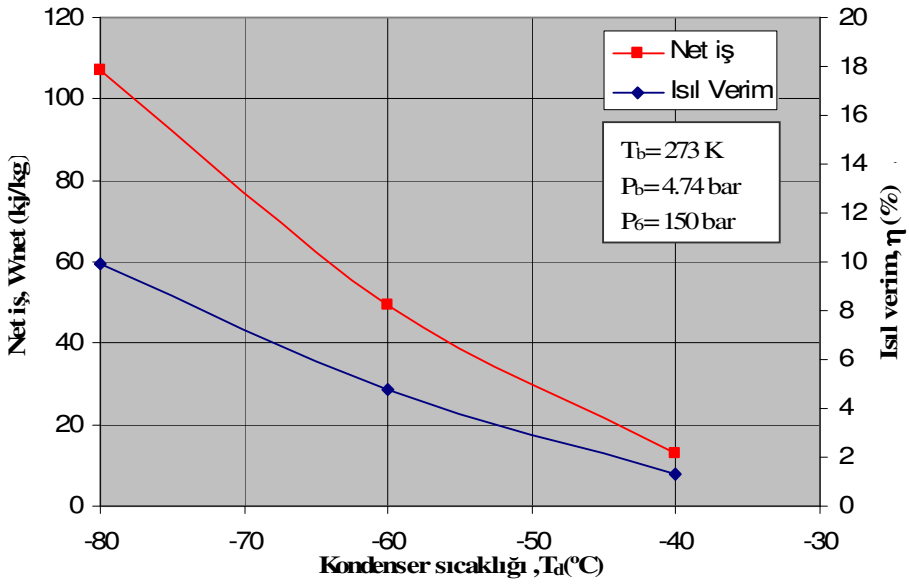
Bileşik Rankine metodunun tesise uygulanmasında, çevrimdeki farklı kondenser sıcaklıkları için elde edilebilecek kg başına net iş üretimi ve sistemin ısıl verimi araştırıldı. Sistemdeki her akışkan için basınç ve sıcaklık değerleri Çizelge 4.7'den alınmıştır.

Tesisin LNG hattında gazlaştırma prosesi gerçekleştirilirken aynı zamanda tesise ilave edilen P_3 pompası ile LNG basıncı 85 bar'ın üzerine ve optimum değer olan 200 bar basınca çıkarılmaktadır. Propan akışkanlı kapalı Rankine çevrimindeki türbine ilaveten LNG hattına entegre edilen ikinci bir türbin ile de güç üretimi yapılmaktadır. LNG hattında gazlaştırma işlemi için kullanılan Buharlaştırıcı–1, kapalı Rankine çevrimi için kondenser görevini yapmaktadır.

Açık ve kapalı Rankine çevrimlerinde kullanılan pompa, türbin, evaporatör ve kondenser basınç ve sıcaklık değerleri Çizelge 4.9'da belirtildiği gibi sabit kalmak koşulu ile bileşik Rankine çevriminde kondenser sıcaklık T_d değişiminin, net iş üretimine ve ısıl verime etkisi Şekil 4.12'deki grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Bileşik Rankine çevriminin parametreleri

Çevrim	**Akışkan**
Kapalı Rankine Çevrimi	Propan
Türbinin izentropik verimi	0.8
Pompanın izentropik verimi	0.8
Evaporatör çıkış sıcaklığı (K), T_b	273 - 363
Kondenser çıkış sıcaklığı (K), T_d	193 - 233
Türbin giriş basıncı (bar), P_b	2.43 – 4.74
Açık Rankine Çevrimi	CH_4(LNG ve Doğal gaz)
Türbinin izentropik verimi	0.8
Pompa izentropik verimi	0.8
LNG tank basıncı (bar), P_1	1.05
Doğalgaz sevk basıncı (bar), P_8	82
Türbin giriş basıncı (bar), P_6	100 - 250

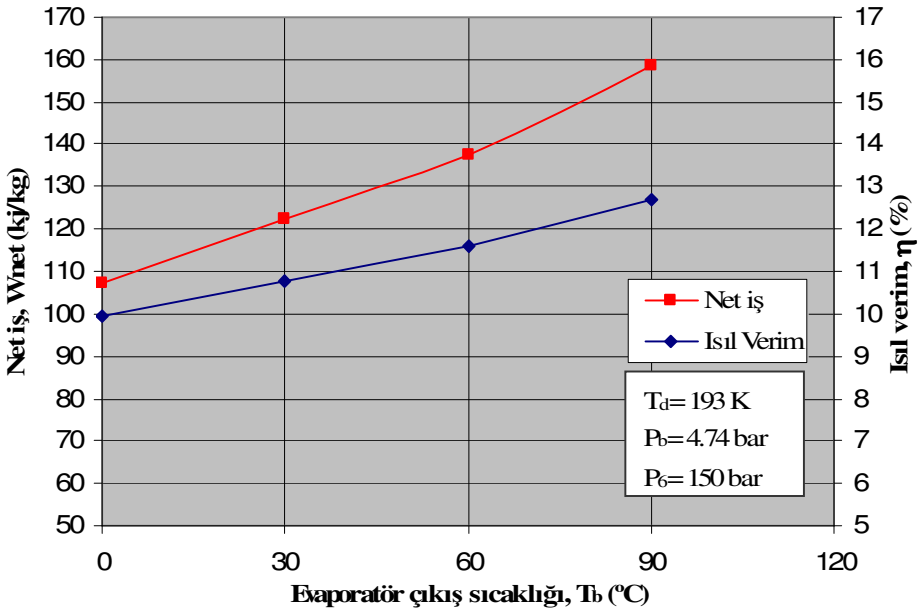


Şekil 4.12 Bileşik Rankine çevriminde kondenser çıkış sıcaklığının, LNG tesisinin net işine ve ısıl verimine etkisi

Bileşik açık-kapalı Rankine çevriminden, kg başına elde edilecek net iş, kondenser sıcaklık değeri -40 ^{o}C'den -80 ^{o}C'ye düşürüldüğünde ~ 13 kJ/kg'dan ~107 kJ/kg değerine ulaşmaktadır. Kondenser sıcaklığı 40 ^{o}C azalırken, işteki artışa benzer şekilde sistemin ısıl verimi de artmaktadır.

Aynı tesiste, kapalı Rankine çevrimindeki evaporatör (Buharlaştırıcı–4) çıkış sıcaklığının artırılması ile net işin ve ısıl verimin değişimi araştırılmıştır. Çizelge 4.9'de verilen LNG hattı değerleri değişmezken, kapalı Rankine çevriminde evaporatör çıkış sıcaklık değerleri T_b 0 ^{o}C ile 90 ^{o}C aralığında değiştirilmiştir. Söz konusu sıcaklık aralığında, LNG tesisinin kg başına net iş ile ısıl verimin değişim grafiği Şekil 4.13'de verilmiştir.

Şekil 4.10'da tesisat şemasında görülen Buharlaştırıcı-4'ün çıkış sıcaklığının (T_b), 0 ^{o}C den 90 ^{o}C'ye arttırılması ile tesiste ~ % 48 oranında net iş artışı olmaktadır. Aynı sıcaklık artışı için, Kısım 3.1.3.2'de belirtilen nedenlerden dolayı LNG tesisinin ısıl verimi ~ % 27 oranında artmıştır.

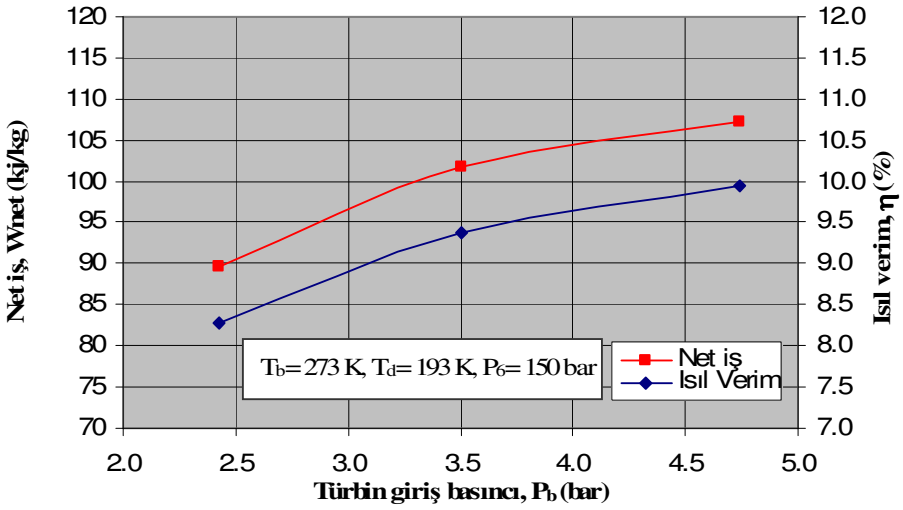


Şekil 4.13 Bileşik Rankine çevriminde evaporatör çıkış sıcaklığının, LNG tesisinin net işine ve ısıl verimine etkisi

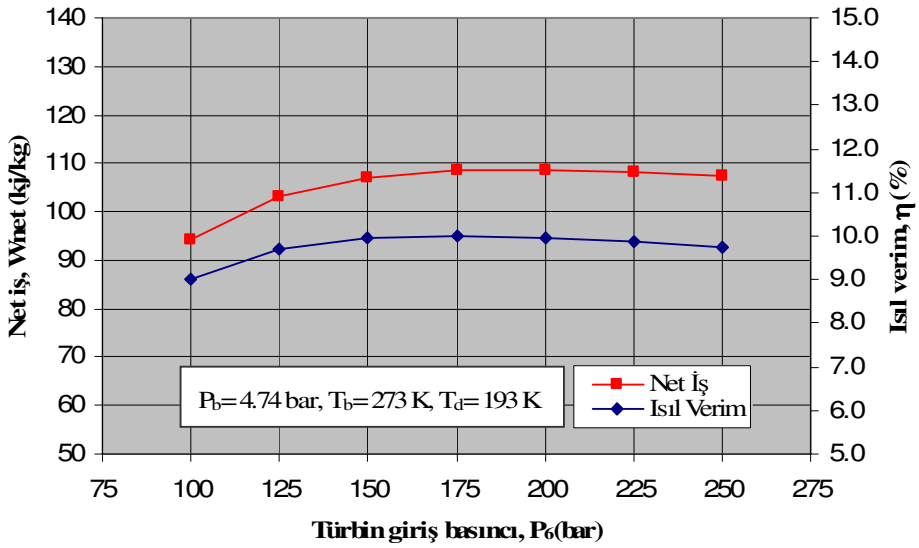
Tesisin veriminin arttırılması yönünde yapılan bir diğer çalışma da Kısım 3.1.3.3'de belirtilen kapalı Rankine çevrimindeki türbin giriş basıncının arttırılması yöntemidir. Tesise bu yöntemin uygulanması ile kg başına net iş ve ısıl verimin değişimi araştırılmıştır.

Yapılan analiz esnasında Çizelge 4.4'deki LNG hattı değerleri kullanılırken, kapalı Rankine çevrimi için türbin giriş basıncı (P_b), 2.43 bar'dan 4.74 bar'a kadar arttırılmıştır. Bu basınç aralığında sistemin net işi ile ısıl veriminin değişim grafikleri Şekil 4.14'de verilmiştir.

Şekil 4.14'de, türbin giriş basıncının 2.43 bar'dan 4.74 bar'a arttırılması sonucu tesisin net işinin ~ % 20 oranında arttığı görülmektedir. LNG tesisinin ısıl verimi de net işin artışına paralel olarak ~ % 20 oranında artış sağlamaktadır.



Şekil 4.14 Bileşik Rankine çevriminde Türbin-1 giriş basınç değişiminin, LNG tesisinin net işine ve ısıl verimine etkisi



Şekil 4.15 Bileşik Rankine çevriminde Türbin-2 giriş basınç değişiminin, LNG tesisinin net işine ve ısıl verimine etkisi

Aynı metot LNG hattında bulunan Türbin-2 için uygulandığında, kg başına net iş ve ısıl verim değerleri Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Türbin-2 giriş basıncının arttırılması analizinde Çizelge 4.9'da ki değerler sabit kalırken, açık Rankine'deki Türbin-2 giriş basıncı P_6 100-250 bar aralığında yükseltilmiştir.

Türbin giriş basıncı arttıkça türbinden elde edilen özgül iş artmakta ancak, P_3 sıvı pompasında LNG'yi bu basınca çıkarmak için gerekli özgül iş tüketimi de buna paralel olarak artmaktadır. Bileşik Rankine çevriminden elde edilecek kg başına net iş, türbin giriş basıncı 200 bar değerine gelinceye kadar ~ % 15 oranında artmaktadır. Türbin giriş basıncı artırılmaya devam edilse bile net iş miktarı hemen hemen sabit kalmaktadır.

4.4. Örnek Çalışma: Marmara LNG Alım Terminalinde (LNGMAT) Güç Üretimi

Tesis; Kuzey Marmara kıyısında, Tekirdağ ili M.Ereğlisi ilçesinde, ana doğal gaz boru hattına 23 km uzaklıkta yer almaktadır. Botaş'ın bu LNG Terminali 1994 yılında işletmeye alınmıştır. Terminalin iki ana fonksiyonu vardır: gelen LNG'yi boşaltmak ve depolamak, depolanan LNG'yi istenilen miktarlarda gazlaştırarak sevketmektir. Terminalde 3 adet 85000 m^3 LNG tankı mevcuttur. Terminal, saatte max. 685000 Nm^3 gaz sevkiyatı yapacak şekilde dizayn edilmiş olup, yıllık sevkiyat kapasitesi maksimum 6 Milyar Nm^3'dür. Tesisin dizayn akış diyagramına göre, LNG debisi 160.28 kg/s, LNG tank basıncı ve sıcaklığı 1.05 bar 112 K, doğal gaz sevk basınç ve sıcaklığı ise 82 bar 273 K'dir. Tesisteki LNG'nin hacimsel olarak % 90.98'i metandır(Botaş LNG Terminali Proses Dizayn Akış Diyagramı 1986). Bu nedenle LNG Bisio ve Taliafico (2002), Zhang ve Lior (2006) yaptığı gibi saf metan olarak alınabilir.

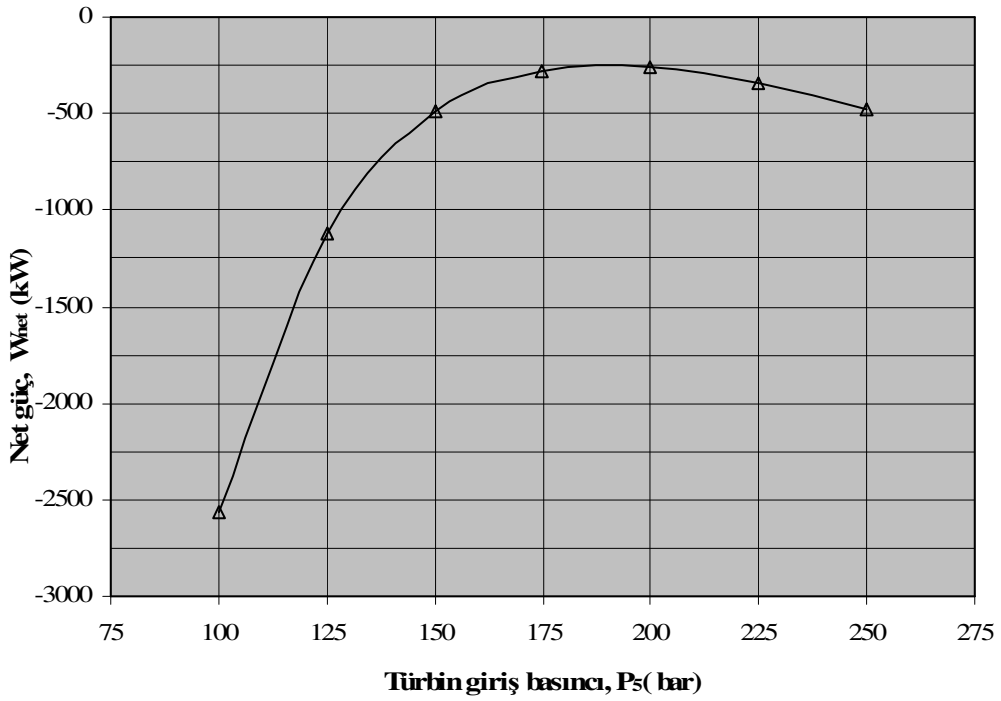
Kısım 4.3'de üç farklı yöntemle LNG terminalinde üretilebilecek kg başına iş miktarı ve ısıl verim analizleri yapıldı. Bu bölümde ise bu üç farklı yöntemin ayrı ayrı LNGMAT'ne uygulanması ile elde edilebilecek güç miktarları kW cinsinden bulundu. Ayrıca bu güç üretimini etkileyen parametrelerin (türbin giriş basınçları, evaporatör ve kondenser çıkış sıcaklığı) etkileri araştırıldı. Bunun için tesisten elde edilen gerçek veriler kullanıldı.

4.4.1. LNGMAT'a Açık Rankine Çevriminin Uygulanması

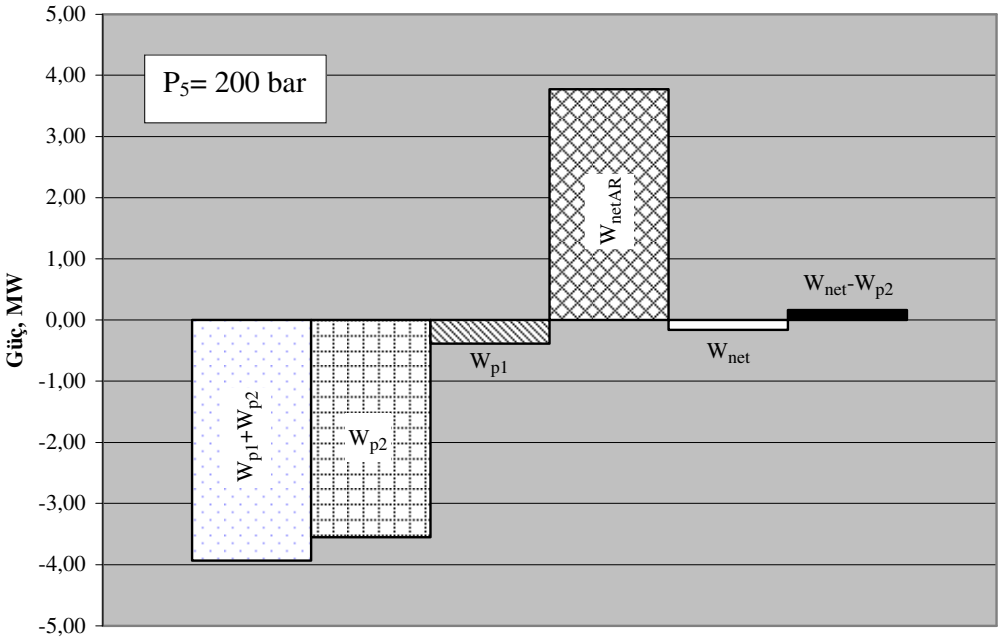
Tesise Şekil 4.1'deki gibi sadece açık Rankine uygulandığında, açık Rankine türbin giriş basıncı P_5 100 bar'dan 250 bar'a kadar attırılarak elde edilebilecek güç miktarları Şekil 4.15'de verilmiştir. Buna göre tesisin açık Rankine için optimum basıncı daha öncede bulunduğu gibi yine 200 bar'dır. Şekil 4.16'da LNGMAT'ndeki

sistemde pompa güçleri ve sisteme açık Rankine çevrimi uygulandığında net güç üretimi gösterilmiştir. Mevcut sistemde sıvı pompalarının tükettiği güç; (W_{p1}+W_{p2}), 3.96 MW olarak hesaplandı. Sisteme açık Rankine çevrimi uygulandığında çevrimin net güç üretimi ise (W_{netAR}) 3.78 MW olarak belirlendi. Böylece, açık Rankine çevriminde üretilen güç, mevcut sistemdeki sıvı pompalarının tükettiği gücün % 93'ünü karşılayabilir. Tesisteki P_1 ve P_2 pompalarında tüketilen enerjinin % 88'i ise 2. kademe sıvı pompasında tüketildiğinden 2. kademe sıvı pompaları için gerekli güç (3.54 MW), açık Rankine çevriminde üretilen güç (W_{netAR}=3.7 MW) ile sağlanabilir.

Böylece tesisin enerji ihtiyacı ~3966 kW'tan ~261 kW'a inebilecek ve yılda 350 gün çalışan tesiste ~31 GWh enerji tasarrufu sağlanabilecektir.



Şekil 4.15 Açık Rankine çevriminde türbin giriş basınç değişiminin, LNG tesisinin net gücüne etkisi



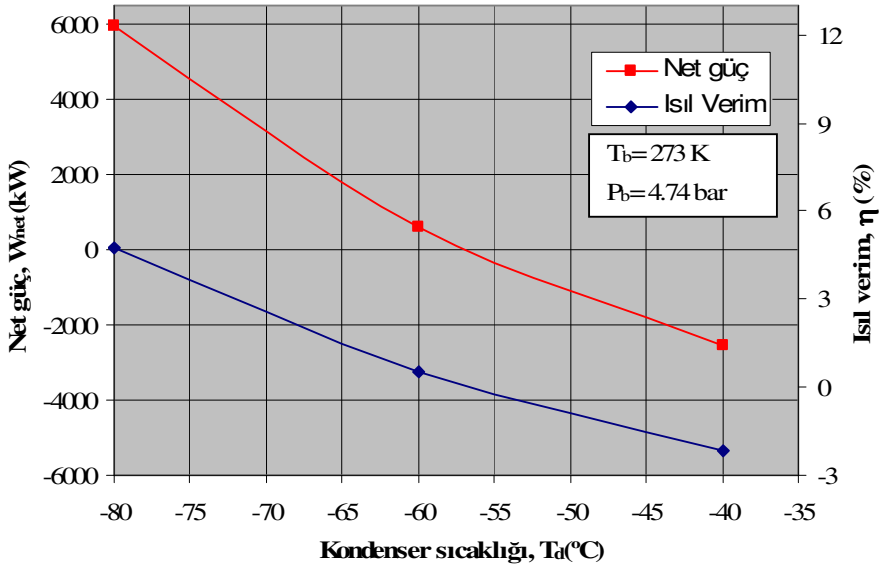
Şekil 4.16 Marmara LNG alım terminalinde pompa güçleri ve sisteme açık Rankine çevrimi uygulandığında net güç üretimi

4.4.2. LNGMAT'a Kapalı Rankine Çevriminin Uygulanması

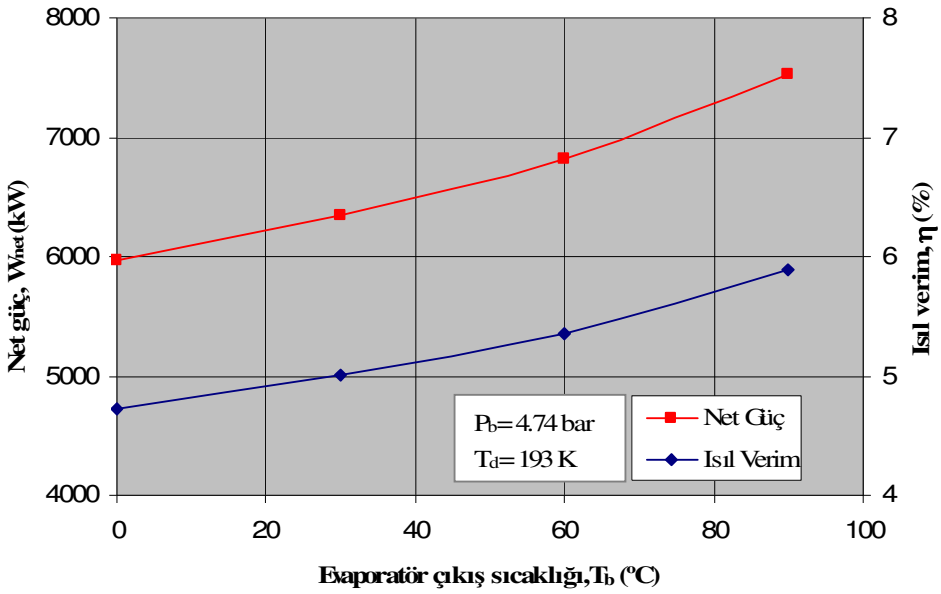
Tesise kapalı Rankine çevriminin uygulanması daha önce Şekil 4.5'de sunulmuştur. Burada kapalı Rankine çevriminde iş gören akışkan olarak propanın kullanıldığı düşünülmüştür. Bir Rankine çevriminin güç üretimi ve ısıl verimini etkileyen parametreler (türbin giriş basıncı, evaporatör ve kondenser sıcaklıkları) dikkate alınarak analiz yapıldı. Çizelge 4.6'da verilen değerler kullanılarak tesisin üretebileceği güç araştırıldı.

Kapalı Rankine çevrimi uygulaması LNG tesisinde net güç üretimi üzerine kondenser çıkış sıcaklığının T_d etkisi Şekil 4.17'de, evaporatör çıkış sıcaklığının T_b etkisi ise Şekil 4.18'de verilmiştir. Beklenildiği gibi kondenser sıcaklığı düşerken, evaporatör sıcaklığı ise artarken güç üretimi ve ısıl verimler artmaktadır.

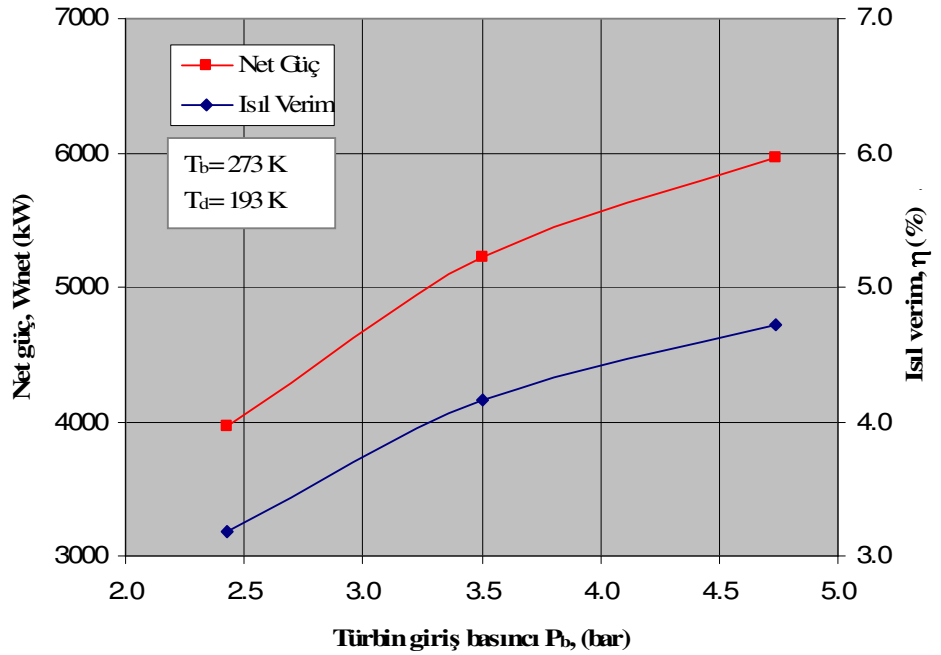
Kapalı Rankine çevrimindeki türbin giriş basıncının P_b güç üretimi üzerine etkisi Şekil 4.19'da sunulmuştur. Kısım 3.1.3.3'de de gösterildiği gibi türbin giriş basıncı P_b yükseldikçe güç ve ısıl verim yükselmektedir. Yine bu da beklenen bir sonuçtur.



Şekil 4.17 Kapalı Rankine çevriminde kondenser çıkış sıcaklığının, LNG tesisinin net gücüne etkisi



Şekil 4.18 Kapalı Rankine çevriminde evaporatör çıkış sıcaklığının, LNG tesisinin net gücüne ve ısıl verimine etkisi



Şekil 4.19 Kapalı Rankine çevriminde türbin giriş basınç değişiminin, LNG tesisinin net gücüne etkisi

4.4.3. LNGMAT'a Bileşik Rankine Çevriminin Uygulanması

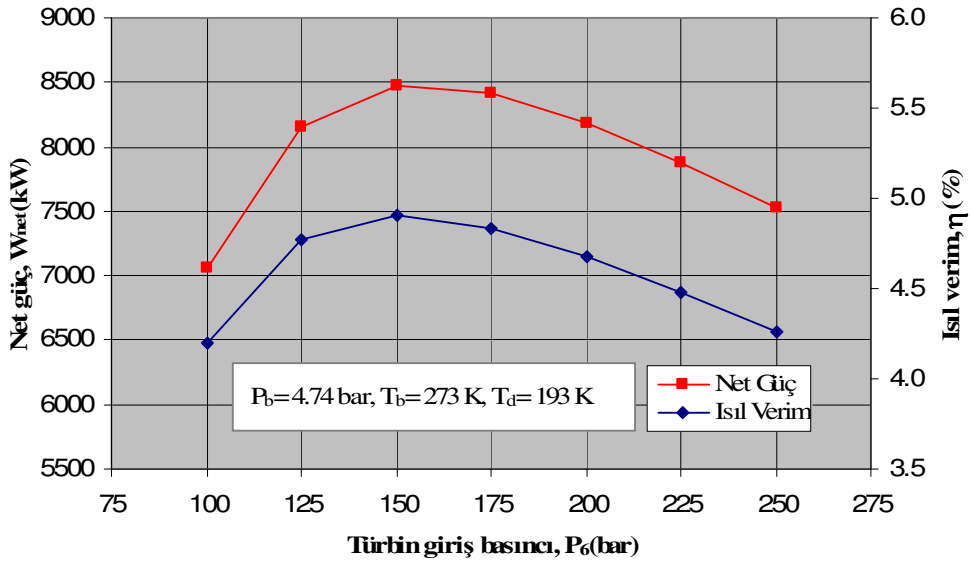
Bileşik çevrimin tesise uygulanması Kısım 4.3'deki Şekil 4.10'da gösterilmişti. Burada açık Rankine çevrimi ve kapalı Rankine çevriminin birlikte tesise uygulandığı düşünülmüştür. Açık Rankine çevriminde iş gören akışkan olarak LNG(metan), kapalı Rankine çevriminde iş gören akışkan olarak propan kullanıldığı varsayılmıştır. Bileşik Rankine çevriminin Çizelge 4.9'da verilen parametrelere uygun olarak tesise uygulanması ile elde edilebilecek güç miktarları araştırılmıştır. İnceleme esnasında; açık ve kapalı Rankine türbin giriş basınçları, evaporatör ve kondenser sıcaklıklarının etkisi incelenmiştir.

Bileşik çevrimin; açık Rankine çevrimi türbin giriş basıncının (P_6) iş üretimi ve ısıl verim üzerine etkisi Şekil 4.20'de verilmiştir. Buna göre optimum türbin giriş basıncı (P_6) 150 bar'dır. Bu değer sadece açık Rankine çevrimi uygulandığında ise 200 bar olarak belirlenmişti. Optimum basınçtaki bu değişme iki çevrimin bileşik uygulandığında; türbin giriş basıncı (P_6) yükseldiğinde, açık Rankine çevriminin ürettiği güç artarken, kapalı Rankine çevriminin ürettiği gücü, propanın debisinin düşmesi nedeni ile, negatif yönde etkilemekte ve sonuçta bileşik çevrimin net gücü düşmektedir. Propanın kütle debisinin azalması ise, türbin giriş basıncı (P_6) 150 bar'dan 200 bar'a çıktığında, Buharlaştırıcı-1'e kapalı Rankine çevriminin kondenserinden çekilen ısı miktarı 13 kj/kg kadar düşmesindendir. Buharlaştırıcı–1 ile kondenser arasındaki ısı transferi Şekil 4.10 göz önüne alındığında şöyle ifade edilebilir.

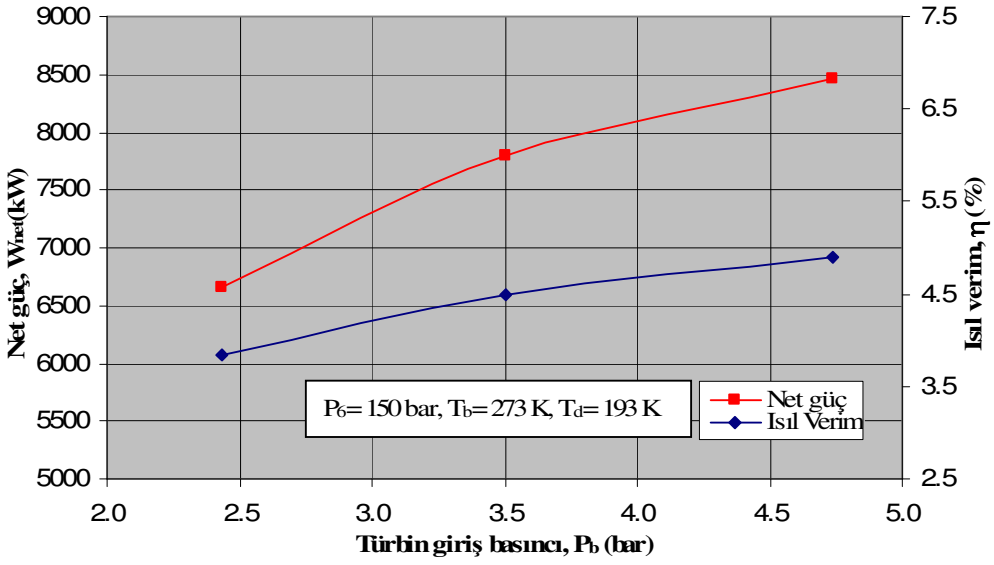
$$Q_{Buh\text{-}1(LNG)} = Q_{Kondenser(propan)} \quad (23)$$

$$m_{LNG} \cdot \Delta h_{45} = m_{propan} \cdot \Delta h_{cd} \quad (24)$$

(24) eşitliğine göre LNG'nin kütle debisi (m_{LNG}) ve kapalı Rankine çevrimi kondenser giriş-çıkış entalpi farkı (Δh_{cd}) değeri sabit kaldığından, açık Rankine çevrimindeki Buharlaştırıcı-1 giriş-çıkış entalpi farkı (Δh_{45}) azaldığında (h_5 =sbt. ve $h_{4s(200bar)} > h_{4s(150bar)}$) propanın kütlesel debisi (m_{propan}) değeri de düşecek ve buda kapalı Rankine çevrimindeki propan türbininden elde edilecek güç miktarını azaltacaktır.

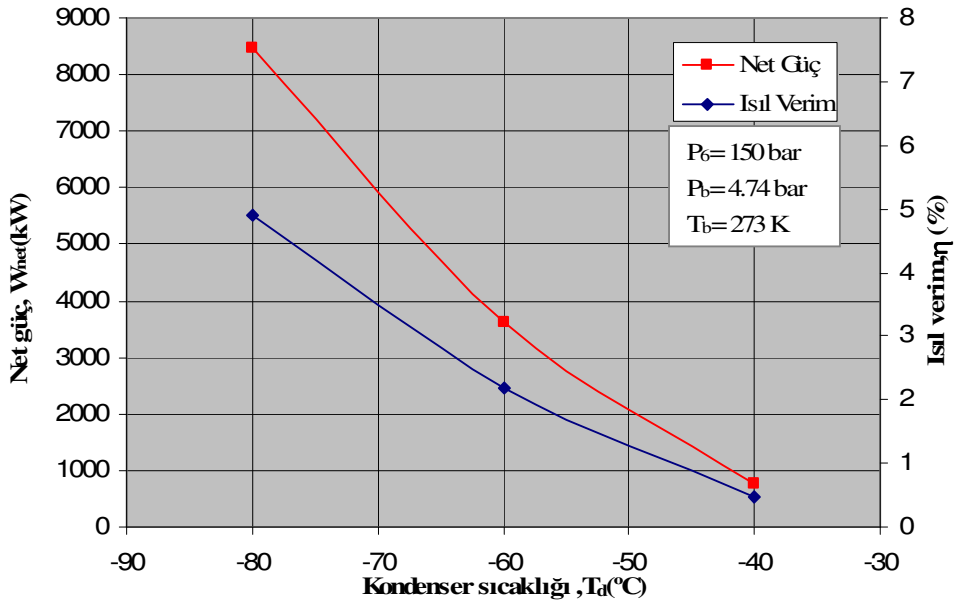


Şekil 4.20 Bileşik Rankine çevriminde Türbin-2 giriş basınç değişiminin, LNG tesisinin net gücüne ve ısıl verimine etkisi.

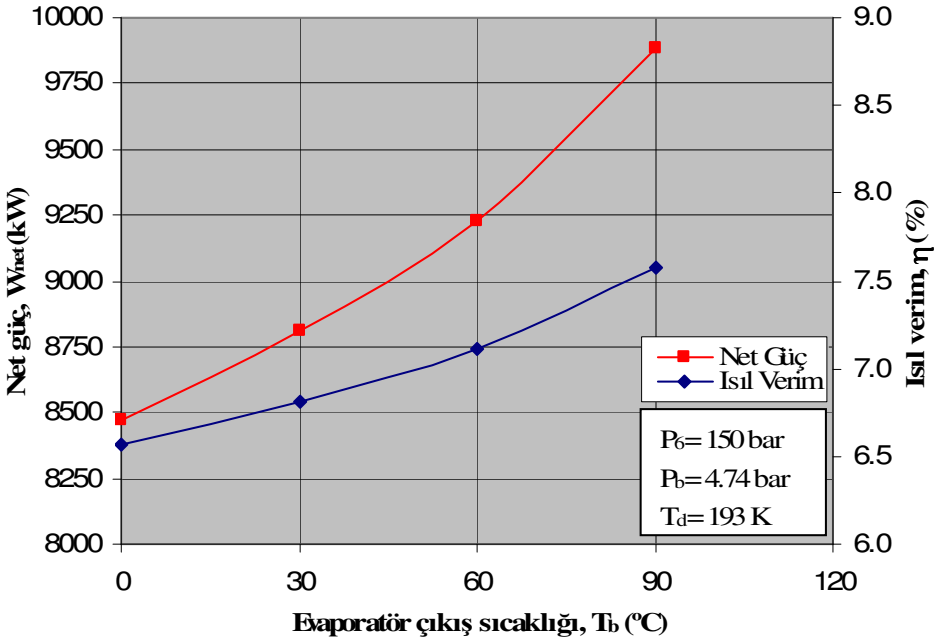


Şekil 4.21 Bileşik Rankine çevriminde Türbin-1 giriş basınç değişiminin, LNG tesisinin net gücüne ve ısıl verimine etkisi

Bileşik çevrimin, kapalı Rankine türbin giriş basıncı P_b, kondenser çıkış sıcaklığı T_d ve evaporatör çıkış sıcaklığı T_b'nin güç üretimi ve ısıl verim üzerine etkisi Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmiştir. Buna göre beklenildiği gibi, kapalı Rankine bölümünde türbin giriş basıncının P_b artması, kondenser çıkış sıcaklığının T_d azalması ve evaporatör çıkış sıcaklığının T_b artması bileşik çevrimin güç üretimini ve ısıl verimini artırmaktadır. Bunun terside geçerlidir.



Şekil 4.22 Bileşik Rankine çevriminde kondenser çıkış sıcaklığının, LNG tesisinin net gücüne ve ısıl verimine etkisi



Şekil 4.23 Bileşik Rankine çevriminde evaporatör çıkış sıcaklığının, LNG tesisinin net gücüne ve ısıl verimine etkisi

4.4.4. LNGMAT'a Uygulanan Üç Farklı Metodun Kıyaslanması

Üç farklı çevrimin parametreleri Çizelge 4.10'da verildiği gibi alınarak bu işlem yapılmıştır. Tesisteki türbin ve pompa izentropik verimleri % 80 olarak alınmıştır. Bu kısımda elde edilen sonuçlar toplu olarak sunulmuş ve kıyaslanmıştır.

Botaş'dan elde edilen LNGMAT'ın 2006 yılı faaliyet raporunda, 2006 yılı içinde 4.4 Milyar Nm^3 doğal gazı tüketim hattına enjekte ettiği bildirilmiştir. Buna göre tesisin dizayn akış diyagramındaki kütle debisi 160.28 kg/s alındığında yaklaşık olarak 2006 yılı içinde hatta sevk edilen doğal gaz 4.35 Milyar Nm^3 olmaktadır. Yani bu çalışmada kullanılan LNG kütle debisi değerinin 2006 yılı faaliyet raporuna göre de doğrulandığı görülmüştür. Dolayısı ile hesaplamalarda tesisin dizayn akış diyagramındaki gibi kütle debisi 160.28 kg/s olarak alınmıştır.

Çizelge 4.10 LNGMAT'a uygulanabilecek üç farklı çevrimin parametreleri

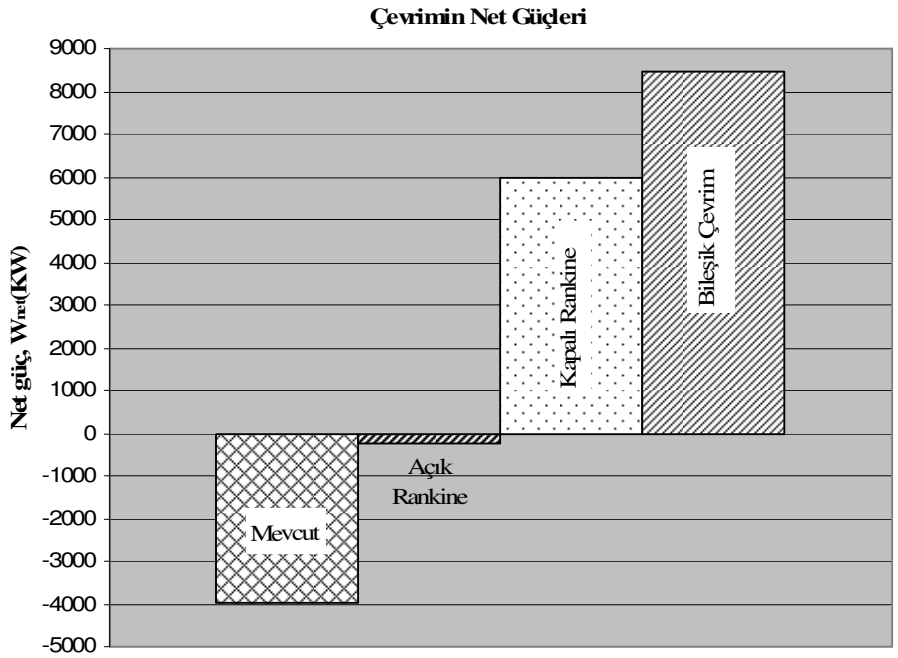
Çevrim	**Akışkan**
Açık Rankine Çevrimi	CH_4(LNG-Doğal gaz)
LNG tank basıncı (bar), P_1	1.05
Doğalgaz sevk basıncı (bar), P_8	82
Türbin giriş basıncı (bar), P_6	200
Kapalı Rankine Çevrimi	Propan
Evaporatör çıkış sıcaklığı (K), T_b	273
Kondenser çıkış sıcaklığı (K), T_d	193
Türbin giriş basıncı (bar), P_b	4.74
Bileşik Çevrimi (açık-kapalı Rankine)	CH_4-Propan
LNG tank basıncı (bar), P_1	1.05
Kapalı Rankine evaporatör çıkış sıcaklığı (K), T_b	273
Kapalı Rankine kondenser çıkış sıcaklığı (K), T_d	193
Kapalı Rankine türbin giriş basıncı (bar), P_b	4.74
Açık Rankine türbin giriş basıncı (bar), P_6	150
Doğalgaz sevk basıncı (bar), P_8	82

Çizelge 4.10'daki parametreler dikkate alınarak açık Rankine, kapalı Rankine ve bileşik(açık-kapalı Rankine) çevriminin LNGMAT'a uygulanması ile elde edilebilecek güç miktarları, belirlenmiştir.

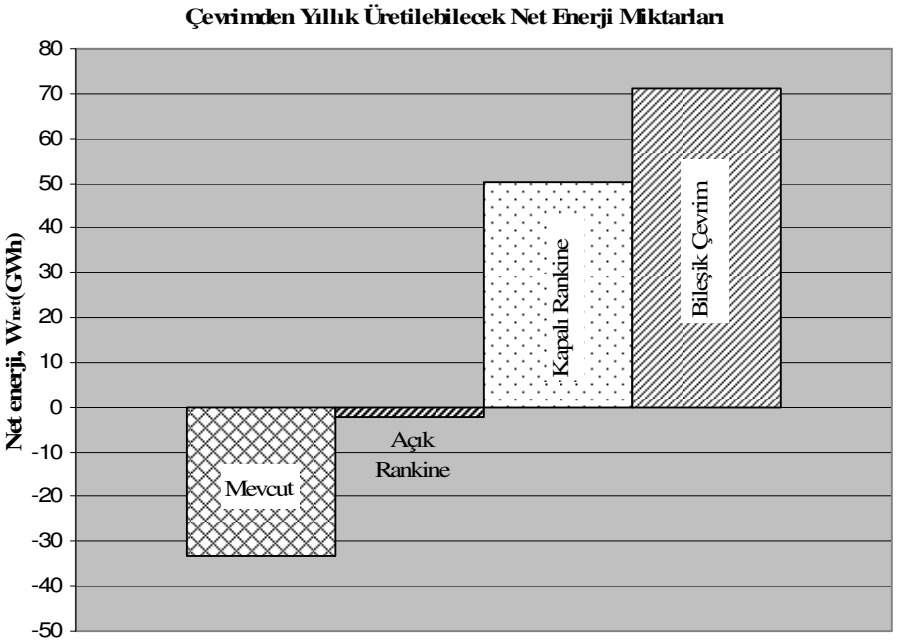
Bu parametreler seçilirken; açık Rankine çevriminin kendi başına tesise uygulanmasında optimum türbin giriş basıncı olarak 200 bar alınırken, bileşik çevrimin açık türbin giriş basıncının optimum değeri bir önceki kısımda 150 bar olarak bulunduğu için, bileşik çevrimde açık türbinin giriş basıncı (P_6) 150 bar alınmıştır. Yine sadece kapalı Rankine çevriminin ve bileşik çevrimdeki kapalı Rankine çevrimi parametreleri de seçilirken, kapalı Rankine çevriminin deniz suyundan ısı çekerek LNG'ye ısı aktarırken enerji ürettiği varsayılarak, 0 ^oC

evoparatör sıcaklığı ile -80 ^{o}C kondenser sıcaklığı arasında çalıştığı düşünülmüştür. Ayrıca yine kapalı Rankine ve bileşik çevrimde kapalı türbin giriş basıncı (P_b) için bir önceki kısım dikkate alınarak daha yüksek miktarda enerji üretimi için 4.74 bar seçilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar, mevcut durumu da içerecek şekilde Şekil 4.24'te verilmiştir.

Mevcut durumda halen tesiste P_1 ve P_2 pompaları için toplam 3.96 MW enerji tüketimi söz konusu iken, sadece açık Rankine çevriminin uygulanması ile bunun 3,7 MW'lık bölümü (% 93) karşılanabilecektir. Yine sadece kapalı Rankine çevriminin uygulanması ile tesisin ihtiyacı olan 3.96 MW'lık enerji tüketimi karşılanabileceği gibi bunu yanında yine 5.97 MW'lık enerji üretimi de yapılabilecektir. Bileşik çevrim uygulandığında ise yine halen kullanılan P_1 ve P_2 pompalarının tükettiği güç karşılanacak ve üstelik 8.47 MW'lık enerji üretimi de yapılabilecektir. Buna göre yılda 350 gün çalıştığı düşünüldüğünde elde edilebilecek yıllık güç üretim miktarları ise Şekil 4.25'te sunulmuştur. Şekil 4.25'e göre sadece açık Rankine çevrimi uygulandığında 31 GWh/yıl enerji tasarrufu yapılabilir. Yine sadece kapalı Rankine çevrimi uygulandığında, 33 GWh/yıl enerji tasarrufu yanında, ~50 GWh/yıl enerji üretilebilecektir. Bileşik çevrim uygulandığında ise yine 33 GWh/yıl enerji tasarrufu yanında ~71 GWh/yıl güç üretmekte mümkün olabilecektir. Yaklaşık bu kapasitede güç üreten çevrim örnekleri dünyada özellikle Japonya'da halen işletilmektedir.



Şekil 4.24 LNGMAT'a uygulanabilecek güç çevrimleri ile sistemden elde edilebilecek net güçler



Şekil 4.25 LNGMAT'a uygulanabilecek güç çevrimleri ile sistemden yıllık elde edilebilecek net enerji miktarları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Liu ve You (1999), doğalgazın LNG'ye dönüştürülmesi esnasında 850 kWh/ton_{LNG} enerji tüketildiğini belirtmektedir. LNG alım terminallerinde ise bu işin tersi (LNG'den doğal gaza dönüşüm) yapılırken enerji üretmek yani sıvılaştırırken harcanan enerjinin en azından bir kısmını gazlaştırırken geri kazanmak mümkündür.

Bu çalışmada, LNG alım terminallerinde tekrar gazlaştırılan doğalgazın enerji üretmek amacıyla tüketilmeden (LNGMAT'da olduğu gibi) boru hattına enjekte edildiği düşünülmüştür. Bu nedenle, terminalde LNG'den doğalgaza dönüşüm esnasında, güç üretmek amacıyla uygulanabilecek üç ayrı çevrim: açık Rankine, kapalı Rankine ve açık-kapalı bileşik Rankine çevrimi incelenmiştir. Araştırma iki aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada bu üç farklı metot ile kg başına üretilebilecek enerji miktarları; türbin giriş basınçlarına, evaporatör ve kondenser sıcaklıklarına bağlı olarak araştırılmıştır. İkinci aşamada ise LNGMAT'dan temin edilen veriler kullanılarak, bu üç farklı metot ile üretilebilecek güç miktarları yine türbin giriş basınçlarına, evaporatör ve kondenser sıcaklıklarına bağlı olarak belirlenmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

1- Açık Rankine çevriminin LNG alım terminaline uygulanması ile üretilebilecek enerji miktarının türbin giriş basıncı ile değiştiği belirlenmiştir. Üretilebilecek enerji miktarı; türbin giriş basıncı 150 bar oluncaya kadar hızla artmakta, 150 bar - 200 bar aralığında ise oldukça az artmakta ve 200 bar basınçta ise maksimum değerine ulaşmaktadır. Türbin giriş basıncı 200 bar değerinin üzerine çıktığında ise enerji üretimi az da olsa düşmeye başlamaktadır. Bu nedenle açık Rankine çevrimi uygulamasında optimum basınç 200 bar olarak bulunmuştur.

2- Açık Rankine uygulaması ile LNG terminalindeki sıvı pompaları için gerekli enerji miktarının %93'ünün karşılanabileceği tespit edilmiştir. Bu metot, örneğin Marmara Ereğlisi LNG alım terminaline (LNGMAT) uygulandığında, 3.7 MW civarında bir güç tasarrufu sağlanabileceğini söylemek mümkündür.

3- Türbin giriş basıncının ve evaporatör çıkış sıcaklığının artmasıyla, kondenser çıkış sıcaklığının ise azalmasıyla, LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanan

kapalı Rankine çevriminden elde edilen enerji miktarının ve çevrimin ısıl veriminin arttığı tespit edilmiştir.

4- Aracı akışkan olarak propan kullanan kapalı Rankine çevriminde türbin giriş basıncı 4.74 bar, kondenser çıkış sıcaklığı 193 K ve evaporatör çıkış sıcaklığı 273 K alınırsa, terminalin LNG sıvı pompaları için gerekli güç ihtiyacının (3.96 MW) karşılanabileceği üstelik 5.97 MW'lık bir güç üretiminin de yapılabileceği söylenebilir.

5- LNG alım terminaline açık-kapalı bileşik Rankine çevrimi uygulanırken, açık Rankine çevrimi türbin giriş basıncı 150 bar olursa, bileşik çevrimin maksimum enerji üreteceği bulunmuştur. Ayrıca yine kapalı türbin giriş basıncının ve evaporatör çıkış sıcaklığının artmasıyla, kondenser çıkış sıcaklığının ise azalmasıyla, LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanan bileşik çevrimin üreteceği iş miktarının ve ısıl veriminin de yükseldiği belirlenmiştir.

6- Aracı akışkan olarak propanın kullanıldığı kapalı Rankine çevriminde türbin giriş basıncı 4.74 bar, kondenser çıkış sıcaklığı 193 K, evaporatör çıkış sıcaklığı 273 K alındığında ve açık Rankine çevriminde LNG'nin türbin giriş basıncı ise 150 bar olduğunda bileşik çevrimin toplam 12.43 MW'lık güç üretebileceği bulunmuştur. Terminalin sıvı pompaları için gerekli güç (3.96 MW) çıkarıldığında ise bileşik çevrimin net gücünün 8.47 MW olabileceği tespit edilmiştir.

7- Tesisin yılda 350 gün çalıştığı varsayılırsa; açık Rankine çevrimi ile 31 GWh/yıl enerji tasarrufu yapılabileceği, kapalı Rankine çevrimi uygulandığında ise 33 GWh/yıl enerji tasarrufu yanında 50 GWh/yıl ilave enerji üretebileceği belirlenmiştir. Yine açık- kapalı bileşik Rankine çevrimi ile terminalde 33 GWh/yıl enerji tasarrufuna ilaveten 71 GWh/yıl enerji de üretilebileceği ifade edilebilir.

Her üç çevrim ile terminalde, önemli miktarda enerji üretimi yapılabileceği görülmektedir. Bundan sonra yapılacak çalışmada bu üç metodun ilk yatırım maliyeti, geri ödeme süresi, işletim ve bakım maliyeti gibi faktörleri de göz önünde bulundurarak yapılacak ekonomik analiz ile hangisinin tesise uygulanabileceği araştırılabilir. Ayrıca, doğalgazın tamamını terminalden boru hattına enjekte etmek yerine bir kısmının güç üretmek amacıyla kullanımına imkân var ise, Rankine-Brayton bileşik çevrimleri de incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

Ashrae. 1993. Fundamentals Hand Book (SI), Atlanta, GA.

Bisio, G., Tagliafico, L. 2000 On the recovery of LNG physical exergy. Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit(IECEC) 1: 309-317.

Bisio G., Tagliafico. L. 2002. On the recovery of LNG physical exergy by means of a simple cycle or a complex system. Exergy, an International Journal 2:34-50.

Botaş LNG terminali proses dizayn akış diyagramı. 1986.

Cho, J. H., Ebbern, D., Kotzot. H., Durr. C. 2005 Marrying LNG and power generation. Energy Markets 10,8:28-35.

Choi, K., Chang, H.M. 1999. Thermodynamic analysis of power generation cycle utilizing LNG cold energy. Journal of the Korea Institute of Applied Super conductivity 1(1) 48-55.

Cotana, F., Pispola, G. 2005. Recupero di energia mediante espansione diretta dal processo di rigassificazione del gas naturale liquefatto, 5° Convegno Nazionale CIRIAF, Perugia, 8-9 Aprile.

Çengel.Y.A., Boles. M.A. 1989. Çeviren: Derbentli. T. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, McGraw-Hill. Inc (ed) 2nd. pp 469-524:867 İstanbul.

Demirpolat. S.O., Ersoy H. K. 2007. LNG alım terminallerinde direkt genleşme metodu ile enerji geri kazanımı. Enerji Verimliliği Kongresi Bildiriler Kitabı, 113-119.

Ersoy. H. K., Demirpolat. S.O. 2007. LNG'nin kriyojenik enerjisini kullanarak güç üretiminin araştırılması. ICCI Bildiriler Kitabı, 235.

http://www.alto.org.tr

http://www.botas.gov.tr

http://www.halliburton.com

Kaneko, K., Ohtani, K. Tsujikawa, Y., Fujii, S. 2004. Utilization of the cryogenic exergy of LNG by a mirror gar-turbine. Applied Energy 79:355-369.

Liu, H., You, L. 1999. Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas. Energy Conversion & Management 40:1515-1525.

Marmara LNG Alım Terinali İşletme Müdürlüğü. 2006 Yılı (Ocak-Aralık) Faaliyet Raporu.

Otsuka, T. 2006. Evolution of an LNG terminal: Senboku terminal of osaka gas. 23th World Gas Conference., Amsterdam, (www.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add11362.pdf).

Punwani, D.V. 2004. Chiller Technologies for turbine inlet cooling. Appeared in April & June 2004 Energy-Tech Magazine 12-19.

Qiang, W., Yanzhong, L., Jiang, W., 2004. Analysis of power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source. Applied Thermal Engineering 24:539-548.

Qiang, W., Yanzhong, L., Xi, C. 2005. Exergy analysis of liquefied natural gas cold energy recovering cycles. Int. J. Energy Res. 29:65-78.

Sugiyama, M., 2001. The utilization of LNG cryogenic energy. The Reserarch Council for Energy and Inf. Techolog, 32:1-8 (www.eit.or.jp/magazine/pdf/eit32e.pdf).

TPX. "Thermodynamic Properties for Excel''. (http//bsun.netcaetera.ro/bsun/caes/ applyied_thermodynamics//tpx.htm).

Velautham. S., Ito. T., Tekata. Y. 2001. Zero emission combined power cycle using LNG cold. JSME Int.Jornol.44(4), 668-674.

Zhang, N., Lior, N. 2006. A novel near-zero CO_2 emission thermal cycle with LNG cryogenic exergy utilization. Energy 31:1666-1679.