



## Thermo-economic study of two different combined heat-power system for a hospital

Oğuz Othan<sup>ID</sup>, Muhammed Arslan Omar\*<sup>ID</sup>

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kafkas University, 36000, Kars, Türkiye

### Highlights:

- Investigation of energy consumption of a hospital in a cold climate
- Combined heat and power system selection for the hospital
- Energy and economic analysis of cogeneration and trigeneration systems

### Keywords:

- Combined heat and power systems
- Cogeneration
- Trigeneration
- Energy analysis
- Economic analysis

### Article Info:

Research Article

Received: 24.06.2021

Accepted: 23.06.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.956790

### Correspondence:

Author: Muhammed Arslan Omar

e-mail:

m.arslanomar@gmail.com

phone: +90 474 225 1279

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the applicability of cogeneration and trigeneration systems for a hospital was investigated, and found that cogeneration systems might be more advantageous to apply a cogeneration system for the hospital examined due to the high initial investment costs in trigeneration systems (Figure A).

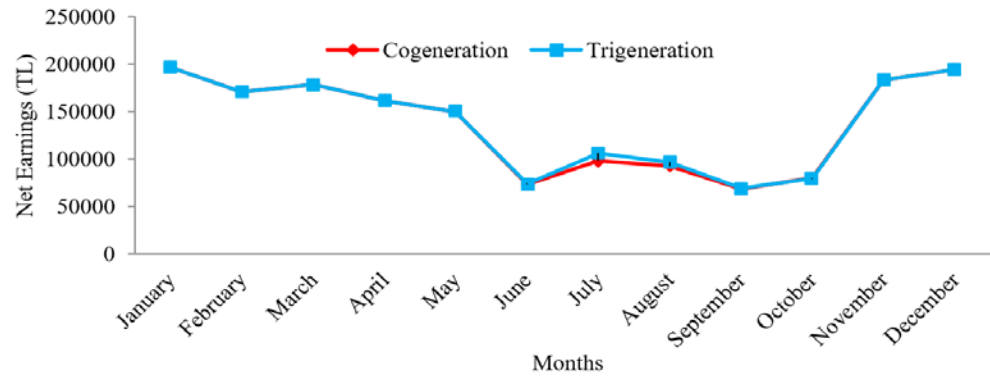


Figure A. Monthly net earnings by the cogeneration and trigeneration systems

**Purpose:** In this study, for the hospital, which is one of the most complex structures with intense energy consumption, the production, management, efficiency, economic value, and environmental impact of the energy were analyzed and the working planning of the systems was made. Due to the intensive use of heat and power in the hospital, it was aimed to solve the energy problem, save energy, save cost and achieve high efficiency by applying combined heat and power systems, which are based on the principle of producing both heat and electricity by a single stage.

**Theory and Methods:** In this study, the cogeneration and trigeneration systems in terms of cost and energy was analyzed to meet the energy needs of a hospital in Kars. In the feasibility of cogeneration and trigeneration systems, the system was selected according to the electricity consumption values since the consumption is regular and the cost is high. Considering the physical conditions of the hospital in the selection of the system, thermo-economic analyses were made, the systems were compared and which one would be more suitable was investigated.

**Results:** In the energy and economic analyses made for the hospital, cogeneration system were found to be more advantageous and economical in terms of both annual depreciation cost and payback periods. In the analyses, the annual net income in the cogeneration system was calculated as 1,649,142 Turkish Liras (TL) and the annual net income in the trigeneration system was calculated as 1,661,105 TL. In cogeneration system analysis, the annual depreciation: 429,921 TL, static payback period: 2.41 years, and dynamic payback period: 2.85 years were found. In cogeneration system analysis, the annual depreciation 429,921 TL, static payback period 2.41 years, and dynamic payback period 2.85 years were determined. In the trigeneration system, annual depreciation was 558,823 TL, static payback period was 3.13 years and dynamic payback period was found to be 3.86 years. With the savings in primary energy consumption, emission values have reduced and CO<sub>2</sub> emissions have decreased by 39%.

**Conclusion:** According to the results of the energy and economic analyses, it has been determined that both cogeneration and trigeneration applications are advantageous for this hospital. However, trigeneration systems are not deemed suitable for a hospital in Kars climate conditions, due to the hospital's low cooling need, higher initial investment costs of the system, and the long payback period of the system. The annual difference of 11,963 TL provided by the trigeneration system is very low compared to the additional investment cost of 1,219,050 TL to be paid in the establishment of the facility.



## Bir hastane için iki farklı birleşik ısı ve güç sisteminin termo-ekonomik incelemesi

Oğuz Othan<sup>ID</sup>, Muhammed Arslan Omar\*<sup>ID</sup>

Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 36000, Kars, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Soğuk iklimde bulunan bir hastanenin enerji tüketiminin incelenmesi
- Hastane için birleşik ısı ve güç sistem seçimi
- Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin enerji ve ekonomik analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 24.06.2021  
Kabul: 23.06.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.956790

### Anahtar Kelimeler:

Birleşik ısı ve güç sistemleri,  
kojenerasyon,  
trijenerasyon,  
enerji analizi,  
ekonomik analiz

### ÖZ

Enerji tüketimleri yüksek olan hastaneler birleşik ısı ve güç sistemleri olarak isimlendirilen kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin uygulanması gereken yerlerin başında gelmektedir. Bu çalışmada Kars'ta bulunan 276 yataklı bir üniversite hastanesine kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Elektrik ihtiyacının sürekliliği ve birim fiyatının yüksek olması nedeni ile hastanenin elektrik ihtiyacına göre sistem seçimi yapılmıştır. Her iki sistemin planlaması elektrik ihtiyacının tamamını karşılayacak şekilde ve bu üretim sonucunda meydana gelen ısıtma ve soğutma çıktılarıyla hastanenin ihtiyacı olan ısıнын bir kısmının karşılanacağı düşünülerek tasarlanmıştır. Kojenerasyon sisteminin uygulanması ile yıllık 1.649.142 TL, trijenerasyon uygulamasıyla ise yıllık 1.661.105 TL net kar edileceği belirlenmiştir. Statik geri ödeme süresi kojenerasyon sisteminde 2,41 yıl, trijenerasyon sisteminde 3,86 yıl olarak, dinamik geri ödeme süresinin ise kojenerasyon sistemi için 2,85 yıl ve trijenerasyon sistemi için ise 3,13 yıl olarak bulunmuştur. Sonuç olarak Kars iklim özelliklerine sahip olan bölgelerdeki hastanelere her iki sistemin de fayda sağlayacağı, ancak trijenerasyon sistemlerinde ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması nedeni ile incelenen hastane için kojenerasyon sistemi uygulanmasının daha avantajlı olabileceği belirlenmiştir.

## Thermo-economic study of two different combined heat-power system for a hospital

### HIGHLIGHTS

- Investigation of energy consumption of a hospital in a cold climate
- Combined heat and power system selection for the hospital
- Energy and economic analysis of cogeneration and trigeneration systems

### Article Info

Research Article  
Received: 24.06.2021  
Accepted: 23.06.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.956790

### Keywords:

Combined heat and power  
systems,  
cogeneration,  
trigeneration,  
energy analysis,  
economic analysis

### ABSTRACT

Hospitals with high energy consumption are among the places where cogeneration and trigeneration systems, called combined heat and power systems, should be applied. In this study, the applicability of cogeneration and trigeneration systems in a 276-bed university hospital in Kars was investigated. Due to the continuity of the electricity need and the high unit price, the system was selected according to the electricity need of the hospital. The planning of both systems has been designed in a way that will meet all the electricity needs and with the heating and cooling outputs resulting from this production, some of the heat needed by the hospital will be met. It has been determined that a net profit of 1,649,142 TL per year with the implementation of the cogeneration system and 1,661,105 TL per year with the trigeneration application will be made. The static payback period was calculated as 2.41 years in the cogeneration system, 3.86 years in the trigeneration system, and the dynamic payback period was calculated as 2.85 years for the cogeneration system and 3.13 years for the trigeneration system. As a result, it has been determined that both systems will benefit the hospitals in the regions with Kars climate characteristics, but it may be more advantageous to apply a cogeneration system for the hospital examined due to the high initial investment costs in trigeneration systems.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : oguz\_othan@hotmail.com, \*m.arslanomar@gmail.com / Tel: +90 474 225 1279

## 1. Giriş (Introduction)

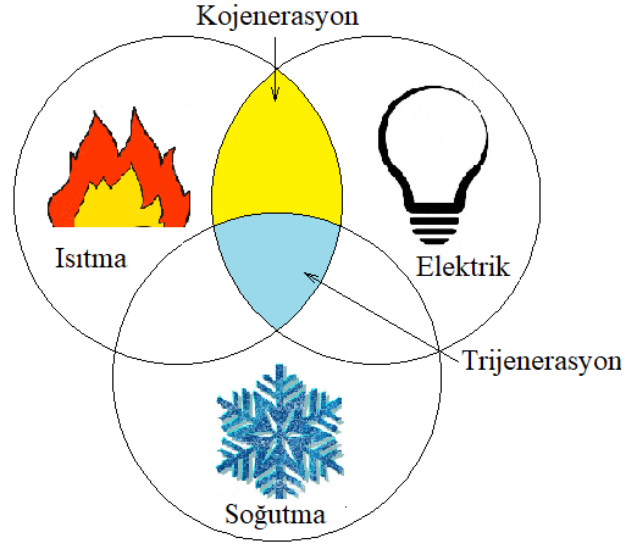
Enerji, yaşamın vazgeçilmez bir kaynağı olup, insanoğlunun en temel ihtiyaçlarından biridir, gerek yaşamın çevrede gerekse küresel çapta önemli değişikliklere sebep olan faktörlerin başında gelmektedir. Enerji tüketiminin gelişmişlik seviyesiyle paralel olması nedeniyle ekonomiyi doğrudan etkilemektedir [1]. Enerjiye olan gereksinimin önemli bir payını elektrik ve ısı oluşturmaktadır. Elektrik enerjisi genellikle ulusal şebekeden karşılanırken, ısı enerjisi ise büyük oranda fosil kaynaklı yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu şekilde elde edilen enerji hem pahalı olmakta hem de iletimi sırasında kayıplar meydana gelmektedir. Bu nedenlerden dolayı son yıllarda enerjinin tasarrufu, çevresel etkileri ve ekonomik performansları üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve ülkeler gelecek politikalarını enerji üzerine temellendirerek alternatif arayışlara yönelmişlerdir. Gelişmekte olan ülkeler kategorisinde yer alan Türkiye'nin enerjiye olan ihtiyacı yıldan yıla artış gösterirken [2] elektrik enerjisi üretimi için kaynakların önemli bir kısmını ithal etmektedir. Bu nedenle yeterli enerji kaynaklarının bulunmadığı ülkemizde enerji tasarrufu ve etkin kullanım politikalarının hayata geçirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji, yakıt hücreleri gibi alternatif kaynaklardan ziyade özellikle kullanılan yakıttaki kimyasal enerjiden büyük oranlarda yararlanarak enerji üretimi ve tasarrufu sağlayan birleşik ısı ve güç teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Birleşik ısı ve güç teknolojileri tek bir kaynaktan aynı anda birden fazla enerji çeşidinin üretilmesine denilmektedir. Bu teknoloji grupları kojenerasyon, trijenerasyon, polijenerasyon şeklinde farklı amaçlara hizmet edebilecek niteliklere sahiptir.

Elektrik üretiminin ayrı olarak üretildiği konvansiyonel sistemlerde verim %20-60 arasında olmasından dolayı, başlangıçta kullanılan enerjinin %40-80'i ısı enerjisi formunda işlevsiz olarak dışarıya atılmaktadır. Atık ısı miktarını azaltma amacıyla yapılan verimlilik araştırmalarıyla termodinamik olarak %100 verimliliğe ulaşmanın mümkün olmayacağı ancak sistemin veriminin artırılacağı bilinmektedir. Atık ısının kullanılmasıyla sistem verimliliği önemli ölçüde artmaktadır. Bir kirlilik olarak bu atık ısıyı değerlendiren sistemlere "Birleşik Isı ve güç" veya "Kombine Isı ve güç" sistemleri denilmektedir. Kullanılmayan atık ısının tekrardan kullanımını %90'a ulaşabilen enerji verimliliği getirmekte hem ekonomik hem de çevresel olarak önemli avantajları sunmaktadır. Buna rağmen birleşik ısı ve güç sistemlerinin dünya genelinde uygulamalarının hala yetersiz olduğu görülmektedir [3]. Bu çalışmada elektrik ve ısı enerjisine ihtiyacı sürekli ve fazla olduğu, bir hastanenin elektrik ve ısı tüketimleri dikkate alınarak, birleşik ısı ve güç teknoloji türü olan kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin uygulanabilirliği ve ekonomik analizi incelendi. Enerji tüketiminin yoğun olduğu kompleks yapıların başında gelen hastaneler için enerjinin üretimi, tüketimi, yönetimi, verimi, ekonomik değeri, çevreye etkisi gibi konular enerji tasarrufu açısından büyük önem arz etmekte ve bu konuların analiz edilip geçerli yaklaşımlar çerçevesinde planlanması gerekmektedir. Bu açıdan hastanenin ısı ve gücün yoğun kullanıldığı yer olması nedeniyle hem ısı hem de elektrik ihtiyacının tek aşamada üretilmesi prensibine dayanan ve yüksek verim elde edilen birleşik ısı ve güç sistemleri uygulanarak enerji sorununun çözülmesi düşünülmektedir.

Kojenerasyon (CHP), tek bir enerji kaynağından ısı ve elektrik/mekanik enerjinin aynı sistem içerisinde aynı anda üretilip kullanılabilmesidir. Kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar, yenilenebilir bazı kaynaklar ve nükleer yakıtlar kojenerasyon sisteminde enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu sistemlerde elektrik üretimi esasında ortaya çıkan atık ısı geri kazanılarak, alan ısıtma, su ısıtma, endüstriyel işlemlerde kullanılacak ısı şeklinde değerlendirilerek enerji verimliliğinde

önemli kazançlar elde edilebilmektedir[4]. Elektrik ve ısının birlikte üretilbildiği kojenerasyon sistemi bu iki enerji çeşidinin birbirinden bağımsız bir şekilde üretilmesinden daha verimli ve ekonomik sonuçlar sağlamaktadır. Konvansiyonel (sadece elektrik üreten) basit çevrimde %30-40 verime karşın, fazla ısı olarak dışarıya atılan ısının büyük bir kısmı değerlendirilerek kullanılabilir hale getirilmesiyle %70-90 oranında verimlik kojenerasyon sistemleriyle mümkün hale gelebilmektedir [5].

Trijenerasyon (CCHP) Şekil 1'de gösterildiği gibi aynı anda ısı ve elektrik gücünün üretildiği kojenerasyondan farklı olarak soğutma da üreten sistemlerdir. Isı geri kazanım ünitesinde egzoz ısı şeklinde dışarıya verilecek atık ısı uygun bir soğutma sistemi sayesinde kullanılarak soğutma gücü elde edilmekte ve başlangıçtaki yakıtın büyük bir kısmı kullanılabilir enerjiye dönüştürülmektedir. Trijenerasyon sistemleri, kojenerasyon sistemlerine göre toplam verim, çevresel duyarlılık ve ekonomik anlamda daha avantajlı olabilmektedir.



Şekil 1. Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemi (Cogeneration and trigeneration system)

Literatürde birleşik ısı ve güç (trijenerasyon ve kojenerasyon) sistemlerinin hastanelere uygulanması ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda sağlık binalarında kullanılan enerjinin maliyetinin azaltılması, veriminin artırılması için yüksek ekonomik verimliliğe sahip ve atık ısı miktarını en aza indiren trijenerasyon ve kojenerasyon uygulamaları büyük tesisler için en iyi alternatif çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışmalarda birleşik ısı güç sistemleriyle ilgili enerji ve ekserji analizleri, sistem optimizasyonu, performans artırma çalışmaları, CHP-CCHP sistemlerinin iyileştirilmesi ve analizi için kullanılan yöntemler incelenmiş, bu sistemlerin ekonomik, enerji ve çevresel anlamda yararlı olduğu görülmüştür. Literatürde birleşik ısı güç sistemlerinde yakıt olarak ağırlıklı doğalgaz yakıtı kullanıldığı, çevresel anlamda ise kullanılan yakıt çeşidinden bağımsız olarak trijenerasyon sistemlerinin geleneksel sistemlerden daha çevreci olduğu, motor tipi açısından ise hastaneler için gaz yakıtlı motorların gaz türbinli motorlara göre daha avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmalara örnek olarak Calise vd. [6] Güney İtalya'da bulunan 600 yataklı F. Muilli hastanesine kurulu olan trijenerasyon sisteminin enerji ve ekonomik verimini TRNSYS 17 yazılımı ile incelemiş ve sistemin optimal çalışma stratejisini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak bu sistem ile hastanenin ısı ihtiyacının sadece %41'lik

kısımının karşılandığını, ayrıca %9 gibi düşük bir birincil enerji tasarrufuna rağmen sistemin geri ödeme süresinin 1,5 yıl ve karlılık endeksinin 3,88 bularak önerilen yaklaşımın ekonomik olduğunu kanıtlamışlardır. Zihher ve Poredos [7] Slovenya'da bulunan bir hastanenin trijenerasyon sistemini ekonomik olarak incelemiş ve çalışmada elektrik tüketiminin maksimum şekilde karşılanması göz önünde bulundurularak ana taşıyıcıyı 4,2 MW gücünde gaz türbini olarak seçmişlerdir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda bu güçteki hastaneler için trijenerasyon sisteminin daha uygun olacağı ve sisteme eklenecek olan absorpsiyonlu ve sıkıştırılmalı soğutma ünitesinin başlangıçta maliyetli olmasına karşın uzun vadede daha karlı olacağını belirtmişlerdir.

Calise vd. [8] İtalya'daki 147 yataklı bir hastaneye daha verimli ve ekonomik olması için CCHP sistem performansını arttırmak amacıyla dinamik ortamda modellenen ve TLT, MPTLT, ELT olmak üzere 3 farklı işletim stratejisini incelemişler ve çalışmada ELT yönteminin daha ekonomik ve verimli olacağını ifade etmişlerdir. Ayrıca en çevreci yaklaşımın %24'lük PES oranıyla TLT olacağını; her üç yaklaşımında orta büyüklükteki bir hastaneye maliyet, enerji ve çevresel olarak katkı sağlayacağını belirtmişlerdir. Santo [9] Brezilyanın güneydoğu bölgesinde 403 yataklı bir hastaneye kurulacak olan gaz motorlu trijenerasyon sisteminin performansını Fortran yazılımı kullanarak ITS simülasyonu ile araştırmıştır. Çalışmada trijenerasyon sisteminin yıllık ortalama %39,05'lik ekserji verimi, %26,6'lık PES ve %69,3'lük EUF değerleriyle elektrik üretimi yapan santralden daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Ulusam vd. [10] enerji tüketiminin yoğun olduğu sağlık binalarında enerji uygulamalarını ve tüketimlerini araştırdılar. Yaptıkları 176 adet literatür taramasında ağırlıklı olarak bu hizmet tesislerinin enerji politikalarında bazı alternatiflere gidilmesi gerektiği ve bu alternatifler arasında ise özellikle 500 ve üzeri yatak sayısına sahip binalarda yüksek ekonomik verimliliğe sahip ve atık ısı miktarını en aza indirmeye çalışan trijenerasyon ve kojenerasyon uygulamalarının ön planda olduğunu saptamışlardır.

Suszanowicz ve Ratuszny [11] Polonyanın güney batısındaki 68.200 m<sup>2</sup> alana kurulu 680 yataklı hastanenin enerji verimliliğini arttırmayı inceleyerek hastanenin enerji verimliliğini iyileştirmek için 4 farklı yöntemle ısı ve elektriksel verimliliği belirlemişlerdir. Hastanenin ısı, elektrik ve soğutma güçlerini karşılamada gaz motorlu trijenerasyon, ısı pompası ve fotovoltaik uygulamaların enerji maliyetlerini yaklaşık %31 azalttığını bulmuşlardır. Carvalho vd. [12] hastanelerde enerji ihtiyaçlarını minimum ekonomiyle karşılamak için trijenerasyon sisteminin mevcut olan elektrik şebekesi ile çalışabilirliğini araştırmışlardır. Değişken enerji talebinin olduğu hastane binalarında kurulacak olan trijenerasyon uygulamalarının elektrik şebekesiyle paralel çalıştırılmasının daha uygun olabileceğini saptadılar. Araştırmada teknik ve ekonomik duyarlılık değerleri %15-%5 arasındaki varyantlara cevap verebilecek nitelikte olduğundan sistemin avantajlı olacağını belirtmişlerdir. Carvalho vd. [13] hastanelere trijenerasyon sisteminin tasarlanmasında sistemin ekonomik maliyetini ve çevreye etkilerini araştırmışlardır. CCHP sistemlerinin çevreci olmasının maliyette artış yaratacağını ve bu sistemlerin analizinde ekonomik ve çevresel çıktılarını kapsayan optimal yaklaşımların önemli olduğunu bulmuşlardır. Kavvadias ve Maroulis [14] trijenerasyon sistemlerinin tasarımında bağlı olduğu enerji, maliyet, çevresel, fiziksel yapı ve kapasite gibi değişkenleri incelemişlerdir. Bu bağlamda 300 yataklı bir hastaneye genetik algoritma yaklaşımıyla tasarladıkları araştırmada doğalgaz ile çalışan içten yanmalı motor tahrikli CHP ve CCHP sistemlerinin geleneksel rakiplerine göre ekonomik, çevresel ve enerji verimliliği kullarlarında daha başarılı olabileceğini belirtmişlerdir. Teke vd. [15] Adana'da yer alan orta büyüklükteki bir üniversite hastanesi için kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin tasarımını incelemişlerdir. Tasarımda tesisin enerji ihtiyaçlarına göre belirlenen yeni bir yaklaşım önererek

kurulması planlanan kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin gelecek için avantajlı olabileceğini; %19,52'lik enerji tasarrufu ve 1,94 yıl geri ödeme süresiyle Adana iklim şartlarındaki bölge hastanelerine trijenerasyon sistemlerinin daha uygun olacağını ifade etmişlerdir. Lozano vd. [16] İspanya'nın Zaragoza şehrinde bulunan 500 yataklı bir hastaneye uygulanacak trijenerasyon sisteminde karma tamsayı doğrusal programlama yöntemiyle farklı yaklaşımlar denemişlerdir. Bu stratejilerin tümünde enerji verimliliği, geleneksel uygulamalara göre %90'lık maliyet azalması ve 3 yıldan daha az geri ödeme süreleri gözlemlenmiştir. Ayrıca bölgede bu büyüklükteki hastanelere gaz motorlu taşıyıcının daha uygun ve CCHP'nin CHP'den daha avantajlı olabileceğini belirtmişlerdir. Valente vd. [17] trijenerasyon sistemlerinin yaşam döngüsü olan LCA metodunu incelemişlerdir. Hedef ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorumlama olmak üzere toplam 4 temel aşamadan oluşan LCA yöntemi ile ilgili 18 farklı çalışmayı inceleyerek bu çalışmaların %83'ünün Akdeniz bölgesinde yoğunlaştığı, dolayısıyla CCHP sistemlerinin yaşam döngüsünde coğrafi konumun etkisi olduğunu, %77'sinin soğutma ihtiyacının olduğu bölgelerde absorpsiyonlu soğutucu olması gerektiğini ve %61'lik kısmının ise doğalgaz ile çalıştırıldığını bulmuşlardır. Pagliarini vd. [18] İtalya'nın kuzeyindeki 714 yataklı Parma hastanesine TRNSYS yazılımıyla desteklenen CCHP sisteminin entegrasyonunun fizibilite çalışmasını araştırmışlardır. Çalışmada doğalgaz ile çalışan pistonlu motor tahrikli CHP ünitesinin elektrikli soğutucuya nazaran tek kademeli absorpsiyonlu soğutucu eklenmesinin daha avantajlı olabileceğini belirtmişlerdir. CHP sistemine soğutucu eklentisiyle oluşan CCHP uygulamalarının gerek PES değerleri gerekse 15 aylık geri ödeme süresiyle gelecekte daha olumlu olacağı açıklamışlardır.

Murugan ve Horak [19] son yıllarda enerji tüketimini azaltarak verimi arttırma ve çevresel kirliliği azaltma yöntemleri olan birleşik ısı, güç ve soğutma sistemlerinin boyutları ile ilgili çalışmışlardır. Bu sistemleri boyutsal olarak küçültmek genel verimliliği arttırmak ve bu anlamda konut uygulamaları için gelecekte daha küçük ölçekteki yapılara entegre edilmesinin enerji, çevre ve ekonomik olarak yarar sağlayacağı ve daha popüler olacağını ifade etmişlerdir. Zhu vd. [20] gittikçe karmaşık bir hale gelen CCHP sistemlerinin planlanmasında optimal yaklaşımların önemi nedeni ile tesislere uygulanması planlanan sistemin boyutlandırılması ve planlanmasının optimal değerlerinin belirlenmesi üzerine çalıştılar. Çalışmalarında Çin'deki bir hastaneye planlanan CCHP sisteminin stokastik seçim ve genetik algoritma yaklaşımlarını kıyaslayarak her iki yaklaşımın da avantajlı olduğunu ancak stokastik yaklaşımın daha kolay ve güvenilir olacağını gözlemişlerdir.

Cho vd. [21] trijenerasyon sistemlerinin enerji-ekserji analizleri, sistem optimizasyonu, performans arttırma yöntemleri ilgili çalışma yaptılar. Tesislere uygulanabilecek trijenerasyon sistemleri ilgili geniş bir literatür taraması yaparak CCHP sistemlerinin geleneksel sistemlere göre ekonomik, enerji tasarrufu ve çevresel anlamda daha avantajlı olabileceğini saptamışlardır. Genel işletme maliyetlerini, sera gazları salınımını ve birincil enerji kullanımını azaltan optimizasyon çalışmalarıyla sistemin veriminde ve kullanılabilirliğinde iyileşme sağlanacağı da ifade etmişlerdir. Silveria vd. [22] Brezilyada bulunan 400 odalı bir hastanenin enerji ihtiyacının giderilmesinde içten yanmalı motor tahrikli kojenerasyon sistemiyle karşılanmasını inceledikleri çalışmada atık ısı kazanımı için 4 farklı yaklaşımı ekonomik ve enerji olarak incelemişlerdir. Ekolojik anlamda tüm alternatiflerin, enerji olarak ise çift kademeli absorpsiyonlu CCHP sisteminin daha avantajlı olabileceğini belirtmişlerdir. Muccillo vd. [23] bir hastanenin enerji giderleri doğrultusunda tesis, CHP sistemi ve kullanıcı üçlüsü baz alarak tahminsel termo-ekonomik yaklaşımla özel bir yöntemi araştırmışlardır. Çalışmada enerji tasarrufunun %4,2-%17,2; basit geri ödeme süresinin 2,9-8,5 yıl aralıklarında olabileceğini

bulmuşlardır. İtalya'nın Napoli şehrindeki söz konusu hastane içten yanmalı birden fazla gaz motor tahrikli CHP sistemiyle geri ödeme süresinin 3,5 yıl ve %17'nin üstünde enerji tasarrufu olabileceği gözlemlenmiştir. Gimelli vd. [24] Napoli'deki 250 yataklı bir hastanenin enerji ihtiyaçları baz alarak CHP sisteminin enerji tasarrufunun %19'lara kadar çıkabilmesi optimal çözüm için özel bir yaklaşımın tahmine dayalı olması gerektiğini belirtmişlerdir. Sistemin geleceği için PES ve SPH değerlerinin beraber düşünülmesi gerektiğinin altı çizilerek önerilen senaryo yaklaşık %20'lik PES, 4 yıllık SPH ve güvenilirlik-esneklik bakımından 3 gaz motorlu tahrik gücünün oldukça avantajlı olacağını ifade etmişlerdir. Dündar [25] Erzurum'da bulunan 400 yataklı bir hastaneye ait verileri kullanarak yapılacak aynı ölçekteki farklı bir hastaneye trijenerasyon sistemlerinin yapılabiliğini araştırmıştır. Çalışmasında dinamik geri ödeme süresini 2,97 yıl olarak bularak, sistemin iki motor tahrikli, motor çalışma yükünün %60'ın altına inilmesi, soğuk geceler-yaz ve geçiş mevsimlerinde çalıştırılmaması, şebekeyle paralel olması ve bölge şartlarına göre geçiş aylarda atık ısının sıcak su üretimi için kullanılması gerekliliğini belirtmiştir. Kısakesen [26] Kahramanmaraş'ta bulunan 550 yataklı bir hastanenin enerji taleplerinin karşılanmasında kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin yapılabiliğini karşılaştırmıştır. Çalışmasında her iki uygulamanın da yararlı olabileceğini 3,1 yıllık geri ödeme süresiyle trijenerasyon sisteminin 2,78 yıllık geri ödeme süresiyle kojenerasyon sisteminden uzun vadede daha avantajlı olabileceği ve sistemlerin iki motorlu tasarlanmasının yararlı olacağını belirtmiştir. Atılğan ve Türkmen [27] hastaneler, oteller ve okullar gibi değişken hava şartlarına ihtiyaç duyulan yapılarda hem soğutma hem de ısıtma yapabilen değişken soğutucu akışkan debili sistemler için termo-ekonomik analiz yaparak, sistemdeki entropi değişimlerini ve ekserji kayıplarını hesaplamışlardır. Isıtma ve soğutma alanında yaygın bir şekilde kullanılmakta olan bu sistemleri enerji tasarrufu açısından inceleyerek, bu sistemler için termo-ekonomik analiz ve maliyet hesabı yapmışlardır.

Renedo vd. [28] İspanya'da bulunan 1.000'den fazla yataklı bir hastaneye uygulanacak olan CHP sisteminin ana taşıyıcısının gaz türbinli ve dizel gaz motorlu seçeneklerini kıyaslamışlardır. Araştırmada sürekli ve güvenli elektriksel ihtiyacın olduğu hastanelerde bu teknolojilerin yararlı olabileceğini ve dizel motorlu sistem elektriksel veriminin yüksek olmasından dolayı daha verimli olacağını bulmuşlardır. Ayrıca sıcak iklim şartlarında CHP sistemine soğutucu ilavesiyle CCHP uygulamalarının da yararlı olabileceğinin düşünülmesi gerekliliğini vurgulamışlardır. Goza [29] İstanbul'da 109 yataklı bir hastaneye trijenerasyon sistemi yapılabiliğini incelediği çalışmasında ana taşıyıcı seçiminde motorun türbin sistemlerine göre daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Tahrik motoru kapasitesi olarak 600 kW, 800 kW ve 1.2 kW olmak üzere 3 alternatifini değerlendirerek 2 yıllık geri ödeme süresiyle 800 kW'lık motorun daha avantajlı olacağını bulmuştur. Sistem yapımı esnasında ek giderlerin az olmasının etkili olduğunu ve devlet desteğinin burada önemli bir rol oynayacağını ifade etmiştir. Benelmr ve Feitd [30] kojenerasyon sistemlerinin başarısında sadece geri ödeme süresinin değil yatırım maliyeti ve yönetim stratejisinin de önemli olduğunu belirtmişlerdir. Termo-ekonomik açıdan yaptıkları incelemede Fransa'daki kojenerasyon sistemi uygulanan birçok hastane, kâğıt fabrikası ve sanayi tesisinin yanlılardan ötürü kojenerasyon uygulamalarının başarısız olduğunu belirtmişlerdir. Bu sistemlerin değerlendirilmesinde sadece geri ödeme süresinin değil yatırım maliyeti ve yönetim stratejisinin de rol oynadığını açıklamışlardır. Bu çalışmada enerji ihtiyacı fazla ve sürekli olan bir hastanenin elektrik ve ısı tüketimlerini karşılamak için birleşik ısı ve güç teknoloji türü olan kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin uygulanabilirliği ve ekonomik analizi incelendi. Enerji tüketiminin yoğun olduğu kompleks yapıların başında gelen hastane için enerjinin üretimi, yönetimi, ekonomik değeri ve çevreye etkisi analiz edilerek,

sistemlerin çalışma planlaması yapıldı. Hastanede ısı ve gücün yoğun kullanılması nedeniyle hem de elektrik ihtiyacının tek aşamada üretilmesi prensibine dayanan ve yüksek verim elde edilen birleşik ısı ve güç sistemleri uygulanarak enerji sorununun çözülmesi, enerjiden ve maliyetten tasarruf edilmesi amaçlandı. Literatürde sağlık binalarında enerji maliyetinin azaltılması, veriminin artırılması ve atık ısı miktarını en aza indiren trijenerasyon ve kojenerasyon uygulamalarının en iyi alternatif çözüm olarak ortaya koyan ve bu sistemlerin ekonomik, enerjik ve çevresel anlamda yararlı olduğunu gösteren birçok çalışma bulunmaktadır. Dolayısı ile enerji tasarrufu açısından bu denli önemli bir sistemin enerji tüketimi yüksek olan hastane gibi büyük yapılarda mutlaka kullanılması gerekmektedir. Kars bölgesi için birleşik ısı güç sistemlerinin enerji ve ekonomik analizleri, sistem optimizasyonu, bu sistemlerin ekonomik, enerjik ve çevresel anlamda etkilerinin incelenmesi ile ilgili daha önce yapılmış bir çalışma bulunmadığından, bu çalışmanın bölge için yapılacak diğer çalışmalara örnek teşkil etmesi ve bölgenin bu konudaki bilgi birikiminin literatüre kazandırılması açısından önemli görülmektedir.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Bu çalışmada Kars ilinde bulunan 276 yataklı Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesinin enerji ihtiyacının karşılanması için kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin maliyet ve enerji açısından uygulanabilirliğinin analizi yapılmış, her iki sistem karşılaştırılarak hangi sistemin daha uygun olabileceği araştırılmıştır. Hastanenin enerji ihtiyaçları belirlenirken 2019 yılına ait aylık kullanılan elektrik ve ısıtma için doğalgaz tüketimleri göz önünde bulundurulmuştur.

### 2.1. Hastanenin Elektrik İhtiyacı (Hospital Electricity Requirement)

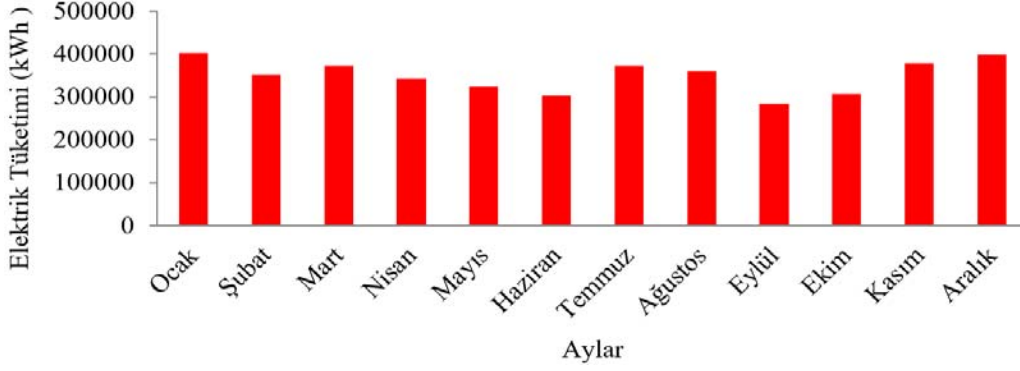
Hastanenin elektrik gereksinimi; aydınlanma, tıbbi cihazlar, her türlü elektrik-elektronik makineler, ısıtma, soğutma vb. uygulamaların toplam tüketiminden oluşmaktadır. Hastanenin 2019 yılına ait aylara göre elektrik tüketim değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Hastaneye ait aylık veriler incelendiğinde soğuk aylarda (kasım, aralık, ocak, şubat, mart) ve sıcak aylarda (temmuz, ağustos) elektrik tüketiminin diğer aylara göre (bahar ayları) daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum kışın doğalgaz kullanımına ek olarak klima sistemlerinin ısıtma modunda çalışması ve yazın ise klima sistemlerinin soğutma modunda çalışmasından kaynaklanmaktadır.

### 2.2. Hastanenin Isı İhtiyacı (Hospital Heat Requirement)

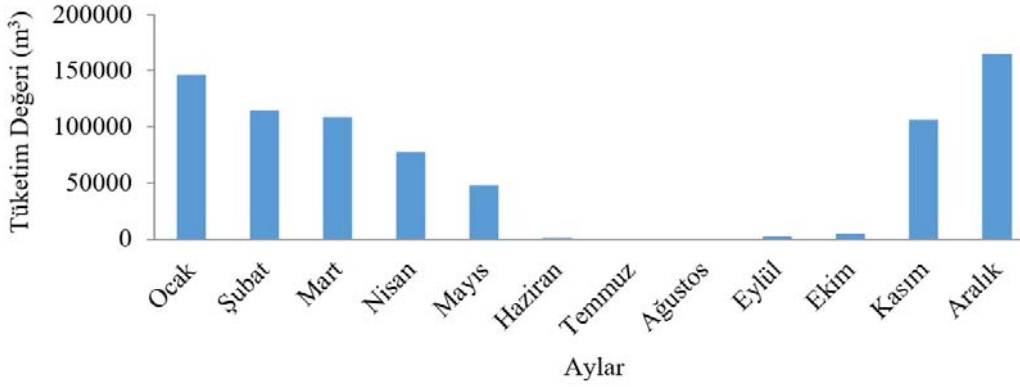
Hastanenin ısı talebi merkezi ısı santrali tarafından karşılanarak alan ısıtma, kullanım sıcak suyu vb. uygulamalar için kullanılmaktadır. Hastanenin ısı enerji ihtiyacının karşılanması için tüketilen doğalgazın 2019 yılına ait aylara göre tüketim değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Hastaneye ait aylık veriler incelendiğinde hastanenin ortalama 6-7 ay doğalgazı yoğun bir şekilde kullandığı görülmektedir. Bunun nedeni tamamen iklimsel özelliklerle ilgili olup yaz aylarında ise kullanım sıcak suyu ve bazı yaz gecelerinin soğuk olmasından dolayı doğalgaz tüketimi sıfır olmamakla beraber gaz kullanım miktarı önemli ölçüde azalmaktadır.

### 2.3. Birleşik Isı ve Güç Teknolojisi Sistem Seçimi (Combined Heat and Power Technology System Selection)

Birleşik ısı ve güç sistemleri, toplam verimlilik, maliyet ve enerji talepleri göz önünde bulundurularak seçilmektedir. Bu sistemler için yapılan yatırımlar maliyet açısından büyük yatırımlar olduğu için sistem kurulmadan önce detaylı bir şekilde yapılabiliği ve uygulanabilirliği araştırılmaktadır. Bir birleşik ısı ve güç sistemi uygulaması; güç, elektrik/ısı oranı ve toplam verim gibi parametreler ile ifade edilmektedir [5].



Şekil 2. Hastanenin 2019 yılına ait aylara göre elektrik tüketim değerleri  
(Electricity consumption values of the hospital according to the months of 2019)



Şekil 3. Hastanenin 2019 yılına ait aylara göre doğalgaz tüketim değerleri  
(Natural gas consumption values of the hospital according to the months of 2019)

### 2.3.1. Güç kaynağı seçimi (Power source selection)

Hastaneye ait tüketimler elektrik ve ısı (Şekil 2 ve Şekil 3) incelendiğinde elektrik tüketiminin ısı tüketimine göre daha kararlı olduğu görülmektedir, bu neden ile sistemin tasarımı öncelikle elektriksel üretimi karşılayabilecek şekilde planlanmıştır. Hastanenin ısı ve elektrik ihtiyacını karşılamak için gaz motorlu kojenerasyon/trijenerasyon sistemlerinin gücü elektriksel talep ön planda tutularak planlandığı için elektriksel tüketimin en fazla olduğu Ocak ayına göre 402.447 kWh/ay güç belirlenmesi yapılmıştır. Hastanelerde 7/24 saat sürekli bir şekilde elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Ancak kullanılan bu elektrik gün içerisinde saatlere göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar incelendiğinde elektrik tüketiminin sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru arttığı ve öğleden sonra ise azaldığı görülmektedir [26]. Hastanede elektriğin en çok harcandığı ocak ayı için saatlik ortalama tüketim değeri 541 kWh olarak bulunmuştur. Literatürdeki çalışmalar, hastanenin yatak sayısı, büyüklüğü, enerji ihtiyacı gibi değişkenler dikkate alınarak minimum saatlik tüketim değeri 297 kWh ve maksimum tüketim 791 kWh olarak hesaplanmıştır [25, 26]. Buna göre 400 kWh elektriksel çıkış gücüne sahip 2 adet gaz motorlu kojenerasyon veya trijenerasyon sistemi seçilmiştir. Tasarlanan kojenerasyon sistemi Şekil 4 ve trijenerasyon sistemi Şekil 5'de gösterilmiştir.

### 2.3.2. Yakıt türü seçimi (Fuel type selection)

Birleşik ısı ve güç sistemleri geniş yakıt yelpazesine sahip olmasına rağmen çevreci ve temiz olması, nakil kolaylığı gibi nedenlerden dolayı ağırlıklı olarak doğalgaz tercih edilmektedir. Karsta doğal gaz hattı bulunduğu için sistemin ana taşıyıcısı olarak öngörülen gaz

motorlu sistem yakıtının doğalgaz olarak planlanması avantajlı olmaktadır. Bu nedenle sistem için doğalgaz ile çalışan 2 adet 400 kWh gücünde gaz motoru seçilmiştir. Tek bir büyük motor yerine iki adet küçük motor seçilmesinin sebebi herhangi bir arıza durumunda enerji üretiminin bir motor ile devam etmesi ve hastanenin değişken yük talebine karşılık motor veriminin düşecek olmasıdır. Sistem için seçilen gaz motoruna ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

### 2.3.3. Isıtma kapasitesinin belirlenmesi (Determination of heating capacity)

Sistemin ısıtma gücü, sistemde bulunan iki kaynaktan elde edilecek ısıların toplamından oluşmaktadır. Bunlar Şekil 6'da gösterilen egzoz gazından çekilen ısı ve Şekil 7'de gösterilen motorun ceket suyunun soğutulmasıyla elde edilen ısıdır.

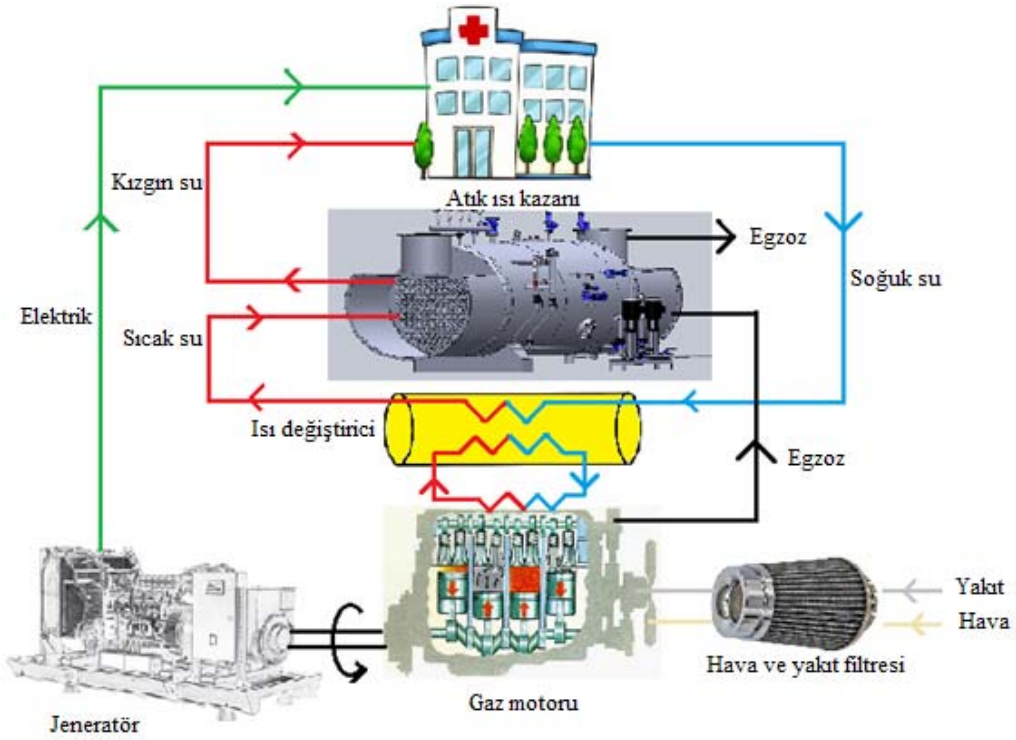
Her iki kaynaktan kazanılan ısı enerjisinin toplamı sistemin ısı gücünü oluşturmaktadır, sistemin toplam ısı gücü Eş. 1 ile ifade edilmektedir.

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_C + \dot{Q}_E \quad (1)$$

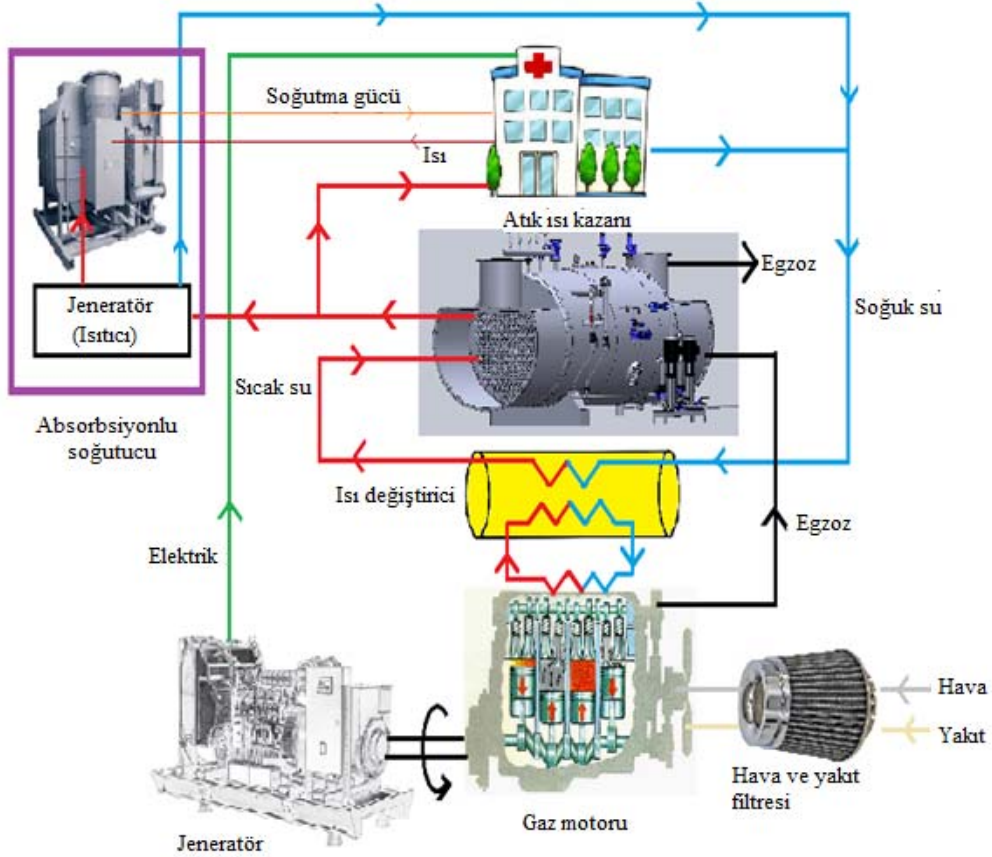
Sistem kurulduğunda 2 adet özdeş motor olacağından her bir motordan kazanılan ısılar  $\dot{Q}_{ceket,1}$  ve  $\dot{Q}_{ceket,2}$  toplanarak ceket suyu ısı  $\dot{Q}_C$  değeri bulunur, Eş. 2-6.

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{ceket,1} + \dot{Q}_{ceket,2} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{ceket,1} = \dot{m}_{ceket\ suyu,1} \times c_{ceket\ suyu,1} \times \Delta T_{ceket\ suyu,1} \quad (3)$$



Şekil 4. Tasarlanan kojenerasyon sisteminin şeması (Diagram of the designed cogeneration system)



Şekil 5. Tasarlanan trijenerasyon sisteminin şeması (Diagram of the designed trigeneration system)

**Tablo 1.** MWM TCG 2016 V8C model gaz motorunun özellikler [31] (Features of MWM TCG 2016 V8C model gas engine)

Özellikler	Birim	Değeri
Elektrik çıkış gücü	kW	400
Egzoz debisi	kg/h	2.186
Egzoz sıcaklığı	°C	457
Ceket suyu ısısı	kW ± %8	205
Egzoz ısısı	kW ± %8	226
Yakıt tüketimi	kW ± %5	945
Elektrik verimi	%	42,3
Isı verimi	%	48,3
Toplam verimi	%	90,6
Ceket suyu akış miktarı	m <sup>3</sup> /h	24
Ceket suyu giriş sıcaklığı	°C	84
Ceket suyu çıkış sıcaklığı	°C	92

$$\dot{Q}_{ceket,1} = 186,81 \text{ kW} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_C = 186,81 + 186,81 \quad (5)$$

$$\dot{Q}_C = 373,62 \text{ kW} \quad (6)$$

Egzoz gazının eşanjörü terk etme sıcaklığı 135°C kabul edilerek ve motorun katalog verileri kullanılarak egzozdan kazanılan ısı  $\dot{Q}_E$  Eş. 7-8 ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_E = (\dot{m}_{egzoz,1} + \dot{m}_{egzoz,2}) \times c_{egzoz,ort} \times \Delta T_{egzoz} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_E = 454,235 \text{ kW} \quad (8)$$

Buna göre ceket suyu ve egzoz gazından kazanılan ısıl gücün toplamı 828 kW olmaktadır. Bulunan 828 kW'lık ısı kapasitesi sistemde bulunan her iki motorun çalıştırılmasıyla elde edilebilecek olan yaklaşık güç değeridir. Dolayısıyla her bir motorun gücü Eş. 9 ile gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{tek\ motor,ısı} = \dot{Q}_I / 2 = 828 \text{ kW} / 2 = 414 \text{ kW'lık} \quad (9)$$

#### 2.4. Sistemin Enerji Analizi (Energy Analysis of the System)

Sistemin enerji analizi için Eş. 10 ile gösterilen termodinamiğin birinci yasası gereğince enerjinin korunumu ilkesi dikkate alınır [5].

$$Q - W = \Delta E \quad (10)$$

Yukarıdaki denkleme açık sistemlerde kütle girişi ve çıkışı ile gerçekleşen enerji akışı eklenirse denklem Eş. 11 ile ifade edilir [5].

$$Q - W + \sum E_g - \sum E_c = \Delta E_{KH}(kJ) \quad (11)$$

Yapılacak enerji analizlerinde verim Eş. 12 ile gösterildiği gibi elde edilmek istenen değerlerin harcanan değere oranlanmasıyla bulunmuştur [5].

$$Verim = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} \quad (12)$$

Sistemin elektriksel verimi Eş. 13 ile gösterildiği gibi, sistemden elde edilen elektrik enerjisinin bu enerjiyi üretebilmek için kullanılan yakıtın enerjisine oranıdır [5].

$$\eta_e = \frac{\dot{Q}_{El}}{H} \quad (13)$$

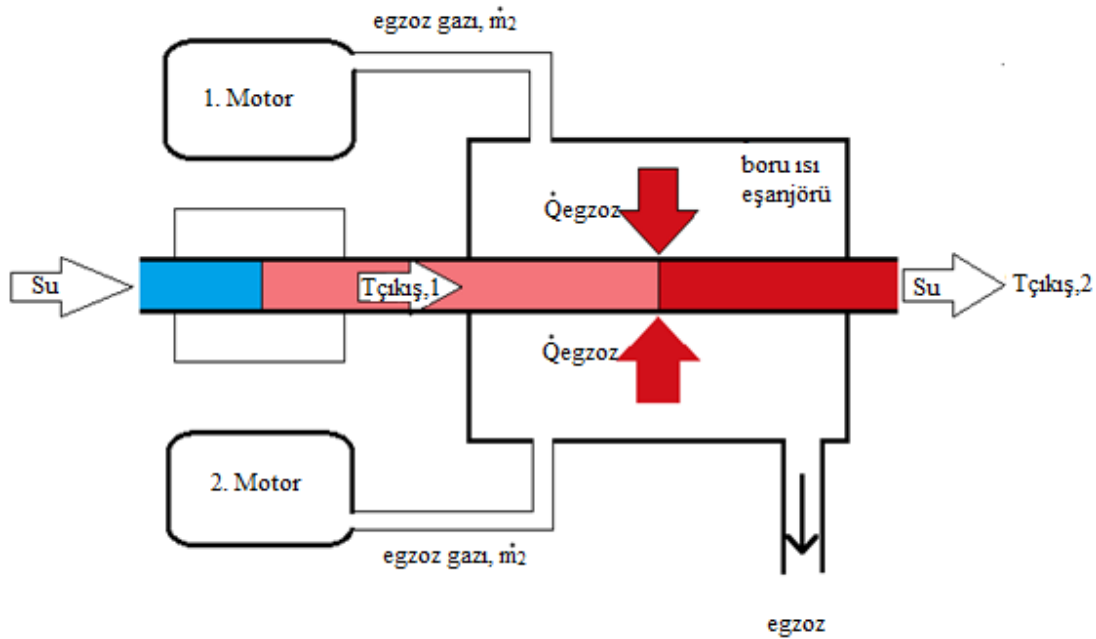
Sistemin ısı verimi, sistemden elde edilen ısıl enerjinin bu enerjiyi üretebilmek için kullanılan yakıtın enerjisi ile bulunur, Eş. 14.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_I}{H} \quad (14)$$

Sistemin toplam verimi veya enerjiden yararlanma oranı, elde edilen ısı ve elektriksel enerjinin bu enerjileri üretebilmek için kullanılan yakıtın enerjisine bölünmesiyle Eş. 15 ile bulunur [5].

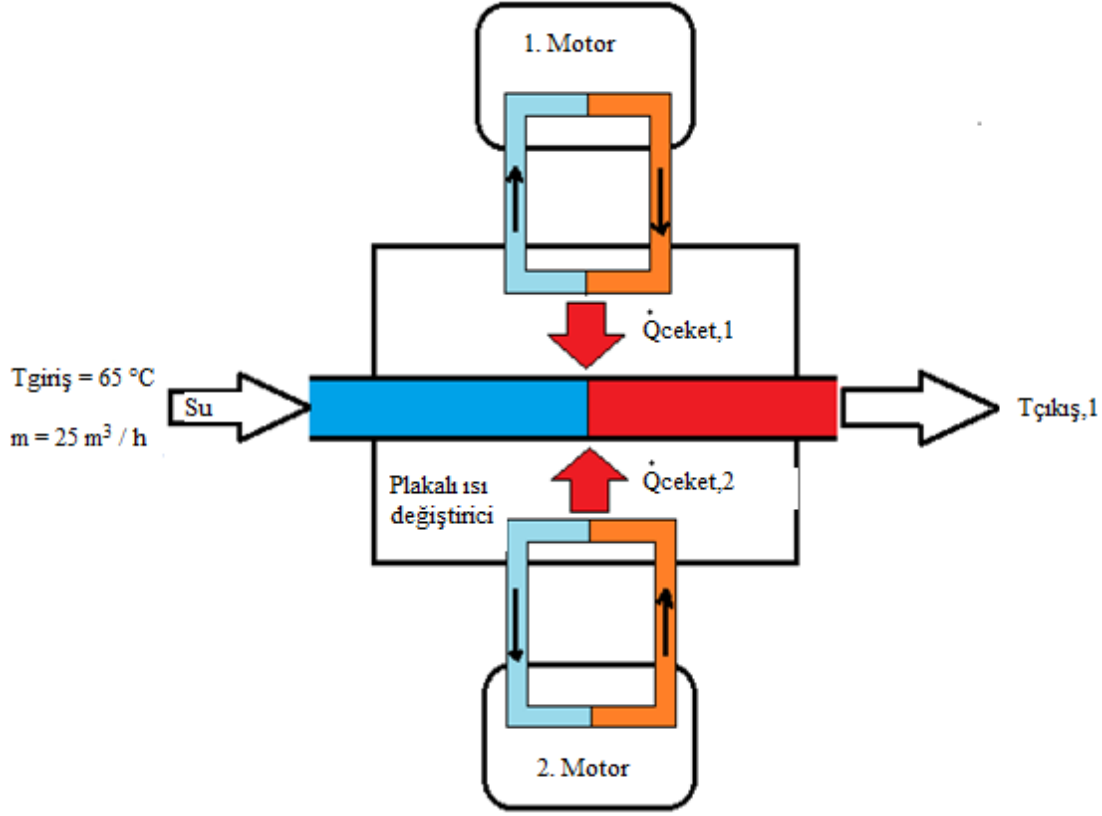
$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_{El} + \dot{Q}_I}{H} \quad (15)$$

Sistemin net enerji verimi bir önceki Eş. 15'e kojenerasyon/trijenerasyon uygulamasının çalışması esnasında iç tüketim enerjisinin dâhil edilmesiyle Eş. 16 ile hesaplanır [5].



**Şekil 6.** Borulu eşanjörde egzozdan kazanılan ısı şeması (Diagram of heat recovered from exhaust in tube heat exchanger)





Şekil 7. Motorlardan kazanılan ceket ısı şeması (Diagram of jacket heat gained from engines)

$$\eta_{net} = \frac{\dot{Q}_{El} + \dot{Q}_I}{H + W_e} \quad (16)$$

Birleşik ısı ve güç üretim yapan tesislerde kullanılan yakıttaki enerji ile elektriğin ve ısıya ayrı ayrı üretildiği konvansiyonel sistemlerdeki harcanan enerji arasındaki fark, enerji tasarrufunu başka bir ifadeyle birincil enerji tasarrufunu verir. Bu hesaplamayı yapabilmek için ayrı (konvansiyonel) sistemlerin tüketicinin elektrik ve ısı ihtiyaçlarını karşılamasında ne miktar enerji tüketeceğini belirten referans değer kavramı kullanılır. Elektrik için referans etkinlik 0,5; ısı için referans etkinlik değeri 0,9 olarak alınırsa birincil enerji tasarrufu Eş.17-20 ile hesaplanır [5].

$$PES = H_{ref} - H \quad (17)$$

$$H_{ref} = H_{e,ref} + H_{th,ref} \quad (18)$$

$$H_{e,ref} = \frac{Q_{El}}{\eta_{e,ref}} \quad (19)$$

$$H_{th,ref} = \frac{Q_I}{\eta_{th,ref}} \quad (20)$$

Çevresel etki genellikle yakıtın emisyon değerleriyle ilgilidir. Birleşik ısı ve güç sistemlerinde atık ısı kullanımı emisyon değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Birincil enerji tasarrufu hesabına benzer şekilde emisyon değerlerinde referans değerler kullanılarak konvansiyonel sistemlere göre emisyon farkı belirlenir. Referans yakıt emisyon faktörü  $\gamma_F$ , 0,251 değeri alınarak RCES emisyon tasarrufu Eş. 21 ile hesaplanır [5].

$$RCES = 1 + \frac{(\gamma_{th} \times Q - \gamma_F \times H)}{\gamma_e \times W} \quad (21)$$

## 2.5. Sistemin Ekonomik Analizi (Economic Analysis of the System)

Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin herhangi bir işletmeye uygun olup olmamasının analiz edilmesinde ekonomik değerler ön plana çıkmaktadır. Bu yüzden detaylı bir şekilde sistemin ekonomik incelemesi yapılmalıdır. Yapılan bu incelemeler sonucunda rakip sistemlere göre fayda/zarar kıyaslamasıyla sistemin yapılabilirliğine karar verilmektedir. Kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamalarının ekonomik olarak değerlendirilmesinde genellikle statik ve dinamik değerlendirme yöntemleri kullanılır. Statik yöntemlerde para bugünkü değeriyle hesaba katılırken dinamik yöntemlerde ise maliyetin zaman değeri dikkate alınarak geri ödeme süreleri bulunur. Hastane ve benzeri uygulamalarda dinamik yöntemlerin kullanımı yaygındır [5].

Bu çalışmada sistemin amortisman değeri, statik ve dinamik geri ödeme süreleri bulunarak kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamaları karşılaştırılmıştır. Amortisman fiyatı kurulacak kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin kullanılabilir ömürlerine yatırım maliyetlerinin pay edilmesiyle hesaplanır. Bir yıllık süre zarfında toplam kurulum maliyetinin ne kadarının giderileceğini belirten yıllık amortisman bedelinde tesisin yaşam döngüsündeki tüm yılların aynı amortisman sağlanmasıyla yapılan hesaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Amortisman fiyatı Eş. 22 ile hesaplanır.

$$C_K = I \left[ \frac{f(1+f)^n}{(1+f)^n - 1} \right] \quad (22)$$

Geri ödeme süresi, sistemin eski uygulamaya kıyasla yıllık kazandıracığı kar bedelinin yatırım maliyetini geride bıraktığı süredir. Tüketicie net para kazancı zamana göre farklılaşmıyorsa veya paranın bugünkü değeri önemsenmiyorsa geri ödeme süresi statik metotla yapılmaktadır. Statik geri ödeme süresi Eş. 23 ile hesaplanır [5].

$$t_s = \frac{G_y}{G_i} \quad (23)$$

Dinamik geri ödeme süresinde ise paranın zaman bağımlı olarak değişimi göz önünde bulundurularak net para girdisinin yatırım maliyetini karşıladığı süredir. Dinamik geri ödeme süresi Eş. 24 ile hesaplanır [25].

$$t_g = \frac{\ln\left(\frac{G_i}{G_i - G_y \times f}\right)}{\ln(1+f)} \quad (24)$$

Sistemlerin ekonomik analizi için aylık net kazanç, sistemden önce aylık enerji maliyeti, sistemden sonra aylık enerji maliyeti sırası ile Eş. 25-27 ile verilmiştir.

$$\text{Aylık net kazanç} = \left( \begin{array}{c} \text{sistemden önce} \\ \text{aylık enerji maliyeti} \end{array} - \begin{array}{c} \text{sistemden sonra} \\ \text{aylık enerji maliyeti} \end{array} \right) \quad (25)$$

$$\begin{array}{c} \text{Sistemden önce} \\ \text{aylık enerji} \\ \text{maliyeti} \end{array} = \left( \begin{array}{c} \text{aylık elektrik} \\ \text{maliyeti} \end{array} + \begin{array}{c} \text{aylık ısıtma} \\ \text{maliyeti} \end{array} \right) \quad (26)$$

$$\begin{array}{c} \text{Sistemden sonra} \\ \text{aylık enerji} \\ \text{maliyeti} \end{array} = \left( \begin{array}{c} \text{elektrik} \\ \text{üretim} \\ \text{için harcanan} \\ \text{doğalgaz} \\ \text{maliyeti} \end{array} + \begin{array}{c} \text{sistem} \\ \text{tarafından} \\ \text{karşılanamayan} \\ \text{ısıtma} \\ \text{maliyeti} \end{array} + \begin{array}{c} \text{bakım ve} \\ \text{işletme} \\ \text{maliyeti} \end{array} \right) \quad (27)$$

Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin enerji ve ekonomik analizleri sonucunda elde edilen, üretilen elektrik enerjisi, üretilen ısı enerjisi, şebekeden çekilen elektrik, şebekeden çekilen ısı ve net kar değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

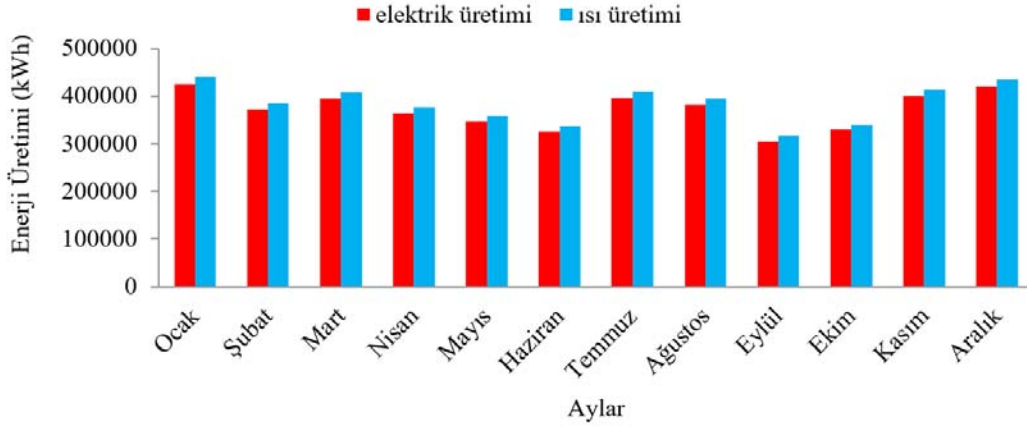
Bu çalışmada bir Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi'nin enerji gereksiniminin birleşik ısı ve güç sistemleri ile karşılamak için enerji ve ekonomik analizi yapıldı. İncelenen hastane toplam 276 yataklı ve 51.962 m<sup>2</sup> alana sahiptir. Hastane için sistem seçimi yıllık enerji ihtiyaçları dikkate alınarak belirlendi. Bu belirlemede, ısı enerji ihtiyacının iklimsel özelliklerden dolayı düzensiz olması, elektrik tüketiminin daha kararlı seyretmesi ve elektrik fiyatlarının daha pahalı olması gerekçesiyle planlanan sistemlerin elektrik tüketimine göre yapılması uygun görüldü. Buna göre her iki sistemde de hastanenin elektrik tüketiminin tamamının üretilmesi, bu üretim sonunda açığa çıkan ısı enerjisi ile de ısı ihtiyacın karşılanması ve karşılanamayan miktarın ise şebekeden alınacak şekilde planlaması yapıldı. Elektrik enerjisi elektriğin en fazla harcandığı ocak ayındaki ortalama ihtiyaca göre hastanede gün içindeki dalgalanmalar da dikkate alınarak 800

kW olarak hesaplandı. Motorların düşük yükte verimlerinin düşmesi, tek bir motorun arızası durumunda tüm sistemi devre dışı bırakması gibi dezavantajlar dikkate alınarak her biri 400 kW gücünde iki adet doğalgaz ile çalışan gaz motoru seçildi. Kojenerasyon sistemine ait yapılan enerji analizlerinde sistemin elektriksel, ısı, toplam ve net verimleri bulunmuştur. Birincil enerji tüketiminde sağlanan tasarruf ile emisyon değerlerinde azalma sonucunda CO<sub>2</sub> emisyonu %39 oranında düşmüştür. Analizlerde sistemin iç tüketiminden dolayı yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı 4.459.422 kWh ve ısı ihtiyacı ise 7.442.551 kWh olarak hesaplanmıştır. Sistemin tahrik gücünü oluşturan 1. motorun yıllık toplam 7.300 saat 2. motorun ise toplamda 3.849 saat çalışarak toplamda 4.459.422 kWh elektrik enerjisi, 4.615.505 kWh ısı enerji üretmesi planlanmıştır. Bu değerlere göre elektriğin tamamı sistem tarafından karşılanarak ısı enerjinin ise 4.546.638 kWh karşılanamayıp şebekeden alınacaktır. Buna göre sistemin hastanenin elektrik enerjisini karşılama oranı %100; ısı enerjisi karşılama oranı ise %39 olmaktadır. Hastanenin enerji ihtiyacının ise toplamda %62'si sistem tarafından karşılanacaktır. Aylara göre kojenerasyon sistemi tarafından üretilen enerji miktarları Şekil 8'de ve bu enerjilerin hastanenin ihtiyacını karşılama oranları ise Şekil 9'da verilmiştir.

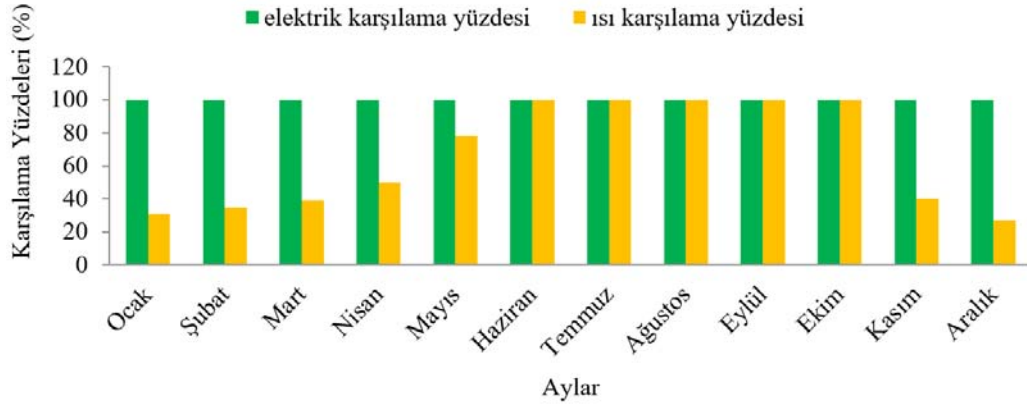
Trijenerasyon sistemi analizlerinde ise iç tüketimden dolayı ve haziran-ekim aylarında elektrikle çalışan chiller soğutma gruplarının tüketimleri toplam ihtiyaçtan çıkartılarak hastanenin yıllık net elektrik ihtiyacı 4.362.769 kWh olarak ve ısı ihtiyacı ise aynı değerde 7.442.551 kWh olarak bulunmuştur. Hastanenin soğuma ihtiyacı haziran-ekim aylarında olup toplamda 96.650 kWh'tir. Trijenerasyon sisteminde 1. motorun yıllık toplam 7.300 saat 2. motorun ise toplamda 3.607 saat çalışarak toplamda 4.362.769 kWh elektrik enerjisi, 2.895.913 kWh ısı enerji ve 1.294.861 kWh soğutma gücü üretilebileceği hesaplanmıştır. Üretilen ısı gücü hastanenin ısı ihtiyacına göre alınmış olup fazlalık enerjinin tamamının soğutma gücü üretimi için harcanacağı kabul edilmiştir. Elektrik ve soğutma gücü talebinin tamamı sistem tarafından karşılanmakta olup ısı enerjinin ise 4.546.638 kWh kadarı sistem tarafından karşılanmayıp şebekeden çekilecektir. Bu değerlere göre hastanenin elektrik ve soğutma gereksiniminin %100'ü, ısı ihtiyacın ise %39'u trijenerasyon sistemi ile karşılanacaktır. Hastanenin enerji ihtiyacının ise toplamda %62'si sistem tarafından karşılanacaktır. Hava sıcaklığının yüksek olduğu aylarda ise meydana gelen enerji fazlalığının tamamı soğutma gücüne harcandığı varsayılırsa 1.198.211 kWh soğutma gücü fazlalığı oluşacaktır. Aylara göre trijenerasyon sistemi tarafından üretilen enerji miktarları Şekil 10'da ve bu enerjilerin hastanenin enerji ihtiyaçlarını karşılama oranı Şekil 11'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Sistemlerin analizlerinden elde edilen değerler (Values obtained from analysis of systems)

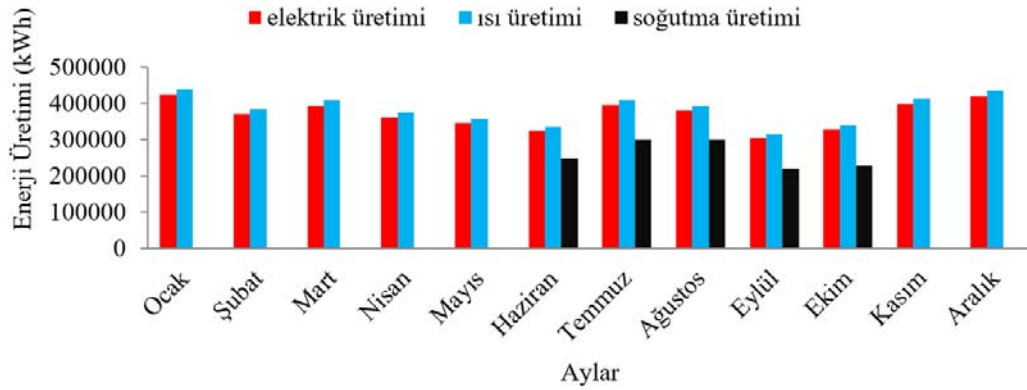
Aylar	Üretilen elektrik enerjisi (kWh)		Üretilen ısı enerjisi (kWh)		Şebekeden çekilen elektrik en. (kWh)		Şebekeden çekilen ısı enerjisi (kWh)		Elde edilen net kar (TL)	
	CHP	CCHP	CHP	CCHP	CHP	CCHP	CHP	CCHP	CHP	CCHP
Ocak	424.767	424.767	439.634	439.634	0	0	966.222	966.222	196.643	196.643
Şubat	372.372	372.372	385.405	385.405	0	0	712.909	712.909	170.803	170.803
Mart	395.050	395.050	408.877	408.877	0	0	635.301	635.301	178.714	178.714
Nisan	363.777	363.777	376.509	376.509	0	0	370.226	370.226	161.770	161.770
Mayıs	346.352	346.352	358.474	358.474	0	0	100.628	100.628	149.958	149.958
Haziran	325.328	310.328	336.715	8.219	0	0	0	0	73.647	74.147
Temmuz	395.696	364.696	409.546	1.563	0	0	0	0	98.460	106.214
Ağustos	381.214	357.964	394.557	1.688	0	0	0	0	92.719	96.855
Eylül	305.621	290.621	316.318	23.563	0	0	0	0	68.822	69.323
Ekim	329.217	316.814	340.740	43.251	0	0	0	0	80.198	79.270
Kasım	399.471	399.471	413.453	413.453	0	0	610.625	610.625	183.304	183.304
Aralık	420.557	420.557	435.277	435.277	0	0	1.150.727	1.150.727	194.104	194.104
Toplam	4.459.422	4.362.769	4.615.505	2.895.913	0	0	4.546.638	4.546.638	1.649.142	1.661.105



Şekil 8. Kojenerasyon sistemiyle üretilen enerji miktarları (The amount of energy produced by the cogeneration system)



Şekil 9. Kojenerasyon sistemiyle hastanenin elektrik ve ısı enerji ihtiyaçlarını karşılama yüzdeleri (The percentages of meeting the electricity and heat energy needs of the hospital with the cogeneration system)



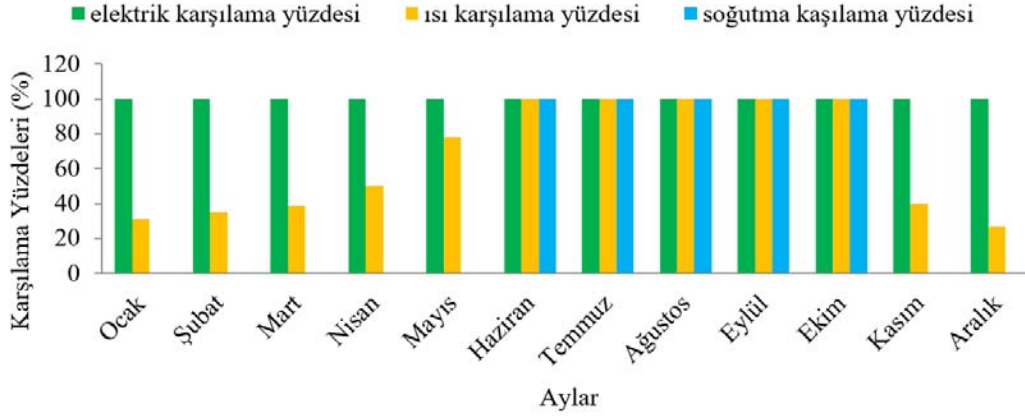
Şekil 10. Trijenerasyon sistemiyle üretilen enerji miktarları (The amount of energy produced by the trigeneration system)

Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin seçiminde belirleyici faktörlerin başında ekonomik değerler gelmektedir. Bu çalışmada kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamalarının ekonomik analizi için aylık net kazanç değerleri bulunarak yıllık amortisman değeri, statik ve dinamik geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Sistemlerin kurulumundan sonra ödenecek giderler, motorların doğalgaz tüketimleri, karşılanamayan ısı ihtiyacı için doğalgaz harcamaları ve tesislerin üretim esnasındaki bakım ve işletme maliyetleri göz önünde bulundurularak kojenerasyon sisteminden elde edilebilecek olan yıllık net kazanç 1.649.142 TL olarak hesaplanmıştır. Trijenerasyon sisteminde ise yıllık gider 3.443.077 TL olup yıllık net

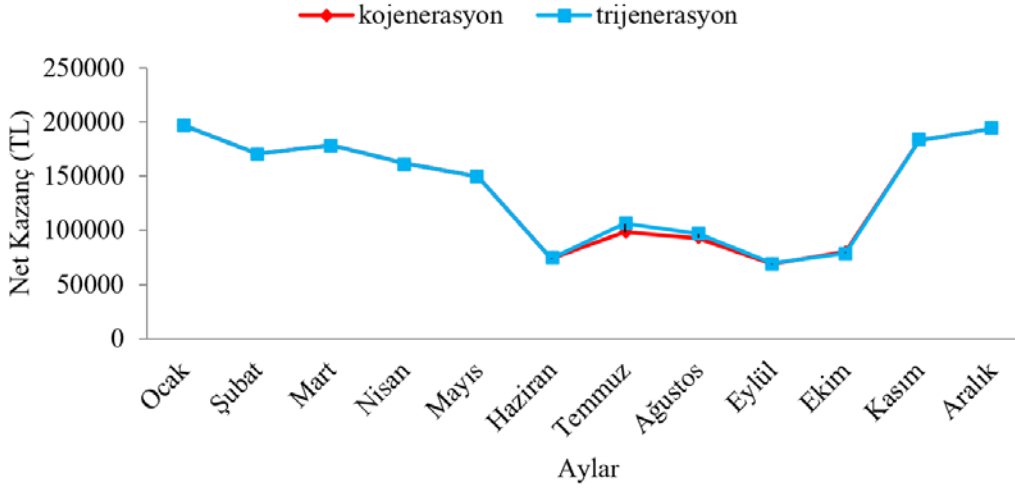
kazanç 1.661.105 TL'dir. Hastane için trijenerasyon sistemi yıllık 11.963 TL gibi az farkla kojenerasyondan net kazanç olarak üstün çıkmıştır. Sistemlerin aylık net kazançları Şekil 12'de gösterilmiştir.

Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerine ait net kazançlar absorpsiyonlu soğutucunun devreye girdiği haziran, temmuz, ağustos, eylül ve ekim aylarında farklı olarak ortaya çıkmıştır. Bu aylarda bir sistemin diğerinden olan kazanç farkı Şekil 13'de gösterilmiştir.

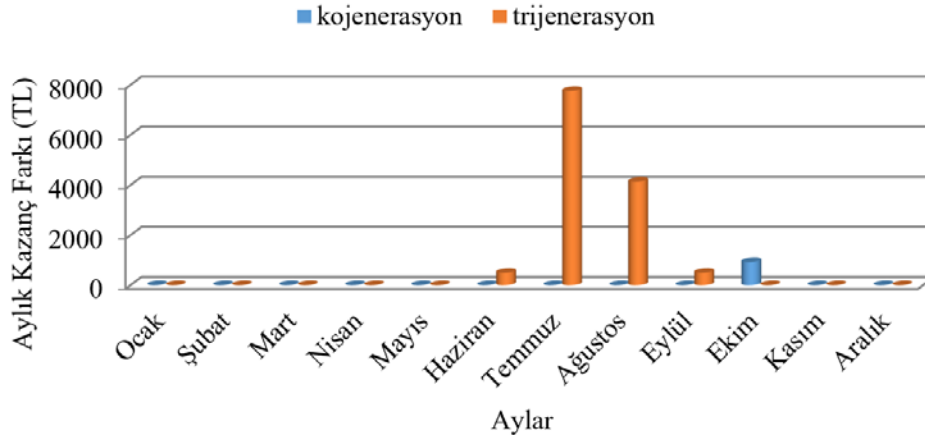
Sistemlerin ekonomik olarak incelenmesinde yaygın kullanılan yıllık amortisman bedeli, dinamik ve statik geri ödeme süreleri



Şekil 11. Trijenerasyon sistemiyle hastanenin elektrik, ısı ve soğutma enerji ihtiyaçlarını karşılama yüzdeleri (The percentage of meeting the hospital's electricity, heat and cooling energy needs with the trigeneration system)



Şekil 12. Sistemlerle elde edilen aylık net kazançlar (Monthly net earnings by the systems)



Şekil 13. Aylara göre net kazanç farkı (Net earnings difference by month)

hesaplanarak kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri karşılaştırılmıştır. Kojenerasyon teknolojisinin hastaneye uygulanmasıyla yaklaşık olarak yıllık amortisman 429.921 TL; statik geri ödeme süresi 2,41 yıl; dinamik geri ödeme süresi ise 2,85 yıl olarak bulunmuştur. Trijenerasyon sisteminde ise yıllık amortisman 558.823 TL; statik geri ödeme süresi 3,13 yıl; dinamik geri ödeme süresi ise 3,86 yıl olarak bulunmuştur. Yapılan kaynak taramasında

dinamik geri ödeme süresinin 1,35-5,86 yıl arasında değişiklik gösterebileceği görülmüştür [15]. Yukarıdaki sonuçlara ve literatür bilgilerine göre bu hastane için hem kojenerasyon hem de trijenerasyon uygulamasının avantajlı olacağı tespit edilmiştir. Her iki sistemde de hastanenin enerji ihtiyacının toplam %62'sinin karşılandığı hesaplanmıştır. Sistem olarak doğalgazlı motor ile elektriğin büyük bir kısmını karşılayan çalışmalarda da [32] toplam

karşılama oranının bu civarlarda olduğu; şebekeyle paralel çalıştırılan çalışmalarda veya farklı tahrikli taşıyıcı sistemlerde ise ısı ve elektrik ihtiyacı ortak düşünülüp üretilen fazla elektrik şebekeye satılabileceği için toplam enerji karşılama yüzdesi daha yüksek oranlarda olabilmektedir.

Çalışma konusu olan hastaneye hangi sistemin daha uygun olacağı hususunda ise gerek yıllık amortisman bedeli, gerekse geri ödeme süreleri yönünden kojenerasyon sistemi daha avantajlı ve ekonomik olacaktır. Trijenerasyon sistemleri kojenerasyon sistemlerine göre yıllık toplamda 11.963 TL daha fazla kazanç sağlamıştır, ancak tesislerin kurulumunda trijenerasyon sistemine ödenecek ek 1.219.050 TL yatırım maliyeti bu kazancı gölgeleyecek büyüklüktedir.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi'nin enerji gereksiniminin birleşik ısı ve güç sistemleri ile karşılanması için enerji ve ekonomik analizi yapıldı. Hastanenin yıllık enerji ihtiyacı dikkate alınarak kojenerasyon ve trijenerasyon sistemi belirlendi. Sistem seçimi yapılırken her iki sistemde de hastanenin elektrik tüketiminin tamamının üretilmesi, bu üretim sonunda açığa çıkan ısı enerjisi ile ısı ihtiyacın karşılanması ve karşılanamayan miktarın ise şebekeden alınması şeklinde tasarlanan çalışmada özet olarak aşağıdaki sonuçlar elde edildi.

- Birleşik ısı ve güç sistem kullanımı sonucu hastanenin birincil enerji tüketiminden sağlanan tasarruf ile emisyon değerleri azalarak CO<sub>2</sub> emisyonu %39 oranında düşeceği gözlemlendi.
- Kojenerasyon sisteminin hastaneye uygulanmasıyla yıllık amortisman 429.921 TL; statik geri ödeme süresi 2,41 yıl; dinamik geri ödeme süresi ise 2,85 yıl olarak bulundu.
- Trijenerasyon sisteminde yıllık amortisman 558.823 TL; statik geri ödeme süresi 3,13 yıl; dinamik geri ödeme süresi ise 3,86 yıl olarak bulundu.
- Kojenerasyon sisteminden elde edilebilecek olan yıllık net kazanç 1.649.142 TL ve trijenerasyon sisteminde ise yıllık net kazanç 1.661.105 TL olarak hesaplandı.
- Trijenerasyon sistemleri ile kojenerasyon sistemlerine göre toplamda yıllık 11.963 TL daha fazla kazanç sağlanacağı saptandı.
- Her iki sistemde de hastanenin enerji ihtiyacının toplam %62'sinin karşılandığı hesaplandı.
- Yukarıdaki sonuçlara göre bu hastane için hem kojenerasyon hem de trijenerasyon uygulamasının avantajlı olacağı tespit edildi.
- Ancak tesislerin kurulumunda trijenerasyon sistemine ödenecek ek 1.219.050 TL yatırım maliyeti bu kazancı gölgeleyeceği saptandı.

İncelenen hastane için, yıllık amortisman bedeli ve geri ödeme süresi dikkate alındığında trijenerasyon sistemlerine göre kojenerasyon sistemlerinin daha avantajlı ve ekonomik olduğu bulundu. Isı ve elektrik üretimine ek olarak soğutma sağlayan trijenerasyon sistemlerinin Kars iklim şartlarındaki bir hastane için, soğutma ihtiyacının az olması, trijenerasyon teknolojilerinin kojenerasyon teknolojilerine göre ilk yatırım maliyetinin daha fazla olması, trijenerasyon sistemlerinin geri dönüş süresinin uzunluğu gibi sebepler nedeniyle uygun olmadığına karar verildi.

#### 5. Simgeler (Symbols)

Q	: Isı (kJ)
W	: İş (kJ)
ΔE	: Enerji değişimi (kJ)
Q̇	: Isıl güç (kW)
ṁ	: Kütleli debi (kg/s)
c	: Özgül ısı (kJ/kg.K)

T	: Sıcaklık (°C/K)
ΔT	: Sıcaklık değişimi (°C veya K)
Q̇ <sub>El</sub>	: Elektriksel güç (kW)
Q̇ <sub>I</sub>	: Isıtma gücü (kW)
Q̇ <sub>C</sub>	: Ceket ısı (kW)
Q̇ <sub>E</sub>	: Egzoz gazından kazanılan ısı güç (kW)
H	: Verim (%)
H	: Yakıtla verilen enerji (kW)
H <sub>ref</sub>	: Referans tesislerde üretimle harcanan yakıt enerjisi (kW)
W <sub>t</sub>	: İş tüketim enerjisi (kW)
C <sub>K</sub>	: Yıllık amortisman bedeli (TL/yıl)
t <sub>s</sub>	: Statik geri ödeme süresi (yıl)
t <sub>g</sub>	: Dinamik geri ödeme süresi (yıl)
G <sub>i</sub>	: Yıllık net kazanç (TL)
G <sub>y</sub>	: İlk yatırım maliyeti (TL)
I	: İlk yatırım değeri (TL)
f	: Yıllık faiz oranı (%)
n	: Kullanım ömrü (yıl)
γ <sub>F</sub>	: Referans yakıt için CO <sub>2</sub> emisyonu (kg.CO <sub>2</sub> /kW)

#### 5.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

CHP	: Kombine Isı ve güç (Kojenerasyon)
CCHP	: Kombine Soğutma Isı ve güç (Trijenerasyon)
EIO	: Elektrik ısı oranı
ELT	: Elektriksel yük izleme modu
ITS	: Entegre termal sistem
MPTLT	: Maksimum güç termal yük izleme modu
PES	: Birincil enerji tasarrufu
RCES	: Emisyon tasarruf oranı
SPH	: Basit geri ödeme süresi
TLT	: Termal yük izleme modu

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar bu çalışmada Kafkas Üniversitesi Yapı İşleri Teknik Daire Başkanlığı personeline ve Kafkas Üniversitesi Sağlık Araştırma ve Uygulama Hastanesi teknik personeline destekleri için teşekkür ederler.

#### Kaynaklar (References)

1. Çetin B., Özen E., Thermodynamic analysis of the coal-fired power plants under various load conditions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (1), 1-12, 2021.
2. Çetin B., Avcı H., Technical and economic analysis of the conversion on an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 1027-1045, 2020.
3. Breeze, P., Combined heat and power, Chapter 1, Academic Press, London, United Kingdom, 2017.
4. Dincer, I. and M.A. Rosen, Exergy analysis of heating, refrigerating and air conditioning: methods and applications, Chapter 5, Academic Press, 2015.
5. Öztürk, H., Kaya, H., Kojenerasyon ve trijenerasyon tekniği, Umutepe Yayınları, Kocaeli, Türkiye, 2010.
6. Calise, F., Cappiello F.L., d'Accadia, M.D., Libertini, L., Vicidomini, M., Dynamic simulation and thermoeconomic analysis of a trigeneration system in a hospital application. Energies, 13 (14), 3558, 2020.
7. Zihir, D., A. Poredos, Economics of a trigeneration system in a hospital, Applied Thermal Engineering, 26 (7), 680-687, 2006.
8. Calise, F., d'Accadia, M.D., Libertini, L., Quiriti, E., Vicidomini, M., A novel tool for thermoeconomic analysis and optimization of trigeneration systems: A case study for a hospital building in Italy, 126, 64-87, 2017.
9. do Espirito Santo, D.B., An energy and exergy analysis of a high-efficiency engine trigeneration system for a hospital: A case study

- methodology based on annual energy demand profiles, *Energy and Buildings*, 76, 185-198, 2014.
10. Ulusam, S., Koç, A., Energy applications and studies for healthcare facilities-a systematic literature review. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26 (4), 2020.
  11. Suszanowicz, D., Ratuszny, P., Energy efficiency improvement in hospital buildings, based on the example of a selected type of hospital facility in Poland, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019.
  12. Carvalho, M., Lozano, M.A., Ramos, J., Serra, L.M., Synthesis of trigeneration systems: Sensitivity analyses and resilience, *The Scientific World Journal*, 2013.
  13. Carvalho, M., Lozano, M.A., Serra, L.M., Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects, *Applied Energy*, 91 (1), 245-254, 2012.
  14. Kavvadias, K., Maroulis, Z., Multi-objective optimization of a trigeneration plant, *Energy Policy*, 38 (2), 945-954, 2010.
  15. Teke, A., Zor, K., Timur, O., A simple methodology for capacity sizing of cogeneration and trigeneration plants in hospitals: A case study for a university hospital, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7 (5), 053102, 2015.
  16. Lozano, M.A., Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings. *Energy and Buildings*, 41 (10), 1063-1075, 2009.
  17. Valente, A., Iribarren, D., J. Dufour, Life cycle assessment of trigeneration plants, *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, 125-139, 2020.
  18. Pagliarini, G., C. Corradi, S. Rainieri, Hospital CHCP system optimization assisted by TRNSYS building energy simulation tool, *Applied Thermal Engineering*, 44, 150-158, 2012.
  19. Murugan, S., Horák, B., Tri and polygeneration systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1032-1051, 2016.
  20. Zhu, C., B. Xu, Nie, Y.Z., An integrated design and operation optimal method for CCHP System, *Energy Procedia*, 158, 1360-1365, 2019.
  21. Cho, H., Smith, A.D., Mago, P., Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization, *Applied Energy*, 136, 168-185, 2014.
  22. Silveira, J. L., et al., Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 2894-2906, 2012.
  23. Muccillo, M., Gimelli, A., Sannino, R., Multi-objective optimization and sensitivity analysis of a cogeneration system for a hospital facility, *Energy procedia*, 81, 585-596, 2015.
  24. Gimelli, A., Muccillo, M., Optimization criteria for cogeneration systems: Multi-objective approach and application in an hospital facility, *Applied energy*, 104, 910-923, 2013.
  25. Ekinci, D., Erzurum kampüs hastanesine uygulanacak trijenerasyon sisteminin fizibilitesi, *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*, 2013.
  26. Kısakesen, T., KSÜ sağlık uygulama ve araştırma hastanesinin enerji ihtiyacının karşılanmasında kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin karşılaştırılması ve ekonomik analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş*, 2016.
  27. Atılğan A., Türkmen U., Comparison of exergy and thermoeconomic analysis for variable refrigerant flow (vrf) system with different refrigerants, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 343-353, 2017.
  28. Renedo, C., Ortiz, A., Manana, M., Silio, D., Perez, S., Study of different cogeneration alternatives for a Spanish hospital center, *Energy and Buildings*, 38 (5), 484-490, 2006.
  29. Goza, M., Kojenerasyon sistemleri ve uygulamalı ekonomik analizi: hastane örneği, *Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova*, 2013.
  30. Benelmir, R., Feidt, M., Energy cogeneration systems and energy management strategy. *Energy Conversion and Management*, 39 (16-18), 1791-1802, 1998.
  31. MWM Gas Engine TCG V8C, <https://www.mwm.net/en/gas-engines-gensets/gas-engine-tcg-2016/>, Erişim tarihi Haziran 25, 2021.
  32. Çeçil, Ü., Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin kullanılabilirliği ve ekonomik analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*, 2018.