



Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi International Journal of Technological Sciences

Elektronik Dergi, e-ISSN: 1309-1220

Cilt/Volume: 12 Sayı/Number: 3 Aralık/December 2020



biomedical simulation
manufacturing electrical robotics
information artificial intelligence
research ecology wind energy analysis ethics software
data architecture renewable energy machine learning computer ecology analog innovation knowledge
design From theory to practise
cad/cam digital ethics technology
human robotics smart buildings optimization analysis data human construction
mechanical electronic object optimization hardware mechatronic simulation smart materials ecology
innovation computational human digital application

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

International Journal of Technological Sciences

Sahibi / Owner
Ali Kemal YAKUT

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager
Reşat SELBAŞ

Editör / Editor in Chief
Nihat YILMAZ

Yardımcı Editörler / Vice Editors
Önder KIZILKAN
Ergün KORKMAZ

Alan Editörleri/Associate Editors
Abdullah ÖZSOY
Cengiz ÖZEL
Okan BİNGÖL
İsmail Serkan ÜNCÜ
Fatih YILMAZ

Editör Kurulu / Editorial Board
Ali Kemal YAKUT
Reşat SELBAŞ
Arzu ŞENCAN ŞAHİN
Bekir YALÇIN
Ahmet KABUL

Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Hiroshi YAMAGUCHI, Doshisha University, Japan
İbrahim DİNÇER, Ontario Tech University, Canada
Mustafa ACAROĞLU, Konya Teknik Üniversitesi, Turkey
Mustafa Reşit USAL, Süleyman Demirel Üniversitesi, Turkey
Ramazan KÖSEOĞLU, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Turkey
Refik KAYALI, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Turkey

Özlem TERZİ, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Turkey
Mustafa AY, Marmara Üniversitesi, Turkey
Şemsettin KILINÇARSLAN, Süleyman Demirel Üniversitesi, Turkey
Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE, Süleyman Demirel Üniversitesi, Turkey
Ömer Necati CORA, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Turkey
Mehmet Akif EZAN, Dokuz Eylül Üniversitesi, Turkey
Nabi İBADOV, Warsaw University of Technology, Poland

Grafik Tasarım / Graphic Design
Sinan İLKAZ

Teknik Sorumlu / Technical Manager
Serap ERGÜN
Nejat TÜKENMEZ

Mizanpaj / Make-up
Serpil ÇELİK TOKER

Dergi Adresi / Journal Address

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi Editörlüğü
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
32260, Batı Kampüsü, Isparta, Türkiye
Tel: +90 246 2111569
Fax : +90 246 2111984
E-posta/E-mail: utbd@isparta.edu.tr

*Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi tarafından yılda 3 sayı elektronik olarak yayınlanmaktadır.
International Journal of Technological Sciences is published three times a year electronically by Isparta University of Applied Sciences.*

Cilt / Volume: 12

Sayı/Number: 3

Aralık/December 2020

e - ISSN : 1309-1220



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Sayfa No

Araştırma Makalesi

- BESAM programına bir arayüz**
A graphical interface for BESAM programme..... 84-91
Tuna GÖKSU, Nihal GÖKSU, Fuat DEMİR
- Doğalgaz kullanılan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi**
Energy and exergy analysis of a trigeneration system using natural gas..... 92-100
Fatih YİĞİT, Ahmet KABUL
- Comparative analysis of the performance and exergy efficiency of absorption cooling system for different working fluids**
Farklı çalışma sıvıları için absorpsiyonlu soğutma sisteminin performansı ve ekserji verimliliğinin karşılaştırmalı analizi .. 101-107
Mehmet ALTINKAYNAK, Arzu ŞENCAN ŞAHİN

Derleme Makale

- 4 boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanlarının araştırılması**
Investigation of 4D printing technology and application areas..... 108-117
Berkay ERGENE, Bekir YALÇIN

Orijinal Makale/Research Article

BESAM programına bir arayüz

Tuna Göksu¹, Nihal Göksu², Fuat Demir²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Betonarme eleman davranışının modellenmesi
Doğrusal olmayan analiz
Sargılı beton modelleri

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 17.10.2018

Kabul Tarihi: 28.12.2020

Öz: Bu çalışmada doğrusal ötesi davranış modellemesinde yaşanan zorlukların üstesinden gelmek için TÜBİTAK 111M119 projesi kapsamında, fortran dilinde hazırlanan BESAM programına bir grafik arayüz geliştirilmiştir. Mühendisler için grafik arayüzü eksikliği, kullanıcıların zorlu ve zaman alıcı bir süreç olan belirli formatlarda metin dosyalarında kesit modellerini oluşturmaya zorlar. Bir ön-işlem, uygun yapısal modeller oluşturmaya, verileri girmeye ve kontrol etmeye, uygun analiz parametrelerini seçmeye ve uygun yükleri belirlemeye yardımcı olur. Ayrıca, grafik yetenekleri, kullanıcının kesitleri görmesine, çeşitli görsel düzenlemeler yapmasına ve analiz neticelerini grafiğe dökmesine imkân sağlar. Geliştirilen yazılım sayesinde betonarme yapı elemanlarının doğrusal ötesi davranışlarının belirlenen şekil değiştirme kriterlerine göre pratik şekilde hesaplanabilmektedir. Bu bilgiler bir dosyada toplanarak ve veri transfer özellikleri kullanılarak yaygın kullanılan analiz programlarına kolayca aktarılabilir. Yazılım betonarme kesitler için moment-eğrilik ilişkilerini hesaplayarak grafik olarak gösterebilmektedir.

Atıf için/To Cite:

Göksu T. Göksu N. Demir F. BESAM programına bir arayüz. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12(3), 84-91, 2020

A graphical interface for BESAM programme

Keywords

Modeling behavior of reinforced concrete components
Nonlinear analysis
Confined concrete models

Article history:

Received: 17.10.2018

Accepted: 28.12.2020

Abstract: In this study, a graphical interface has been developed to the BESAM program which written in fortran code prepared within the scope of TUBITAK 111M119 project in order to overcome the difficulties in the nonlinear behaviour model. The lack of a graphical interface for engineers forces users to create cross-section models in text files in certain formats, which is a challenging and time-consuming process. A pre-process helps to create appropriate structural models, to enter and control data, to select appropriate analysis parameters, and to determine appropriate loads. In addition, the graphical capabilities allow the user to view sections, make various visual adjustments, and graph the results of the analysis. Thanks to the software developed, the behaviour of reinforced concrete structural members can be computed practically according to the determined deformation criteria. This information can be gathered in a file and easily transferred to commonly used analysis programs using data transfer features. The software can graphically show the moment-curvature relationships for reinforced concrete sections.

1. Giriş

Ülkemiz dünyanın aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alır ve yüz ölçümümüzün %42'si birinci derece deprem kuşağı üzerindedir [1]. Ülkemiz sahip olduğu yapı stoğu gereği oldukça ciddi deprem tehdidi altındadır. 1997 öncesi projelendirilen ve inşa edilen binalar, bugünkü

standartlara göre birçok yetersizlikler içermektedir [2]. Deprem zararlarının en aza indirilmesi ülkemizin en önemli problemlerinden biridir. Yapılması gereken önemli önlem depremin özelliklerini çok iyi tanıyıp gerekli tedbirleri zamanında almaktır. Bu nedenle bu konuyla ilgili bilimsel gelişmelerin yakından takip edilmesi gereklidir. Yeni yapılacak, özellikle de mevcut yapıların deprem performansının

değerlendirilmesinde en gelişmiş yöntemler doğrusal ötesi statik ve dinamik analiz yöntemleridir [3]-[7]. Fakat bu yöntemler için gerekli modellerin hazırlanması oldukça büyük zorluklar içermektedir. Bu zorlukların en önemlisi yapıya ait her bir eleman için malzeme ve kesit bilgileri kullanılarak tek tek dayanım ve şekil değiştirme kapasiteleri bilgilerinin hesaplanması ve analiz programlarına aktarılmasıdır. Bir yapıyı oluşturan yüzlerce eleman için bu işlemin tekrarlanması bu metotları uygulanabilir olmaktan çıkarmaktadır [8]-[12].

Bu çalışmada doğrusal ötesi davranış modellemesinde yaşanan bu zorlukların üstesinden gelmek için TÜBİTAK 111M119 projesi kapsamında hazırlanan BESAM [13] programına bir grafik arayüz geliştirilmiştir. Bina performans belirleme işlemlerinin pratik şekilde yapılabilmesini sağlayan BESAM programına, veri girişlerini kolaylaştırmak amacıyla arayüz oluşturulmuştur. Hâlihazırda Fortran dili ile yazılmış olan BESAM programına veri girişleri elle doldurulan metin dosyaları ile yapılmaktadır. Elle veri girişi yapılması hem uzun zaman almakta hem de hatalara yol açabilmektedir. Veri girişi, geliştirilen arayüz programı vasıtasıyla hızlı ve hatasız bir şekilde yapılabilir. Arayüz programı, kolon, kiriş ve perde kesitlerinin kolaylıkla oluşturularak BESAM programına aktarılmasını sağlamıştır. Yazılım sayesinde ülkemiz yapı stoğunun çok büyük kısmını oluşturan betonarme yapı elemanlarının doğrusal ötesi davranışlarının belirlenen şekil değiştirme kriterlerine göre pratik şekilde hesaplanarak, bu bilgilerin bir dosyada toplanması ve veri transfer özellikleri kullanılarak yaygın kullanılan analiz programlarına kolayca aktarılması mümkün olmaktadır.

Geliştirilen yazılım, betonarme kesitler için moment-eğrilik ilişkilerini hesaplayarak grafik olarak gösterebilmektedir. Bu yönleri ile inşaat mühendislerine ve çeşitli düzeyde öğrencilere, betonarme kesitlerin eğilme dayanım-şekil değiştirme ilişkilerinin anlatılmasında katkı sağlayacaktır. Geliştirilen yazılım ile malzeme özellikleri, eksenel yük, etriye düzeni ve etriye sıklaştırmasının, eleman davranışını nasıl ve ne oranda etkilediği, sargısız ve sargılı beton arasındaki farklılıkları, değişik süneklik kriterleri ve beton modelleri ile görme fırsatı bulunacaktır.

2. Betonarme Elemanlarda Sargı ve Modellenmesi (BESAM) Programı

“Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” [14] in 7. Bölümünde verilen esaslar göz önüne alınarak betonarme elemanlarda beton dayanımı, donatı düzeni ve sargı etkisini dikkate almak için Fortran dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır.

Betonarme Elemanlarda Sargı ve Modellenmesi (BESAM) yazılımı yazarında dâhil olduğu TÜBİTAK projesi kapsamında geliştirilmiştir [15].

BESAM programının, hem doğrusal elastik hem de doğrusal elastik olmayan çözümlerlerde kullanıcı için sağladığı kolaylıklar kısaca aşağıda özetlenmiştir:

1-Doğrusal elastik yöntem çözümler için, BESAM programında Mander sargılı beton modeli için verilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır. Beton için oluşturulan bu sargılı model kullanılarak kiriş kesitine ait eğilme momenti kapasitesi yanında, moment-eğrilik ilişkisi ve kolon kesitine ait normal kuvvet-eğilme momenti kapasite ilişkisi elde edilebilir.

2-Taşıyıcı elemanlara ait donatı girişi kullanıcıya pratik kullanım sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Özellikle, eleman donatı yerleşiminin tanımlanması için donatı koordinatlarının programa tanımlanması zaman almakta ve hata riskini artırmaktadır. Bu nedenle programda, belli bir donatı oranına göre donatı yerleşimi seçilerek kullanıcının koordinat tanımlamasına gerek kalmayacak şekilde düzenleme yapılmıştır.

3-Doğrusal Elastik Hesap Yöntemindeki en zor ve zaman alıcı aşamalardan birisi karşılıklı etki diyagramından NK ve MK kapasite değerlerinin belirlenmesidir. Karşılıklı etki diyagramını hesap eden çok sayıda program bulunmasına rağmen, bu programlar NK ve MK değerlerini hesap etmemektedir. Bu programlar ile her bir kolon için NK ve MK değerlerinin karşılıklı etki diyagramından belirlenmesi uzun zaman alarak sıkıcı olabilmektedir. BESAM programına yapılan düzenlenmelerle istenilen sayıda kolonun verileri (SAP2000 programı ile tasarlanan yapıya ait G, Q ve E yüklemelerine ait kesit tesirleri) veri dosyasına kopyalanmakta ve kolonlara ait NK ve MK değerleri başka bir dosyada hesaplanarak kullanıcıya sunulmaktadır.

4-Doğrusal elastik olmayan çözümler için öncelikle binanın taşıyıcı sistem elemanlarına ait plastik mafsalları tanımlamalarının yapılması gerekir. BESAM programı ile elemanlara ait kesit ve malzeme özellikleri, donatı çapı ve düzeni tanımlandıktan sonra program çalıştırılarak, SAP2000 programında açılmak üzere mafsalların tanıtıldığı s2k uzantılı bir dosya hazırlanabilmektedir.

5-Doğrusal elastik olmayan yöntemde, elemanın hasar seviyesine şekil değiştirme değerinin yönetmelikte verilen sınır değerleriyle kıyaslanması sonucunda karar verilmektedir. Dolayısıyla hasarın belirlenebilmesi için sınır değerlerin bilinmesi önem arz etmektedir. Mevcut programların büyük kısmında DBYBHY (2007)'nin

verdiği sınırlamalar bulunmamaktadır veya düzenlenmesi gerekmektedir. BESAM programında bu sınırlamalar düzenlenerek plastik mafsal tanımında gerekli tüm bilgiler SAP2000 programının kullanılabileceği şekilde elde edilebilmektedir.

6-Binaya ait kapasite eğrisinin SAP 2000 programı ile elde edilmesinden sonra, binanın yer değiştirme talebinin belirlenmesi gerekir. Bunun için öncelikle kapasite eğrisinin koordinatlarının “modal yer değiştirme-modal ivme” koordinatlarına dönüştürülmesi ve modal kapasite diyagramının elde edilmesi gerekir. Tüm bu işlemler, gerekli verilerin BESAM programına tanımlanması ile DBYBHY (2007)' e uygun olarak hesaplanabilmektedir. Tepe yer değiştirme istemi sonuçları BESAM programı tarafından metin formatında kullanıcıya sunulmaktadır [16].

3. BESAM Grafik Arayüzü

3.1. Programın amacı ve kapsamı

Bu çalışmanın amacı, bina performans belirleme işlemlerinin pratik şekilde yapılabilmesini sağlayan BESAM programına, veri girişlerini kolaylaştırmak amacıyla arayüz oluşturmaktır. Hâlihazırda Fortran dili ile yazılmış olan BESAM programına veri girişleri elle doldurulan metin dosyaları ile yapılmaktadır. Elle veri girişi yapılması hem uzun zaman almakta hem de hatalara yol açabilmektedir. Veri girişi geliştirilen arayüz programı vasıtasıyla hızlı ve hatasız bir şekilde yapılabilir. Arayüz programı, kolon, kiriş ve perde kesitlerinin kolaylıkla oluşturularak BESAM programına aktarılmasını sağlamıştır.

Tasarım mühendisleri için grafik arayüzü eksikliği, kullanıcıların zorlu ve zaman alıcı bir süreç olan belirli formatlarda metin dosyalarında kesit modellerini oluşturmaya zorlar. Bir ön-işlem, uygun yapısal modeller oluşturmaya, verileri girmeye ve kontrol etmeye, uygun analiz parametrelerini seçmeye ve uygun yükleri belirlemeye yardımcı olur. Ayrıca, grafik yetenekleri, kullanıcının kesitleri görmesine, çeşitli görsel düzenlemeler yapmasına ve analiz neticelerini grafiğe dökmesine imkân sağlar.

İlerleyen bölümlerde program menüleri detaylı olarak açıklanmakla birlikte, programın kabiliyetleri kısaca şöyle özetlenebilir: Programda kolon, kiriş ve perde olmak üzere üç farklı kesit türü için kesit detayları girilerek işlemlere başlanılmaktadır. Oluşturulan her bir kesit için donatıların yerleştirilmesi, etriye kollarının düzenlenmesi işlemlerinden sonra analizler gerçekleştirilip grafiklere dökülebilmektedir.

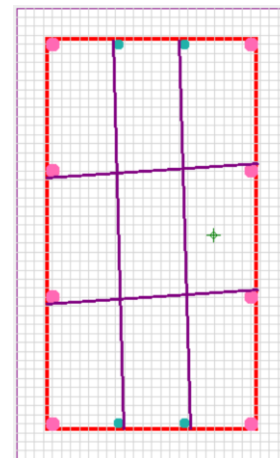
3.2. Programlama dili ve geliştirme ortamı

Programın çalışacağı hedef işletim sistemi yaygın ve kolay kullanımı sebebi ile Microsoft Windows olarak belirlenmiştir. Bu işletim sistemi için uygulama geliştirme araçlarına bakıldığında yine Microsoft firmasının ürünü olan Visual Studio geliştirme ortamının yaygın olarak kullanılması ve işletim sisteminin doğal geliştirme ortamı olması tercih edilme sebebi olmuştur. Programlama dili olarak Visual C# kullanılmıştır. Program 32 bit ve 64 bitlik Microsoft Windows işletim sistemlerinde çalışabilecek şekilde derlenmiştir. Programın çalışabilmesi için .Net Framework sürüm 4 veya üstünün bilgisayarda kurulu olması gerekmektedir.

3.3. Programın Yapısı

Geliştirilen program, kendinden öncekilerden farklı olarak, kullanıcıya grafik arayüz üzerinde donatılar üzerinde kaydırma, ekleme, silme işlemleri ile etriye kollarının eklenmesi, silinmesi ve kaydırılması gibi işlemlerin yapılmasına imkân sunmaktadır. Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için kesiti oluşturan bileşenleri barındırarak bunlar üzerinde grafik arayüzünden işlemler yapılabilmesini sağlayan bir sınıfın varlığı gereklidir. Sıfırdan bir sınıf tasarlamak uzun zaman alan bir süreçtir. Bu süreci kısaltmak amacıyla, açık kaynak kodlu sınıflar arasından, yapılacak işlemlerin gerçekleştirilmesini sağlayan bir sınıf bulunmuştur. Seçilen bu sınıf üzerinde değişiklik ve ekleme yapılarak istenilenler gerçekleştirilmiştir.

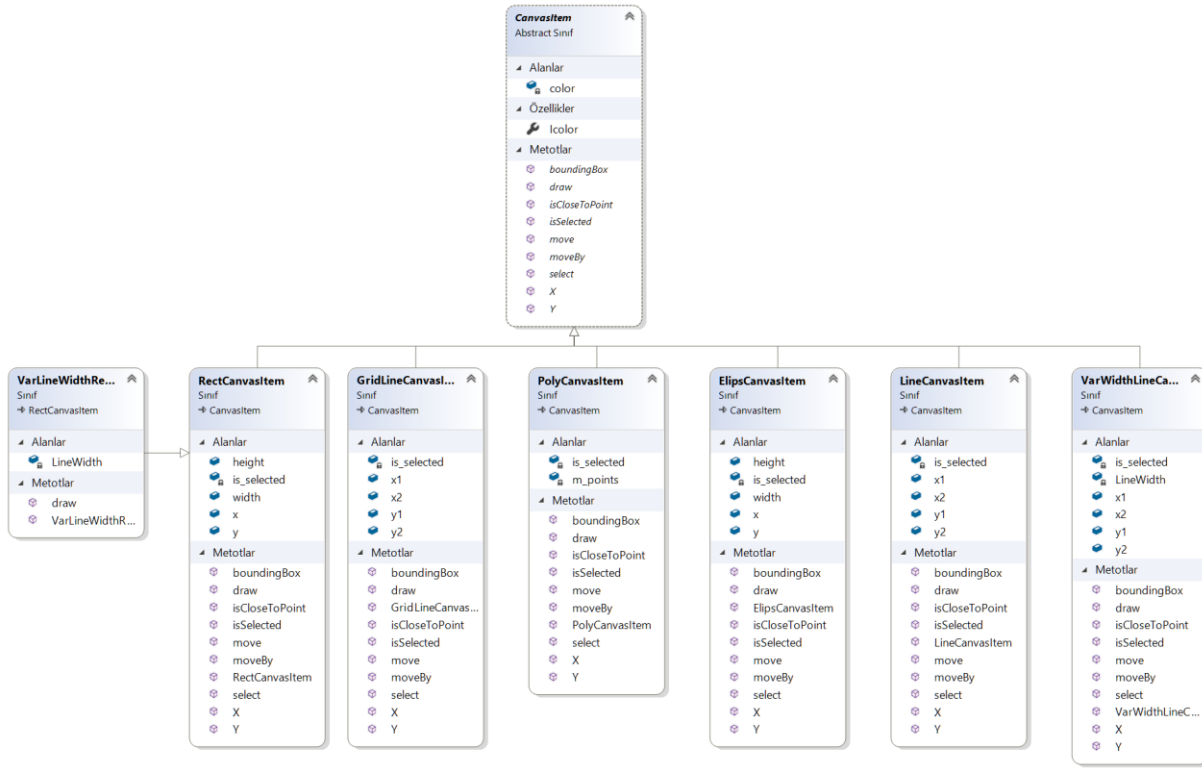
Kesitin çizim alanı birçok farklı öğeyi barındırmaktadır. Şekil 1’de görüldüğü üzere bu öğeler, kılavuz çizgileri, donatıyı saran etriye çizgileri, donatılar için çizilen farklı çap ve renklerde daireler ve çirozlar için çizilen düz olmayan çizgilerdir.



Şekil 1. Kesit çizim alanı

Şekil 2’de, bahsi geçen açık kaynak kodlu hazır sınıfın kullanımı ile gerçekleştirilen CanvasItem sınıfı ve kendisinden türetilen alt sınıflara ait sınıf diyagramı verilmiştir. Geliştirilen uygulama bir Windows Form

uygulaması olup dokuz formdan oluşmaktadır. Bu formların isimleri Şekil 3.’te verilmiştir.



Şekil 2. Kesit grafik arayüzü için geliştirilen CanvasItem ve alt sınıflarının sınıf diyagramı



Şekil. Uygulamada kullanılan form isimleri

Program çalıştırıldığında kullanıcının karşısına Şekil 4’te gösterilen ana form çıkar. Ana form yedi menüden oluşmaktadır. Kullanıcının ilk yapması gereken işlem, kesitleri oluşturmaktır. Bunun için “Kesit ve Malzeme” menüsünden “Yeni” seçilmelidir. Bu işlem, kullanıcının kesitleri oluşturmasını ve detay bilgilerini girmesini sağlar.

Yeni kesit ekleme formu çeşitli veri girişi bölümlerinden oluşur, Şekil 5.a. Bunların ilki kesit adı ve türünün girildiği “Kesit Bilgileri” alanıdır. Program eklenen her bir kesite birden başlayarak otomatik numara vermektedir. Kesit türleri, “Kolon”, “Kiriş” ve “Perde” olarak açılan listeden seçilir. İkinci olarak kesitin b ve h değerleri “Kesit Boyutları” alanındaki giriş

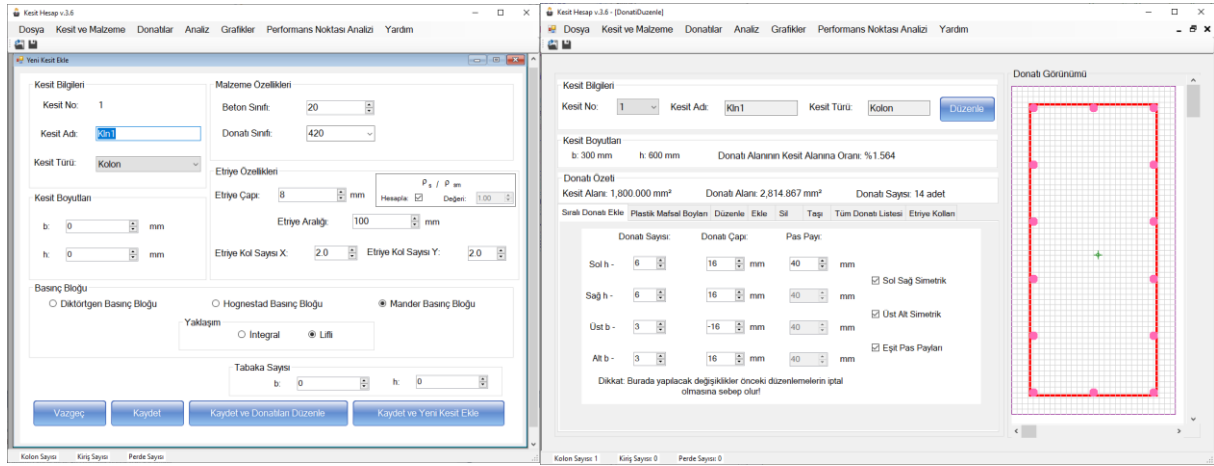
alanına yazılır. “Malzeme Özellikleri” ve “Etriye Özellikleri” alanlarında kesite ait sıklıkla kullanılan değerler varsayılan olarak gelmektedir. Kullanıcı oluşturacağı kesit için değerleri bu alanlardan girebilir.

Kesit bilgileri girildikten sonra donatı düzenleme formuna geçilerek donatı bilgileri girilir, Şekil 5.b. Varsayılan olarak kesitlerde hiç donatı bulunmaz. Kullanıcı b ve h donatılarını istediği şekilde

düzenleyebilir. Eklenen donatılar pas payı da hesaplanarak eşit aralıklarda kesit alanına yerleştirilmektedir. Kullanıcıyı donatı yerleşiminde özgür kılmak için yerleşim simetrisi ve eşit pas payları kullanıcının seçimine bırakılmıştır. Kullanıcı kesitin herhangi bir yerine donatı ekleyebilir, donatıları fare vasıtasıyla konumlandırabilir ve isterse eklenen donatıları silebilir.



Şekil 4. Program ana formu



a)

b)

Şekil 1. a) Yeni kesit ekleme ve b) donatı düzenleme formları

Program girilen donatı sayısına bağlı olarak çirozların eklenmesine ve kullanıcı tarafından yerlerinin değiştirilmesine izin vermektedir. Program, kullanıcının 15 plastik mafsal boyu modelinden istediğini seçmesine izin verir. Kesit ve donatı bilgilerini kaydedilebilir. Kullanıcılar kaydettikleri dosyalar üzerinde ileri bir zamanda çalışmak istediklerinde kaldıkları yerden çalışmalarına devam edebilirler.

Analiz işlemi TÜBİTAK 111M119 Projesi kapsamında Fortran dili kullanılarak hazırlanan BESAM yazılımının,

çalıştırılabilir dosyaları aracılığıyla yapılmaktadır. Analiz işlemlerinden sonra kullanıcı neticeleri grafiğe dökülebilir.

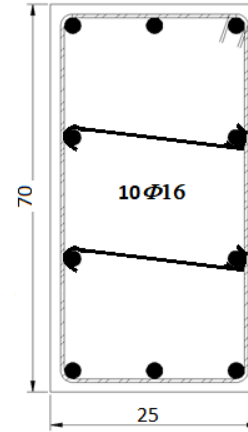
4. Tartışma ve Sonuç

Geliştirilen programın neticelerinin mevcut programlar ile kıyaslanması yapılarak doğruluğu test edilmiştir. Bu amaçla örnek kolon ve kiriş kesitleri için bilgiler, mukayesenin yapılacağı SAP2000 [17], SEMAp (2008) [18], Ersoy (1998) [19] programları ile BESAM

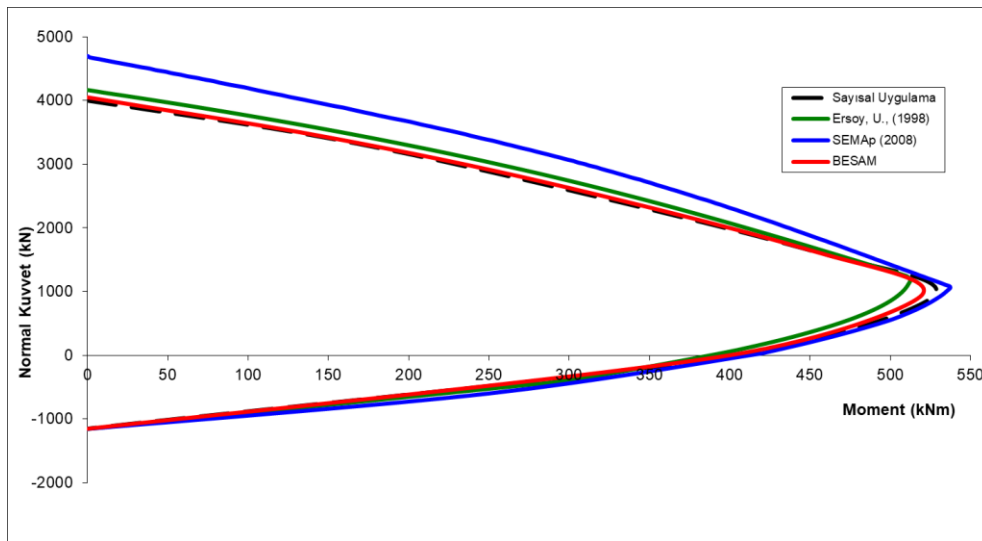
için geliştirilen arayüz programına girilmiştir. Aynı kesitler için sayısal uygulama da yapılmıştır.

Dilmaç [16] tarafından incelenen ve Şekil 6'da verilen kolon kesiti bilgileri yukarıda bahsi geçtiği üzere değişik programlara girilerek moment-eğrilik ilişkisi incelenmiştir. Kolon için *pas payı* 2 cm, $f_{ck}=27 \text{ N/mm}^2$, $f_{yk}=365 \text{ N/mm}^2$ olarak ve çirozlar ise $\Phi 8/10 \text{ cm}$ olarak verilmiştir [16].

Şekil 7'de elde edilen neticelerin birbirleri ile mukayesesi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere BESAM programı için geliştirilen arayüz programı kullanılarak, tüm programlarla ve sayısal uygulama ile yaklaşık aynı neticeler elde edilmiştir.



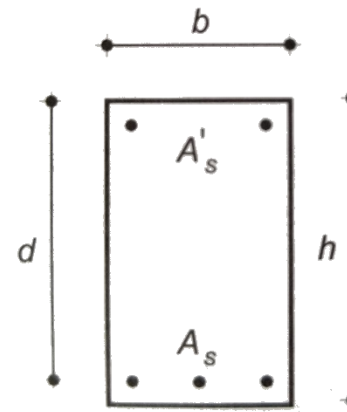
Şekil 6. Betonarme kolon kesiti (Birimler santimetredir)



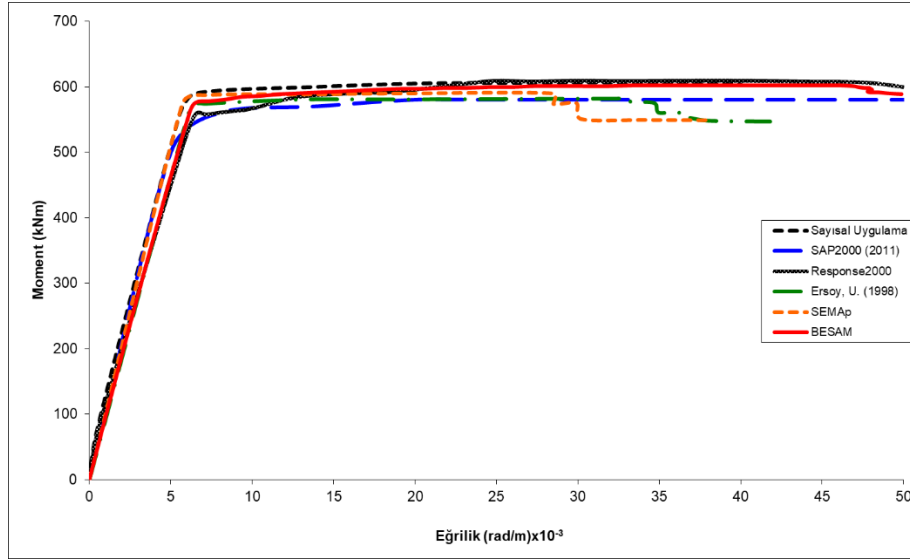
Şekil 7. Kolon kesiti için farklı programlarda için moment-eğrilik ilişkisinin kıyaslanması

Dilmaç [16] tarafından incelenen ve Şekil 8'de verilen kiriş kesiti bilgileri yukarıda bahsi geçtiği üzere değişik programlara girilerek moment-eğrilik ilişkisi incelenmiştir. Kiriş için $b=300 \text{ mm}$, $d=510 \text{ mm}$, $h=550 \text{ mm}$, beton ve donatı sınıfı $C25/S420$, $f_c=25 \text{ MPa}$, $f_y=420 \text{ MPa}$, $f_r=3,6 \text{ MPa}$, $E_c=30 \text{ GPa}$, $E_s=200 \text{ GPa}$, $\epsilon_{cu}=0,004$ MPa, $A_s=2262 \text{ mm}^2$ ($5\Phi 24$), $A'_s=905 \text{ mm}^2$ ($2\Phi 24$) olarak verilmiştir.

Şekil 9'da elde edilen neticelerin birbirleri ile mukayesesi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere BESAM programı için geliştirilen arayüz programı tüm programlarla ve sayısal uygulama ile çok yakın neticeleri vermiştir.



Şekil 8. Betonarme kiriş kesiti



Şekil 9. Kiriş kesiti için farklı programlarda için moment-eğrilik ilişkisinin kıyaslanması.

5. Kaynaklar

- [1] Türkoğlu, N, *Türkiye'nin Yüzölçümü ve Nüfusunun Deprem Bölgelerine Dağılışı*. Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi, (8), 133-148, 2001.
- [2] Öcal, C., İnce, H. H., *Türkiye'de Mevcut Yapı Stoğu ve Kentsel Dönüşüm*. SDÜ International Journal of Technological Science, 4(2), 2012.
- [3] Bilgin, H., *Kamu Yapılarının Deprem Performanslarının Doğrusal Ötesi Analiz Yöntemleriyle Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerileri*. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 195s, Denizli, 2007.
- [4] Celep, Z., Kumbasar, N., *Betonarme Yapılar*. Beta Basın Yayın Dağıtım, 865s, İstanbul, 2005.
- [5] Celep, Z., *Betonarme Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Plastik Mafsallı Kabulü Ve Çözümleme*. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, 167-180, 2007.
- [6] Özmen, H.B., İnel M., Bilgin, H., *Betonarme Elemanların Doğrusal Ötesi Davranışlarının Modellenmesi*. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul, 207-216, 2007.
- [7] Özmen, H. B., İnel, M., Bilgin, H., *Sargılı Beton Davranışının Betonarme Eleman Ve Sistem Davranışına Etkisi*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(2), 2007.
- [8] Ersoy, U., Özcebe, G., *Betonarme*, Evrim Yayınevi, 817s, İstanbul, 2001
- [9] Kaltakçı, M. Y., Korkmaz, H. H., Korkmaz, S. Z., *Basit Eğilme Etkisindeki Betonarme Elemanların Moment-Eğrilik Ve Tasarım Değişkenleri Üzerine Analitik Bir İnceleme*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 71-80, 2001.
- [10] Özcebe, G., Saatçioğlu, M., *Confinement of Concrete Columns for Seismic Loading*. ACI Struct. J., 84(4), 308-315, 1987
- [11] Özcebe, G., Yüçemen S., Aydoğan, V., Yakut, A., *Preliminary Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Turkey-Part I: Statistical Model Based on Structural Characteristics*, 2003
- [12] Ulutaş, H., *Doğrusal Elastik Olmayan Değerlendirme Yöntemi İle Eğitim Binalarının Deprem Güvenliğinin İncelenmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 160s, Isparta, 2017.
- [13] BESAM, *Betonarme Elemanlarda Sargı ve Modelleme*. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu 111M119, 2013.
- [14] *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY)*. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [15] Demir, F., Tekeli, H., Güler, K., Celep, Z., *Binaların Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesinde Kullanılabilecek Yeni bir Yaklaşım*. 111M119 Numaralı TÜBİTAK Projesi, 2013.
- [16] Dılmaç, H., *Mevcut Betonarme Binaların Deprem Performanslarının Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemle Belirlenmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Isparta, 2014.
- [17] SAP 2000. Computers and Structures, Inc., v.14.0.0, *Structural Analysis Program*, Berkeley, CA, ABD, 2001.
- [18] SEMAp, *Betonarme Elemanların Doğrusal Ötesi Davranışlarının Bilgisayar Ortamında Modellenmesi*, 105M024 Numaralı TUBİTAK Projesi, 2008.

- [19] Ersoy, U., Özcebe, G., *Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İrdeleme*. İMO Teknik Dergi, 9(4), 1799-1827, 1998.

Orijinal Makale/Research Article

Doğalgaz kullanılan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi

Fatih YİĞİT¹, Ahmet KABUL¹

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Yerinde Enerji Üretimi
Trijenerasyon Sistemi
Termodinamik Analiz

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 16.01.2019
Kabul Tarihi: 08.12.2020

Öz: Bu çalışmada, yerinde enerji üretimi yöntemlerinden olan trijenerasyon sisteminin EES (Engineering Equation Solve) yazılımı kullanılarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Tasarlanan trijenerasyon sisteminde aylık 1000 m³ doğal gaz kullanılması durumu için sistemin üretim kapasiteleri, ekserji yıkımları ve her bir elemanın ekserji verimleri hesap edilmiştir. Belirlenen çalışma şartlarında aylık 1000 m³ doğal gaz tüketen trijenerasyon sisteminin elektrik üretimi 3.018 kW, ısıtma kapasitesi 10.12 kW ve soğutma kapasitesi 6.574 kW olduğu hesap edilmiştir. Bu kapasitelerde üretim yapabilen trijenerasyon sisteminin ısı veriminin %24, COP'nin 0.68 ve toplam ekserji yokoluşunun 8.49 kW olduğu belirlenmiştir. Sistemin elemanlarının toplam yok olan ekserjideki payının sırasıyla kazanda %28, kondenser I'de %24, absorberde %14, generatörde %12, kondenser II'de %11 evaporatörde %9 ve türbinde %2 olduğu hesap edilmiştir. Elde edilen bu sonuçların literatürdeki benzer hesaplamalarda elde edilen bulgulara yakın olduğu belirlenmiştir.

Atıf için/To Cite:

Yiğit F. Kabul A. Doğalgaz kullanılan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12(3), 92-100, 2020.

Energy and exergy analysis of a trigeneration system using natural gas

Keywords

In Place Energy Generation
Tri-generation Systems
Thermodynamic Analysis

Article history:

Received: 16.01.2019
Accepted: 08.12.2020

Abstract: In this study, tri generation system which is one of the in place energy generation methods is analyzed thermodynamically by using EES (Engineering Equation Solve) software. The electricity capacity, exergy losses, and exergy efficiency was calculated which of the case study of consuming of 1000 m³ natural gas. In the pre-determined conditions, it is calculated that a trigeneration system which consumes 1000 m³ of natural gas per month has a capacity of generating the electrical energy of 3.018 kW, heating capacity of 10.12 kW and cooling capacity of 6.574 kW. It is calculated that such a trigeneration system which has such capacities of production has a thermal efficiency of 24%, COP of 0.68 and total exergy loss of 8.49 kW. The total loss of exergy at each system component has a percentage of; 28% at the boiler, 24% at the condenser I, 14% at the absorber, 12% at the generator 11% at the condenser II, 11% at the evaporator and 2% at the turbine respectively. These results that are obtained have shown resemblance with the results that have been published previously.

1. Giriş

Enerji, ülkelerin gelişmişlik düzeylerini, teknolojiye dayanarak faydalanma seviyelerini ve hatta ülkelerin ilerleyebilme potansiyelini gösteren temel bir parametre olarak, kitaplardaki tanımı olan iş yapabilme yeteneğinin çok ötesinde anlamları taşımaktadır. İnsanlar daha konforlu bir yaşam sürmek adına yaşam alanlarında daha fazla enerji tüketmeye başlamış ve bu durum

beraberinde çeşitli sorunları da getirmiştir [1]. Enerji konusundaki sorunların aşılabilmesi için yeni enerji kaynakları araştırılmalı ve mevcut kaynakların kullanım alanları genişletilmelidir. Bu açıdan Ülkemize bakıldığı zaman durum çok farklılık göstermemekle birlikte enerjiye duyulan ihtiyacın artması Ülkemizin enerji konusunda dış kaynaklara bağımlılığını artırmaktadır [2],[3].

Ülkemizde, konutlarda tüketilen elektrik, ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılan enerji miktarının toplam tüketime oranı yaklaşık %45 civarındadır. Ülkemizde enerji tüketim kültürünün değişmesinin gerekliliğini gösteren çok çeşitli istatistikler (enerjinin dışa bağımlılığı yüzdeleri, konutlarda ve sanayide tüketilen enerji miktarları vb.) mevcuttur. Bu istatistik tablosu göz önüne alındığında en ufak tasarruf hamlelerinin bile büyük önem arz ettiği ortadadır. Konutlardaki enerji tüketiminin en aza indirilmesi enerji konusunda dışa bağımlı olan ülkemizin ekonomisine büyük katkılar sağlayabilir. Diğer bir bakış açısıyla bakıldığında, konutlardaki enerji tüketiminin toplam tüketime olan oranının azaltılması sanayide üretim için harcanacak enerjinin payını arttıracak ve böylelikle üretim miktarları artacaktır [4]-[6].

Ayrıca enerjinin üretildiği yerden kullanıldığı yere taşınması çeşitli kayıplara yol açmaktadır. En yaygın olarak kullanılan enerji türü olan elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisi üretim santralleri genellikle şehir merkezlerinden uzakta bulunmaktadır ve bu durum elektriğin taşınması zorunluluğu ortaya çıkarmaktadır. Ancak elektrik enerjisi iletim ve dağıtımında büyük kayıplar meydana gelmektedir. Dağıtım sistemlerinde gerilim seviyesi düşük ve akım yüksek olduğu için meydana gelen kayıpların büyük oranı dağıtım sistemlerinde oluşur. Bundan dolayı dağıtım sistemlerindeki enerjinin verimini iyileştirmek enerji kaybını azaltmada daha etkili olacaktır. Ülkemizde 2007 yılında 125 618561 MWh enerji tüketilmiş olup, bu enerjinin %14.8'i kayıp - kaçak ve %28.6'sında konutlarda harcanmıştır. Kayıp- kaçak oranının bu seviyelerde olması kabul edilemez [7].

Tablo 1. Dağıtım sisteminde meydana gelen kayıp türleri ve miktarı örneği [8].

Kayıp Türleri	Kayıp (kWh)	Kayıp (%)
İletim Hattı Kayıpları	4077761.75	9.66
Güç Transformator Kayıpları	1966082.61	4.66
Dağıtım Hattı Kayıpları	2935771.32	6.96
Alçak Gerilim Transformator ve Dağıtım Hattı Kayıpları	3322200.00	78.72
Toplam	42201675.68	100

Enerjinin en yaygın kullanılan biçimi olan elektrik enerjisi, depolanması zor ve maliyetli bir enerji türüdür. Hiçbir depolama sisteminde enerji, elektrik enerjisi olarak depolanamaz. Elektrik enerjisi bir başka forma dönüştürülerek farklı sistemlerle depolanabilir ve kullanılmak istendiğinde tekrar elektrik formuna

dönüştürülmesi gereklidir. Bu form dönüşümleri sırasında büyük oranda enerji kayıpları meydana gelebilir [9].

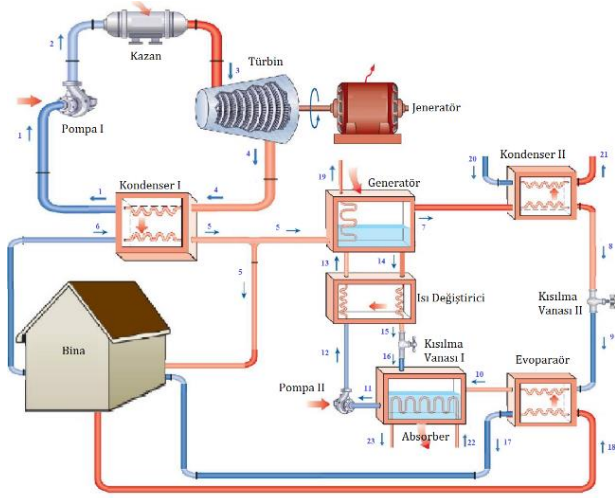
Elektrik enerjinin iletim ve dağıtımında yüksek oranlarda enerji kaybının olması bunun yanı sıra depolanmasının zor ve maliyetli oluşu enerjinin verimli kullanılmasının önünde duran büyük engellerdir. Bu engellerin aşılmasının en kolay yolu enerjinin tüketildiği yerde üretilmesidir.

Trijenerasyon sistemleri yerinde enerji üretimine imkân sağlarlar. Trijenerasyon sistemleri, eş zamanlı olarak elektrik enerjisi, ısıtma ve soğutma üretebilen sistemlerdir [10]. Trijenerasyon sistemlerinde elektrik enerjisi üretimi içten yanmalı motorlarla, gaz akışkanlı bir güç çevrimi olan Brayton çevrimi ya da buhar akışkanlı bir güç çevrimi olan Rankine çevrimi ile gerçekleştirilebilir. Termodinamik bir çevrim gerçekleştirilerek çalışan bir güç üretim sisteminde elektrik enerjisinin yanı sıra büyük miktarlarda ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan ısı enerjisi doğrudan ısıtma amaçlı kullanılabilir gibi ihtiyaç duyulduğu zamanlarda çeşitli soğutma makineleri aracılığı ile soğutma amaçlı kullanılabilir [10].

Özdemir (2011), doktora tez çalışmasında Çekmeköy ilçesinde bulunan beş sitenin ısı yalıtım projelerini ve enerji tüketim değerlerini inceleyerek ısı tasarrufu ile kojenerasyon sisteminin uygulanabilirliğinin fizibilite çalışmasını yapmıştır [11]. İlık (2012), doğal gaz yakıtı ile çalışan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Her bir ünite için tersinmezlik, entropi üretimi, kayıp kullanılabilir enerji ve ikinci kanun verimlerini hesaplamıştır. Kojenerasyon sisteminin termodinamik analizi sonucunda en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %32 yoğunlaştırıcı, %25 yanma odası, %23'ünde atık ısı kazanında olduğunu ortaya koymuştur. Absorbsiyon soğutma sisteminde ise en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %37 kondenser %31 generatör ve %18'inde evaporatörde olduğu tespit etmiştir [10]. Ekinci (2013), Erzurum Sağlık Kampüsü için trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliğini araştırmak için bir simülasyon oluşturmuştur. Böylece hastanenin yıl boyunca talep edeceği enerji miktarını tahmin ederek trijenerasyon sisteminin etkin şekilde çalışmasını sağlamıştır [12]. Yazman (2015), çalışmasında geleneksel yöntemlerle ısıtma, soğutma ve elektrik ihtiyacı karşılanan bir üniversitenin hizmet binaları için, elektrik, ısıtma ve soğutma enerjisini tek bir sistemle üretebilecek bir trijenerasyon sisteminin modellenmesini üzerine çalışmıştır. Modellenen trijenerasyon sisteminin termodinamik ve ekonomik analizlerini yaparak sistemin amortisman süresini 3,22 yıl olarak hesap etmiştir. Sistemdeki ekserji kayıplarının çift etkili

absorpsiyonlu sistemin yüksek sıcaklık jeneratöründe (HTG) %32.12, yüksek sıcaklık eşanjöründe %21.36 ve absorpsiyonlu sistemin düşük sıcaklık jeneratörü (LTG) %14.60 olduğu ortaya koymuştur. Duymaz (2016), çalışmasında Kâğıt Sanayide hizmet veren bir fabrikada kojenerasyon Tesisi, ünite ekipmanlarının her birinin termodinamik analizini yapmıştır. Yaptığı hesaplamalar sonucunda; toplam enerji kaybının %42.92'si ile en yüksek enerji kaybı ve toplam yok olan ekserjinin %87.3'ü ile en yüksek ekserji kaybı oranına sahip olan ekipmanı kazan olarak tespit etmiştir [13].

Bu çalışmada, yerinde enerji üretiminde kullanılabilen trijenerasyon sistemlerinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak Rankine çevrimi, ısıtma sistemi ve absorpsiyonlu soğutma sisteminden oluşan bir trijenerasyon sistemi tasarlanmış ve tasarlanan sistemde yakıt olarak doğalgaz kullanıldığı kabul edilmiştir (Şekil 1). Önceki çalışmalarda çoğunlukla daha büyük sistemler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ise kolay mukayese yapılabilmesi için örnek bir yaklaşım modeli oluşturmak amacıyla ayda 1000 m³ doğal gaz tüketen bir trijenerasyon sisteminin elektrik üretim, ısıtma ve soğutma kapasiteleri hesaplanmış ve sistem elemanlarının ekserji yıkımları ve ekserji verimleri ortaya koyulmuştur.



Şekil 1. Trijenerasyon sistemi

2. Materyal ve Yöntem

Kütle değişmeyen madde miktarını ifade eden bir terimdir. Sürekli akışlı açık sistemlerde birim kütlede ziyade kütsel debi tanımına ihtiyaç duyulur. Kütsel debi birim zamanda hareket eden kütle miktarını ifade eder. Bir sisteme giren ve çıkan kütsel debilerin sistemde meydana gelen kütle değişimine eşit olması

gerekmektedir [14]. Sürekli akışlı açık sistem için, $\Delta\dot{m}_{\text{sistem}} = 0$ olur.

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} - \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} = \Delta\dot{m}_{\text{sistem}} \quad (1)$$

Termodinamiğin birinci kanunu olan enerjinin korunumu kanunu, var olan enerjinin yok edilemeyeceğini, olmayan bir enerjinin de var edilemeyeceğini ifade etmektedir [14],[15].

$$\sum \dot{E}_{\text{giren}} - \sum \dot{E}_{\text{çıkan}} = \frac{\Delta\dot{E}_{\text{sistem}}}{dt} = 0 \rightarrow \dot{E}_{\text{giren}} = \dot{E}_{\text{çıkan}} \quad (2)$$

Entropi bir sistem için düzensizliği ifade etmektedir. Gerçek olan her çevrim sistemin entropisi artacağı yönde ilerler. Sistemin bazı elemanları için entropi terimi azalan yönde olsada sistemin geneli dikkate alındığında entropi daima artmaktadır [14].

$$\sum \dot{S}_{\text{giren}} - \sum \dot{S}_{\text{çıkan}} + \dot{S}_{\text{üretim}} = \Delta\dot{S}_{\text{sistem}}/dt \quad (3)$$

\dot{Q} miktardaki ısı geçişi ile entropi geçiş miktarları yani ısının entropisi aşağıdaki denklemlerle hesap edilir,

$$\dot{S}_{\text{ısı}} = \dot{Q}/T \quad (3.a)$$

Ve \dot{m} miktarındaki kütle akışı ile entropi geçiş miktarları,

$$\dot{S}_{\text{kütle}} = \dot{m} \cdot s \quad (3.b)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Entropi üretimin bir sonucu olarak, enerjinin kullanılabilirlik potansiyeli olan ekserji daima azalan yönde gerçekleşmektedir. Bazı sistem elemanlarında ekserji artan yönde ilerliyor olsa da sistemin tamamı göz önüne alındığında ekserji daima azalan yönde ilerlemektedir [14].

$$\dot{E}_{\text{XQ}} - \dot{E}_{\text{XW}} = \sum (\dot{m}\epsilon)_{\text{çıkan}} - \sum (\dot{m}\epsilon)_{\text{giren}} + \dot{E}_{\text{Xyokolan}} \quad (4)$$

şekindedir. Denklem (4)'te \dot{E}_{XQ} ve \dot{E}_{XW} sırasıyla ısı transferi ve mekanik enerjiye karşılık gelen birim zamandaki ekserjileri, ϵ özgül ekserjiyi ve \dot{m} akışkan debisini temsil etmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki denklemlerle hesap edilir [14],[16].

$$\dot{E}_{\text{XQ}} = \dot{Q} \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \quad (4.a)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (4.b)$$

$$\dot{E}x_i = \dot{m}_i * \epsilon \quad (4.c)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_P} \quad (6)$$

Ekserji verimi Denklem (7) ile hesaplanır [15].

$$\eta_{II} = \frac{\text{Geri kazanılan ekserji}}{\text{Sağlanan ekserji}} \quad (7)$$

Rankine çevriminin ısı verimi, çevrimde elde edilen türbin işinin kazanda harcanan enerjiye oranı ile bulunabilir;

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{Q}_k} \quad (5)$$

Yukarıda verilen denge denklemlerinin sistemin her bir elemanı için uygulanması sonucu elde edilen formüller Tablo 2’de verilmiştir.

Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin verimi, etkinlik katsayısı ile ifade edilir ve şu şekilde hesap edilir;

Tablo 2. Sistemin denge denklemleri

Sistem Elemanı	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi	Entropi Dengesi	Ekserji Dengesi	II. Yasa Verimi
Pompa I	$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0$	$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{W}_{P,I} - \dot{m}_2 \cdot h_2 = 0$	$\dot{m}_1 \cdot s_1 - \dot{m}_2 \cdot s_2 + s_{ür,P,I} = 0$	$\dot{m}_1 \cdot \epsilon_1 + \dot{W}_{P,I} - \dot{m}_2 \cdot \epsilon_2 - Ex_{yok,P,I} = 0$	$\eta_{II,P,I} = \frac{\dot{m}_2 \cdot \epsilon_2 - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1}{\dot{W}_{P,I}}$
Kazan	$\dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0$	$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{Q}_{Kaz} - \dot{m}_3 \cdot h_3 = 0$	$\dot{m}_2 \cdot s_2 + \frac{\dot{Q}_{Kaz}}{T} - \dot{m}_3 \cdot s_3 + s_{ür,Kaz} = 0$	$\dot{m}_2 \cdot \epsilon_2 + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \dot{Q}_{Kaz} - \dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - Ex_{yok,Kaz} = 0$	$\eta_{II,Kaz} = \frac{\dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - \dot{m}_4 \cdot \epsilon_4}{\dot{Q}_{Kaz} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}$
Türbin	$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0$	$\dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{W}_T = 0$	$\dot{m}_3 \cdot s_3 - \dot{m}_4 \cdot s_4 + s_{ür,T} = 0$	$\dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - \dot{m}_4 \cdot \epsilon_4 - \dot{W}_T - Ex_{yok,T} = 0$	$\eta_{II,T} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - \dot{m}_4 \cdot \epsilon_4}$
Kondenser I	$\dot{m}_4 - \dot{m}_1 = 0$ $\dot{m}_6 - \dot{m}_5 = 0$	$\dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{Q}_{K,I} - \dot{m}_1 \cdot h_1 = 0$ $\dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{Q}_{K,I} - \dot{m}_5 \cdot h_5 = 0$	$\dot{m}_4 \cdot s_4 - \dot{m}_1 \cdot s_1 + \dot{m}_6 \cdot s_6 - \dot{m}_5 \cdot s_5 + s_{ür,K,I} = 0$	$\dot{m}_4 \cdot \epsilon_4 + \dot{m}_6 \cdot \epsilon_6 - \dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1 - Ex_{yok,K,I} = 0$	$\eta_{II,K,I} = \frac{\dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_6 \cdot \epsilon_6}{\dot{m}_4 \cdot \epsilon_4 - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1}$
Generatör	$\dot{m}_{13} - \dot{m}_7 = 0$ $\dot{m}_{14} = 0$ $\dot{m}_5 - \dot{m}_{19} = 0$	$\dot{m}_{13} \cdot h_{13} - \dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{Q}_{Gen} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} = 0$ $\dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{Q}_{Abs} - \dot{m}_{19} \cdot h_{19} = 0$	$\dot{m}_{13} \cdot s_{13} - \dot{m}_7 \cdot s_7 - \dot{m}_{14} \cdot s_{14} + \dot{m}_5 \cdot s_5 - \dot{m}_{19} \cdot s_{19} + s_{ür,Gen} = 0$	$\dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - \dot{m}_7 \cdot \epsilon_7 - \dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} + \dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19} - Ex_{yok,Gen} = 0$	$\eta_{II,Gen} = \frac{\dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - \dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} - \dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19}}{\dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19}}$
Kondenser II	$\dot{m}_7 - \dot{m}_8 = 0$ $\dot{m}_{20} - \dot{m}_{21} = 0$	$\dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{Q}_{K,II} - \dot{m}_8 \cdot h_8 = 0$ $\dot{m}_{20} \cdot h_{20} + \dot{Q}_{K,II} - \dot{m}_{21} \cdot h_{21} = 0$	$\dot{m}_7 \cdot s_7 - \dot{m}_8 \cdot s_8 + \dot{m}_{20} \cdot s_{20} - \dot{m}_{21} \cdot s_{21} + s_{ür,K,II} = 0$	$\dot{m}_7 \cdot \epsilon_7 + \dot{m}_{20} \cdot \epsilon_{20} - \dot{m}_{21} \cdot \epsilon_{21} - \dot{m}_8 \cdot \epsilon_8 - Ex_{yok,K,II} = 0$	$\eta_{II,K,II} = \frac{\dot{m}_{21} \cdot \epsilon_{21} - \dot{m}_{20} \cdot \epsilon_{20}}{\dot{m}_7 \cdot \epsilon_7 - \dot{m}_8 \cdot \epsilon_8}$
Kısılma Vanası I	$\dot{m}_{15} - \dot{m}_{16} = 0$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{16} \cdot h_{16} = 0$	$\dot{m}_{15} \cdot s_{15} - \dot{m}_{16} \cdot s_{16} + s_{ür,KV,I} = 0$	$\dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15} - \dot{m}_{16} \cdot \epsilon_{16} - Ex_{yok,KV,I} = 0$	$\eta_{II,KV,I} = \frac{\dot{m}_{16} \cdot \epsilon_{16}}{\dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15}}$
Evaporatör	$\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} = 0$ $\dot{m}_{18} - \dot{m}_{19} = 0$	$\dot{m}_9 \cdot h_9 - \dot{Q}_{Ev} - \dot{m}_{10} \cdot h_{10} = 0$ $\dot{m}_{18} \cdot h_{18} + \dot{Q}_{Ev} - \dot{m}_{19} \cdot h_{19} = 0$	$\dot{m}_9 \cdot s_9 - \dot{m}_{10} \cdot s_{10} + \dot{m}_{18} \cdot s_{18} - \dot{m}_{19} \cdot s_{19} + s_{ür,Ev} = 0$	$\dot{m}_9 \cdot \epsilon_9 + \dot{m}_{18} \cdot \epsilon_{18} - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19} - \dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} - Ex_{yok,Ev} = 0$	$\eta_{II,Ev} = \frac{\dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} - \dot{m}_9 \cdot \epsilon_9}{\dot{m}_{18} \cdot \epsilon_{18} - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19}}$
Absorber	$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{16} - \dot{m}_{11} = 0$ $\dot{m}_{22} - \dot{m}_{23} = 0$	$\dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} - \dot{Q}_{Abs} - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} = 0$ $\dot{m}_{22} \cdot h_{22} + \dot{Q}_{Abs} - \dot{m}_{23} \cdot h_{23} = 0$	$\dot{m}_{10} \cdot s_{10} + \dot{m}_{16} \cdot s_{16} - \dot{m}_{11} \cdot s_{11} + \dot{m}_{22} \cdot s_{22} - \dot{m}_{23} \cdot s_{23} + s_{ür,Abs} = 0$	$\dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} + \dot{m}_{16} \cdot \epsilon_{16} - \dot{m}_{11} \cdot \epsilon_{11} + \dot{m}_{22} \cdot \epsilon_{22} - \dot{m}_{23} \cdot \epsilon_{23} - Ex_{yok,Abs} = 0$	$\eta_{II,Abs} = \frac{\dot{m}_{23} \cdot \epsilon_{23} - \dot{m}_{22} \cdot \epsilon_{22}}{\dot{m}_6 \cdot \epsilon_6 + \dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} - \dot{m}_{11} \cdot \epsilon_{11}}$
Pompa II	$\dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} = 0$	$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{W}_{P,II} - \dot{m}_{12} \cdot h_{12} = 0$	$\dot{m}_{11} \cdot s_{11} - \dot{m}_{12} \cdot s_{12} + s_{ür,P,II} = 0$	$\dot{m}_{11} \cdot \epsilon_{11} + \dot{W}_{P,II} - \dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12} - Ex_{yok,P,II} = 0$	$\eta_{II,P,II} = \frac{\dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12} - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1}{\dot{W}_{P,II}}$
Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_{12} - \dot{m}_{13} = 0$ $\dot{m}_{14} - \dot{m}_{15} = 0$	$\dot{m}_{12} \cdot h_{12} - \dot{Q}_{ID} - \dot{m}_{13} \cdot h_{13} = 0$ $\dot{m}_{14} \cdot h_{14} + \dot{Q}_{ID} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} = 0$	$\dot{m}_{12} \cdot s_{12} - \dot{m}_{13} \cdot s_{13} + \dot{m}_{14} \cdot s_{14} - \dot{m}_{15} \cdot s_{15} + s_{ür,ID} = 0$	$\dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12} + \dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} - \dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15} - \dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - Ex_{yok,ID} = 0$	$\eta_{II,ID} = \frac{\dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - \dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12}}{\dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} - \dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15}}$
Kısılma Vanası II	$\dot{m}_8 - \dot{m}_9 = 0$	$\dot{m}_8 \cdot h_8 - \dot{m}_9 \cdot h_9 = 0$	$\dot{m}_8 \cdot s_8 - \dot{m}_9 \cdot s_9 + s_{ür,KV,II} = 0$	$\dot{m}_8 \cdot \epsilon_8 - \dot{m}_9 \cdot \epsilon_9 - Ex_{yok,KV,II} = 0$	$\eta_{II,KV,II} = \frac{\dot{m}_9 \cdot \epsilon_9}{\dot{m}_8 \cdot \epsilon_8}$

3. Bulgular

Tasarlanan trijenerasyon sistemi belirli kabuller yapılarak termodinamiksel olarak analiz edilmiş, enerji - ekserji verimleri ve ekserji yokoluşları her bir sistem elemanı için hesap edilmiştir. Bununla birlikte sistemin, kazan veriminin %85 türbin giriş basıncının 1000 kPa sıcaklığının 450 °C, kondenser I basıncının 90 kPa, ısı değiştiricisi etkinliğinin %70, evaporatör sıcaklığının 12 °C, kondenser II ve absorber sıcaklığının 42 °C olduğu çalışma şartlarında her bir noktanın basınç,

sıcaklık, entalpi, entropi, ekserji gibi termodinamiksel özellikler Tablo 3'te verilmiştir. Sistemin ikinci yasa verilerinin hesap edilebilmesi için ölü hal şartları 101.325 kPa basınç ve 25 °C sıcaklık olduğu kabul edilmiştir. Tasarlanan sistemde teorik değerler aralığında kabul edilen bazı parametreler (ısı değiştiricisi etkinliği, kazan çıkış sıcaklığı, evaporatör sıcaklığı vb.) değiştirilerek parametrik çalışmalar yapılmış ve sistemin en iyi çalışma şartları ortaya konulmuştur.

Tablo 3. Trijenerasyon sisteminin her bir noktasının termodinamiksel özellikleri

Akışkan	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	m (kg/s)	E (kW)	Ex (kW)	x (%)
0 Ölü Hal	101	25.0	104.80	0.367				
1 Doymuş Sıvı su	90	57.0	405.20	1.270	0.004	1.509	0.116	
2 Sıkıştırılmış Sıvı su	1000	97.9	410.90	1.283	0.004	1.530	0.123	
3 Kızgın Buhar su	1000	450.0	3371.00	7.618	0.004	12.550	4.111	
4 Doymuş Buhar su	90	96.7	2670.00	7.394	0.004	9.946	1.752	
5 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	79.7	333.90	1.071	0.255	85.080	4.850	
6 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	40.0	167.90	0.572	0.255	42.770	0.465	
7 Soğutucu Akışkan Su	8.21	79.7	2643.00	7.615	0.002	6.370	0.908	1.000
8 Soğutucu Akışkan Su	8.21	42.0	175.90	0.599	0.002	0.424	0.004	1.000
9 Soğutucu Akışkan Su	1.40	12.0	175.90	0.621	0.002	0.424	0.011	1.000
10 Soğutucu Akışkan Su	1.40	12.0	2523.00	8.850	0.002	6.080	0.269	1.000
11 Zengin Karışım	1.40	42.0	97.63	0.260	0.083	8.070	2.038	0.548
12 Zengin Karışım	8.21	43.2	100.10	0.268	0.083	8.273	2.048	0.548
13 Zengin Karışım	8.21	68.8	152.90	0.428	0.083	12.640	2.458	0.548
14 Fakir Karışım	8.21	79.7	180.10	0.479	0.080	14.450	3.355	0.564
15 Fakir Karışım	8.21	54.2	128.00	0.326	0.080	10.270	2.837	0.564
16 Fakir Karışım	1.40	42.0	128.00	0.250	0.080	10.270	4.653	0.564
17 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	22.0	92.39	0.325	0.193	17.850	0.031	
18 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	15.0	63.11	0.224	0.193	12.190	0.158	
19 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	72.0	301.80	0.980	0.255	76.900	3.658	
20 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	22.0	92.39	0.325	0.035	3.252	0.006	
21 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	62.4	261.30	0.861	0.035	9.198	0.322	
22 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	22.0	92.39	0.325	0.144	13.330	0.023	
23 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	35.4	148.40	0.510	0.144	21.410	0.121	

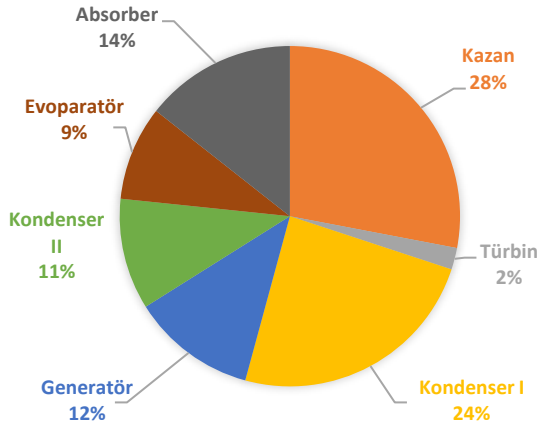
Sistemin her bir noktası için kabul edilen çalışma şartlarında termodinamiksel özellikler Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te verilen termodinamiksel özellikler Tablo 2'de verilen sistem elemanları formüllerinde yerlerine yazıldığında sistemin kapasite, entropi üretimi, ekserji yıkımı ve ekserji verimleri elde edilmiştir. 3.85×10^{-4} m³/s debide (aylık 1000 m³) doğal gaz tüketilmesi durumunda sistemde üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı 3.018 kW, üretilebilecek ısı miktarı 10.12 kW ve soğutma kapasitesi ise 6.574 kW olarak hesaplanmıştır ve sistem elemanlarının kapasite değerleri Tablo 4'te verilmiştir [16].

Tablo 4. Sistemin her bir elemanı için elde edilen kapasite değerleri

Sistem Elemanı	Kapasite (kW)
Pompa I	0.178
Kazan	12.96
Türbin	3.018
Kondenser I	10.12

Generatör	9.471
Kondenser II	7.148
Kısılma Vanası I	-
Evaporatör	6.574
Absorber	9.037
Pompa II	0.14
Isı Değiştiricisi	-
Kısılma Vanası II	-

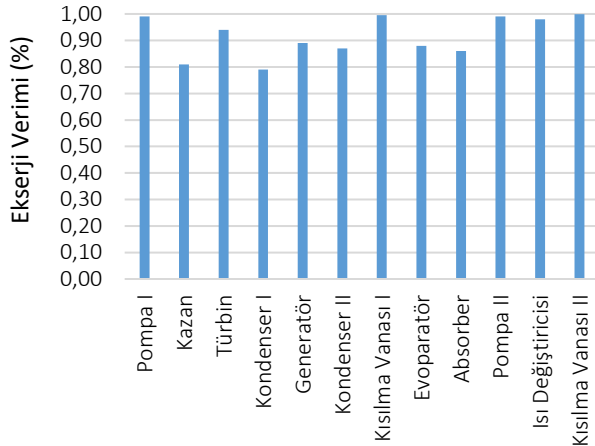
Sistemin toplam entropi üretimi ve ekserji yok oluşu sırasıyla 0.03235273 kW/K ve 8.499952 kW olarak hesap edilmiştir. Ekserji yokoluşu güç üretim sisteminde yer alan kazan (2.1252 kW) %28, kondenser I'de (2.1252 kW) %24 ve absorpsiyonlu soğutmanın elemanı olan generatör (1.04181 kW) %12 kondenser II (0.92924 kW) %11 olarak hesaplanmıştır. Isı değiştiricisi, kısılma vanası I ve II. Pompa I ve II elemanlarında ekserji yokoluşu çok az olduğu için yüzde oran içerisinde gösterilmemiştir.



Şekil 1. Trijenerasyon sisteminde oluşan ekserji kayıpları

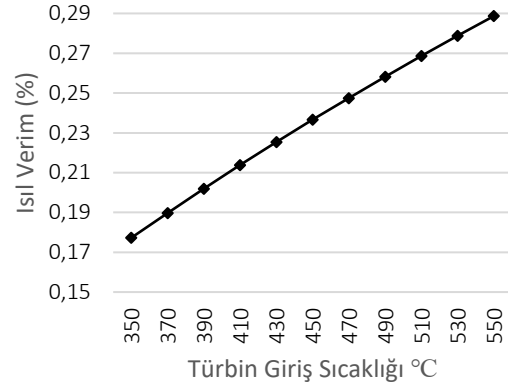
Her bir sistem elemanın toplam ekserji yok oluşu üzerindeki oransal dağılımı Şekil 2.'de görülmektedir. En fazla ekserji kaybı Kazan'da meydana gelirken en az ekserji kaybının Türbinde olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca sistem elemanlarının ikinci yasa verimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. İkinci yasa verimi en düşük olan sistem elemanının Kondenser I olduğu ortaya konulmuştur.



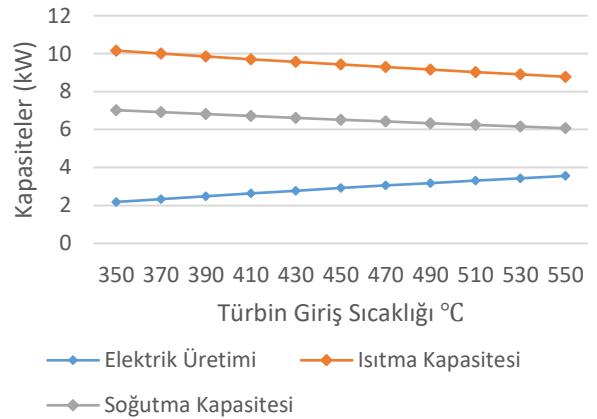
Şekil 2. Sistem Elemanlarının ekserji verimleri

Sistemde Türbin giriş sıcaklığı, Kondenser I basıncı, Evaporatör sıcaklığı, Kondenser II sıcaklığı ve ısı değiştiricisi etkinliği değerleri belirli aralıklarda değiştirilerek sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde aşağıda verilmiştir.



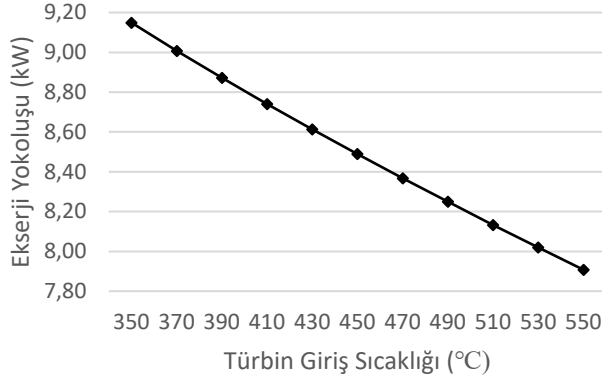
Şekil 3. Türbin giriş sıcaklığının değişiminin ısı verim üzerindeki etkisi

Şekil 4'te Türbin giriş sıcaklığının değişimi ile sistemin ısı veriminin nasıl değiştiği gösterilmektedir. Türbin giriş sıcaklığının artmasıyla ısı veriminde artış göstermiştir. Türbin giriş sıcaklığı malzeme dayanımların getirdiği sınırlardan ötürü belirli sıcaklıkların üzerine çıkartılamamaktadır.



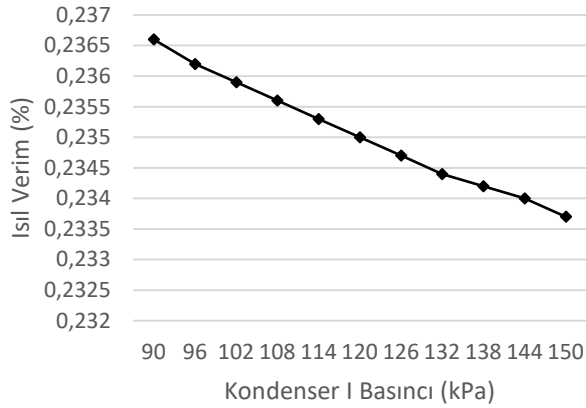
Şekil 4. Türbin giriş sıcaklığının değişiminin elektrik üretimi, ısıtma ve soğutma kapasiteleri üzerindeki etkisi

Şekil 5'te türbin giriş sıcaklığındaki artışın elektrik üretimi, ısıtma kapasitesi ve soğutma kapasitesi üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Giriş sıcaklığın artması ısı verimi arttırdığı için daha fazla elektrik üretiminin gerçekleşmesi beklenen bir durumdur. Bununla birlikte kazanda sisteme giren toplam ısı miktarı değişmediği ve giren enerjinin daha fazla kısmı elektrik enerjisine dönüştürüldüğü için ısıtma ve soğutma kapasiteleri azalmaktadır.



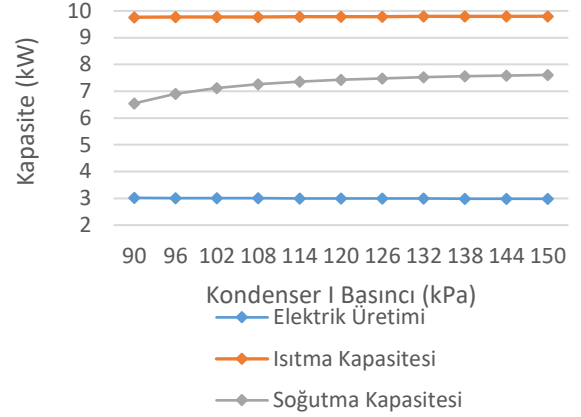
Şekil 5. Türbin çıkış sıcaklığının ekserji yokoluşu üzerindeki etkisi

Şekil 6’te görüldüğü gibi türbin giriş sıcaklığındaki artış ekserji yok oluşu azalmaktadır. Bu durumun sebebi olarak ısı verimi arttırması ifade edilebilir. Türbin giriş sıcaklığı ısı verimi arttırmaktadır.



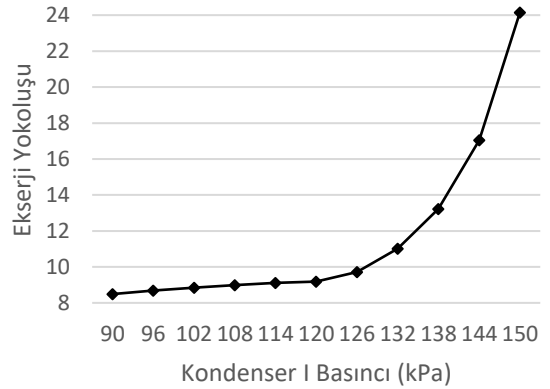
Şekil 6. Isıl verimin kondenser I basıncına göre değişimi

Şekil 7’de görüldüğü gibi kondenser basıncındaki artış yoğuşma sıcaklığını arttırdığı için ısı verimi azaltmaktadır.



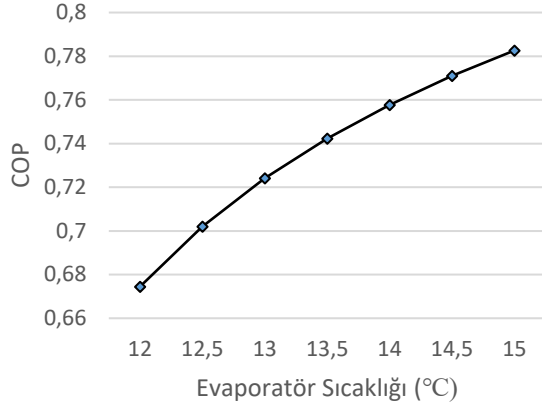
Şekil 7. Kapasitelerin kondenser basıncına göre değişimi

Şekil 8’de kondenser basıncındaki artış ile birlikte (ısı verimin düşmesine sebep olduğu için) elektrik üretim kapasitesini azalmasına sebep olurken ısıtma ve soğutma kapasitesini artmasına sebep olduğu görülmektedir.



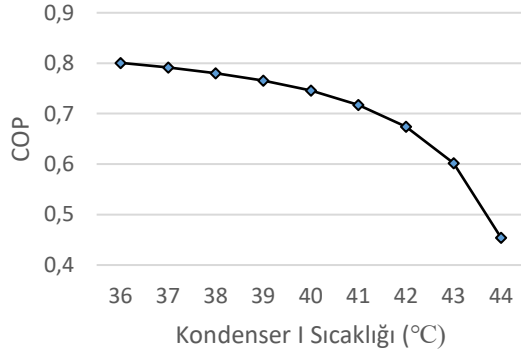
Şekil 8. Ekserji yokoluşunun kondenser basıncına göre değişimi

Şekil 9’da görüldüğü gibi kondenser basıncındaki artış ısı verimi azalttığı için daha fazla kullanılabilir iş potansiyeli yok olmuştur böylelikle ekserji yok oluşu artmıştır.

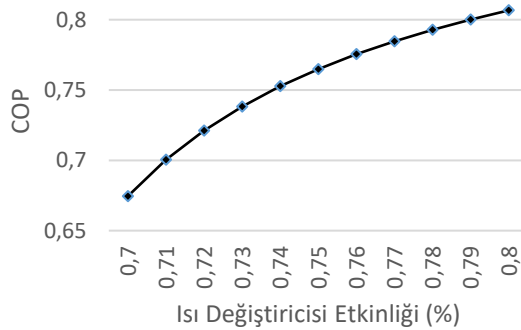


Şekil 9. Evaporatör sıcaklığındaki değişimin COP üzerindeki etkisi

Sistemde ortamdan ısı alan evaporatör sıcaklığı arttıkça soğutma performansının (COP) arttığı Şekil 10'da yer alan grafikte gözlemlenmektedir. Buna karşın Şekil 11'de görüldüğü üzere Kondenser I sıcaklığındaki artış sistemin soğutma performansını azaltmaktadır.



Şekil 10. Kondenser sıcaklığının atmosferin COP üzerindeki etkisi



Şekil 11. Isı değiştiricisi etkinliğinin COP üzerindeki etkisi

Absorpsiyonlu soğutma sisteminde yer alan ısı değiştiricisinin etkinliğinin artışı ile birlikte sistemin soğutma performansının arttığı gözlemlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Yapılan çalışmada var olan kaynakları daha verimli kullanmak amacıyla yerinde enerji üretimi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan trijenerasyon sistemi termodinamik olarak analiz edilmiş ve sistemin Isparta şartlarında bir binada kullanılması durumu modellenmiştir. Doğal gaz kullanarak binanın elektrik enerjisi, ısıtma ve soğutma ihtiyacının karşılanması incelenmiş ve bu ihtiyaçların karşılanması için öncelikle trijenerasyon sistemi tasarlanmış ve belirlenen çalışma şartları altında sistem performansı ortaya konulmuştur.

Belirlenen çalışma şartlarında aylık 1000 m³ doğal gaz tüketen trijenerasyon sisteminin elektrik üretimi 3.018 kW, ısıtma kapasitesi 10.12 kW ve soğutma kapasitesi 6.574 kW olduğu hesap edilmiştir. Bu kapasitelerde üretim yapabilen trijenerasyon sisteminin ısıl veriminin %24, COP'nin 0.68 ve toplam ekserji yokluğunun 8.49 kW olduğu belirlenmiştir.

Sistemin elemanlarının toplam yok olan ekserjideki payının en yüksek orandan düşüğe doğru sırasıyla kazanda %28, kondenser I'de %24, absorberde %14, generatörde %12, kondenser II'de %11 evaporatörde %9 ve türbinde %2 olduğu hesap edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar literatürde yer alan diğer çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer çalışmaları yapan Ilık (2012), Kojenerasyon sisteminin termodinamik analizi sonucunda en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %32 yoğuşturucu, %25 yanma odası, %23'ünde atık ısı kazanında olduğunu ortaya koymuştur [10]. Absorpsiyon soğutma sisteminde ise en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %37 kondenser %31 generatör ve %18'inde evaporatörde olduğu tespit etmiştir.

Ayrıca türbin giriş sıcaklığının yaklaşık %57 artırılması ile ısıl verimin ve elektrik üretimi kapasitesinin %62 arttığı bununla birlikte ekserji kayıplarının %14 azaldığı fark edilmiştir. Bunun yanı sıra kondenser I basıncının artırılmasının ısıl verimi düşürdüğü ve ekserji kaybını arttırdığı belirlenmiştir. Kondenser I basıncının %66 artması ile ısıl verim ve elektrik üretimi sadece %2 azalırken, ekserji kaybının yaklaşık iki katına çıktığı gözlemlenmiştir.

Sistemin soğutma kısmının elemanı olan evaporatör sıcaklığının yükselmesi ile COP artarken ekserji kayıplarının azaldığı ancak kondenser sıcaklığının yükselmesi ile COP'nin azaldığı buna karşılıklı ekserji

yokoluşunun arttığı ortaya koyulmuştur. Isı değiştiricisi etkinliğinin özellikle sistemin soğutma kısmında daha büyük değişikliklere sebep olduğu gözlemlenmiştir. Isı değiştiricisi etkinliğinin artışıyla COP'nin arttığı, ekserji kaybının ise azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] Köksal, B., (2006). *Türkiye'nin Enerji Politikası İçerisinde Bilesik Isı-Güç Üretiminin Yeri*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 140s, İstanbul.
- [2] Önal, E., Yarbay, Z., (2010). *Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği*. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 18, 77-96.
- [3] İskender, S., (2005). *Türkiye'de ve Dünyada Enerji & Nükleer Enerji Gerçeği*. 245s, Tütev Yayınları, Ankara.
- [4] Aydemir, M.O., (2010). *Dünyadaki Gelişmeler Işığında Türkiye'nin Enerji Kaynaklarının Güncel Bir Değerlendirmesi*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 138s, Ankara.
- [5] Doğan, M. (2001). *Sanayileşme ve Çevre Sorunları*. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 12-13 Ekim 2001, TMMOB, Kayseri, 245-251.
- [6] Akpınar, A., Komurcu, M. I., Kankal, M., Ozolcer, I.H., & Kaygusuz, K., (2007). *Energy Situation and Renewables in Turkey and Environmental Effects of Energy Use*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2013-39.
- [7] Biçer, T., (2009). *Elektrik Güç Sistemleri ve Kayıpları*. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 133s, Kütahya.
- [8] Küçüköner, C., (2016). *Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Kayıp Tahmin Yöntemleri ve Kayıpların Hesabı*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 115s, Elazığ.
- [9] Alkan, A., (2016). *Yenilenebilir Hibrit Enerji Kaynakları ile Beslenen Akıllı Enerji Depolama ve Yönetim Sistemi*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 160s, Kocaeli.
- [10] İlk, A., (2012). *Trijenerasyon Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Isparta.
- [11] Özdemir, N., 2011. *Çekmeköy İlçesi Toplu Konut Bölgeleri için Kojenerasyon Sistemlerinin Analizi*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 155s, Erzurum.
- [12] Ekinci, A., 2013. *Erzurum Kampüs Hastanesine Uygulanacak Trijenerasyon Sisteminin Fizibilitesi*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 156s, Erzurum.
- [13] Yazman, E., 2015. *0, 4 MW Trijenerasyon Sisteminin Modellenmesi, Motor Seçimi ve Verim Analizleri*. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Antalya.
- [14] Çengel Y.A, Boles M.A. (2007). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*. Güven Bilimsel Yayınevi. 864s İzmir, Türkiye.
- [15] Bejan, A. (1997). *Advanced Engineering Thermodynamics*, John Wiley and Sons, New York.
- [16] Bejan, A. (2002). *Fundamentals of Exergy Analysis Entropy Generation Minimization and The Generation of Flow Architecture*, International Journal of Energy Research, 26(2002), 545-565.
- [17] Yiğit, F., (2018) *Ev tipi uygulamalarda kullanılacak birleşik güç, soğutma ve ısıtma sisteminin uygulanabilirliğinin araştırılması ve termodinamik analizi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Isparta.

Bu çalışma 5-9 Eylül 2018 tarihinde, Prizren, Kosova'da ICONST 2018 (International Conference on Science and Technology) sempozyumunda özet olarak sunulmuştur.

Research Article/ Orijinal Makale

Comparative analysis of the performance and exergy efficiency of absorption cooling system for different working fluids

Mehmet ALTINKAYNAK¹, Arzu ŞENCAN ŞAHİN¹

¹Isparta University of Applied Sciences, Technology Faculty, Mechanical Engineering Department 32260, Isparta, TURKEY

Keywords

Absorption Cooling
Energy Analysis
Exergy Analysis
Irreversibility
Working fluids.

Article history:

Received: 02.11.2020
Accepted: 27.12.2020

Abstract: In this study, the first and second laws of thermodynamics have been employed to evaluate energy and exergetic efficiency of the single effect absorption cooling system. LiBr-H₂O, LiSSC and LiCl-H₂O were used as working fluid in the absorption cooling system. The energy, exergetic efficiency and circulation ratio values at various operating conditions for different working fluids were investigated. The results showed the absorption cooling system with LiCl-H₂O solution has the highest COP and exergetic efficiency value for different operating temperatures. In addition, the irreversibility values of each system component were calculated. The results showed that maximum irreversibility was occurred in the generator and absorber. EES program was used in all analyzes. Obtained results from this study can be used for optimization of absorption cooling system and obtaining optimum operating conditions.

To Cite:

Altinkaynak M. Şahin AŞ. Comparative analysis of the performance and exergy efficiency of absorption cooling system for different working fluids. International Journal of Technological Sciences, 12(3), 101-107, 2020.

Farklı çalışma sıvıları için absorpsiyonlu soğutma sisteminin performansı ve ekserji verimliliğinin karşılaştırmalı analizi

Anahtar Kelimeler

Absorpsiyonlu soğutma,
Enerji Analizi
Ekserji Analizi
Tersinmezlik
Çalışma Akışkanları

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 02.11.2020
Kabul Tarihi: 27.12.2020

Öz: Bu çalışmada, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları, tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserjik verimliliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Absorpsiyonlu soğutma sisteminde çalışma sıvısı olarak LiBr-H₂O, LiSSC ve LiCl-H₂O kullanılmıştır. Farklı çalışma akışkanları için çeşitli çalışma koşullarında enerji, ekzerjetik verimlilik ve sirkülasyon oranı değerleri incelenmiştir. Sonuçlar, LiCl-H₂O solüsyonlu absorpsiyonlu soğutma sisteminin farklı çalışma sıcaklıkları için en yüksek COP ve ekserjik verimlilik değerine sahip olduğunu gösterdi. Ayrıca her bir sistem bileşeninin tersinmezlik değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, jeneratörde ve soğurucuda maksimum tersinmezliğin oluştuğunu gösterdi. Tüm analizlerde EES programı kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar absorpsiyonlu soğutma sisteminin optimizasyonu ve optimum çalışma koşullarının elde edilmesi için kullanılabilir.

1. Introduction

The absorption cooling systems are becoming more attractive nowadays, especially because of their environmental friendliness and using of

renewable energy. The absorption cooling systems have been studied from both theoretical and experimental points of view. Some studies in literature related to first and second law analysis of absorption cooling systems were reported in Table 1.

Table 1. Some studies related to absorption cooling systems in literature

Working fluids	Topic	Authors
LiBr-water	Energy and exergy	Kaushik and Arora [1,2]
LiBr-water	Energy and exergy	Kaynakli et al. [3]
Ammonia-water	Energy and exergy	Aman et al. [4]
LiBr-H ₂ O and NH ₃ -H ₂ O	Exergy analysis	Khaliq and Kumar [5]
Ammonia-water	GAX, exergy	Eisavi et al. [6]
LiBr-water	Exergy analysis	Maryami and Dehghan [7]
LiBr-water	Energy and exergy	Razmi et al. [8]
LiBr-water	Exergy efficiency	Garcia-Hernando et al. [9]
LiCl-water	Exergy analysis	Gogoi and Konwar [10]
LiBr-water	Exergy analysis	Joybari and Haghghat [11]
LiBr-water	Triple effect absorption	Agarwal et al. [12]
LiBr-water	Energy, exergy, ANN	Singh and Verma [13]
LiBr-water	Optimization, Exergy	Mahalle et al. [14]
LiBr-water	Performance Optimization, Exergy	Canbolat et al. [15]
LiBr-water	Thermodynamic performance	Bagheri et al. [16]
LiBr-water	Exergetic Analysis	Parvez et al. [17]
LiBr-water	Cost Optimization	Colorado-Garrido [18]
LiBr-water	Energy and exergy	Mussati et al. [19]
EMISE-Water	Energy and exergy	Takalkar et al. [20]
LiBr-water	Energy and exergy	Panahi and Bozorgan [21]
LiBr-water	Energy and exergy	Modi et al. [22]

As seen above, numerous study has been conducted on absorption cooling. The energy-exergy, price optimization and system performance optimization of the refrigerants used in these studies (LiBr-water, Ammonia-water, LiBr-H₂O and NH₃-H₂O, LiCl-water, EMISE-Water) were performed.

Available literature, there is no information about thermodynamic performance of refrigerant of LiBrSCC on absorption cooling systems. In this study, as unlike from literature, comparative analysis of the performance and exergy efficiency of the absorption cooling system for different working fluids (LiCl, LiBr, LiBrSCC) were carried out. The irreversibility values for all system components of system were obtained.

2. System Description

Absorption cooling system is presented in Fig. 1. The system consists of absorber, solution pump, generator, evaporator, condenser, expansion valve and solution heat exchanger. As given Fig. 1, absorber output (1-2), the solution is abundant in refrigerant and solution pump drives the liquid from solution heat exchanger to the generator (2-3). LiCl, LiBr, LiBrSCC solutions were used as adsorber and water as cooling fluid water in the system. The temperature of solution rises in the heat exchanger. Thermal energy adds to generator and refrigerant quit from the solution. The refrigerant vapour (7-8) streams to the condenser. Refrigerant that condensed streams

from expansion valve to evaporator. Heat is drawn from the ambient and the refrigerant evaporates (9-10). Refrigerant that evaporates arrives to absorber (10-1). The solution at generator (7-4) outlet comes to the heat exchanger and cooled. The vapour refrigerant which came from evaporator is absorbed whereby liquid solution (6) [23].

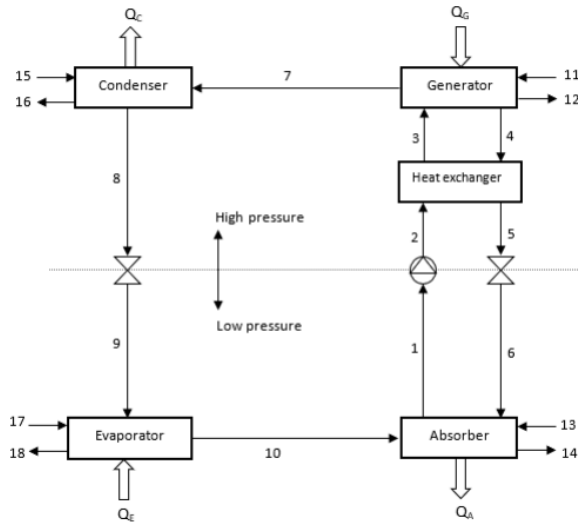


Figure. 1. Schematic diagram of absorption refrigeration system

First and second law of thermodynamics is applied to each component of the absorption system. Each component of system can be implemented as control volume with heat transfer, inlet and outlet association with work. In the system, mass preservation involves the mass balance of each component of the solution. Mass conservation equations for a steady state and a steady flow systems is [24].

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = 0 \quad (1)$$

$$\sum(\dot{m}x)_i - \sum(\dot{m}x)_o = 0 \quad (2)$$

Subscripts i and o shows mass inlet and mass outlet respectively and x is mass density of LiBr in the solution.

When kinetic and potential energy changes are negligible, the first law or energy balance relation for steady flow system:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum(\dot{m}h)_o - \sum(\dot{m}h)_i \quad (3)$$

An overall energy balance of the system requires that the sum of the generator, evaporator, condenser and absorber heat transfer must be zero.

Assuming that the absorption system model is steady and that pump operation and environmental heat losses are neglected,

The energy balance can be expressed as follows:

$$\dot{Q}_C + \dot{Q}_A = \dot{Q}_G + \dot{Q}_E \quad (4)$$

The ratio of solution mass flow rate through the pump to the mass flow rate refrigerant defined as the flow ratio (FR) and written as follows [23]:

$$FR = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_7} \quad (5)$$

The coefficient of performance (COP) for cooling of the system are obtained as:

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G} \quad (6)$$

The second law analysis is a used in determining the theoretical limits for the performance of commonly used engineering systems (refrigeration systems, heat pumps et al.). The second law defines perfection for thermodynamic process. It can be used to quantify the level of perfection of a process, and point the direction to eliminate imperfections effectively [25].

The second law of thermodynamics analysis applied to a system describes all loses both in the various components of the system and in the whole system. With the help of this analysis the magnitude of these loses or irreversibilities and their order of importance can be understood. With the use of irreversibility, which is a measure of process imperfection, the optimum operating conditions can easily be determined. The advantage of the second law analysis based on thermoeconomic optimization is that the different elements of the system could be optimized independently. It is possible to say that the second law analysis can indicate the possibilities of thermodynamic improvement of the process under consideration [26].

The entropy balance relation for a general steady-flow process can be expressed as following [25]:

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_o s_o - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (7)$$

Irreversibility can be defined as:

$$I = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (8)$$

The energy and entropy balance equations of the various components of an absorption system are given Table 2.

The exergy efficiency can be written as [22]:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{Q}_E \left(\frac{T_0}{T_E} - 1 \right)}{\dot{Q}_G \left(\frac{T_0}{T_G} - 1 \right)} \quad (9)$$

Table 2. The energy and entropy balance equations of absorption system components

Components	Energy Balance	Entropy Balance
Solution Pump	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{sp} = \dot{m}_2 h_2$	$I_{sp} = \dot{m}_1 T_0 (s_2 - s_1)$
Solution Heat Exchanger	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5$	$I_{SHE} = T_0 [\dot{m}_3 (s_3 - s_2) - \dot{m}_5 (s_4 - s_3)]$
Solution Expansion Valve	$h_5 = h_6$	$I_{SEV} = \dot{m}_6 T_0 (s_9 - s_8)$
Absorber	$\dot{Q}_A = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_1 h_1$	$I_A = T_0 [\dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_6 s_6 - \dot{m}_{10} s_{10} - \dot{m}_{13} (s_{13} - s_{14})]$
Generator	$\dot{Q}_G = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 h_3$	$I_G = T_0 [\dot{m}_4 s_4 - \dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_{11} (s_{11} - s_{14}) + \dot{m}_7 s_7]$
Condenser	$\dot{Q}_C = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8$	$I_C = T_0 [\dot{m}_7 (s_7 - s_8) - \dot{m}_{15} (s_{15} - s_{16})]$
Refrigerant Expansion Valve	$h_8 = h_9$	$I_{REV} = \dot{m}_5 T_0 (s_6 - s_5)$
Evaporator	$\dot{Q}_E = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_9 h_9$	$I_C = T_0 [\dot{m}_9 (s_{10} - s_9) - \dot{m}_{17} (s_{17} - s_{18})]$

3. Results and Discussion

The graph showing the changes of COP values according to generator temperatures for the absorption system using different fluids is given in Fig. 2. As seen from the graph, as the generator temperature increases, the value of the COP increases for three working fluids. When the generator temperature reaches 65°C for the fluids, it is seen that the COP values start to stabilize. Among the working fluids, the highest COP of the system was obtained for LiCl-H₂O fluid.

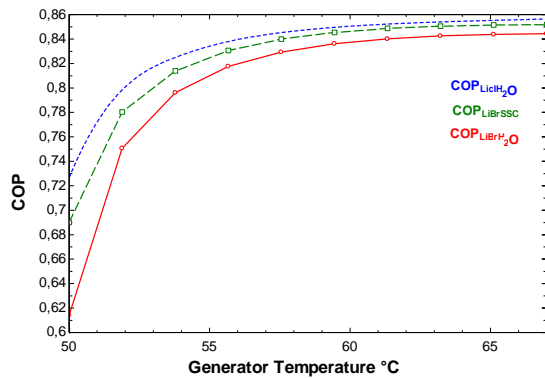


Figure 2. Role of generator temperature on COP values

For the three working fluids, the variation the COP with the absorber temperature is presented in Fig.3. As the absorber temperature for all fluids increases the COP decreases. Among the working fluids, the highest COP of the system was obtained for LiCl-H₂O fluid.

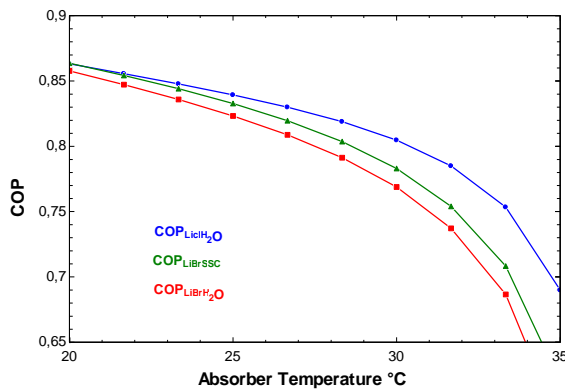


Figure 3. Role of absorber temperature on COP values

In Fig. 4, the variation of COP with the condenser temperature for three different fluids used in the absorption system is shown. While the condenser temperature increases, the COP decreases. LiCl-H₂O

fluid pair has the highest COP value in the system depending on the condenser temperature value. The variation the COP with the evaporator temperature is seen in Fig.5. While the evaporator temperature increases, the COP increases. It was observed that the system working with LiBr-SSC working fluid at the evaporator temperature above 6.5 °C had higher COP values.

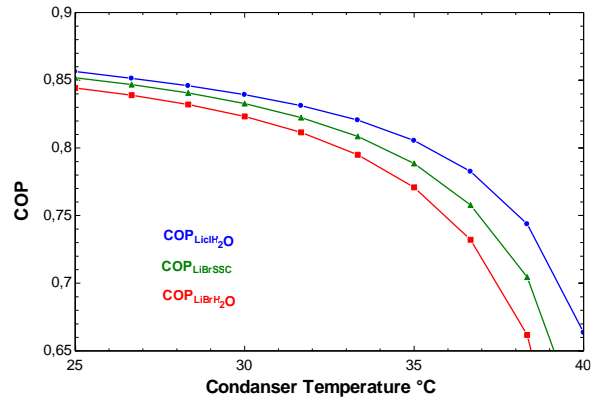


Figure 4. Role of condenser temperature on COP values

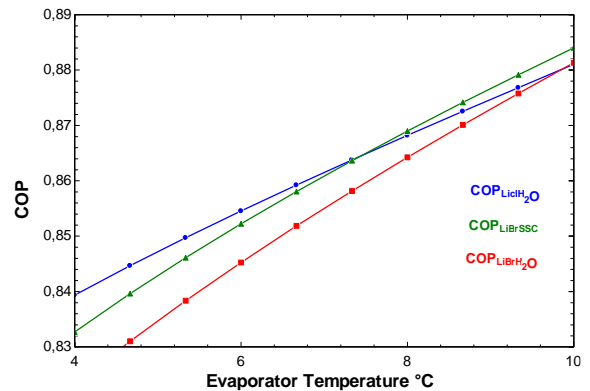


Figure 5. Role of evaporator temperature on COP values

In Fig. 6, the variation of the exergy efficiency of the absorption cooling system with absorber temperature is presented. As the absorber temperature increases, the exergy efficiency decreases. In addition, the LiBr-H₂O fluid couple has lower exergy efficiency than the other working fluids.

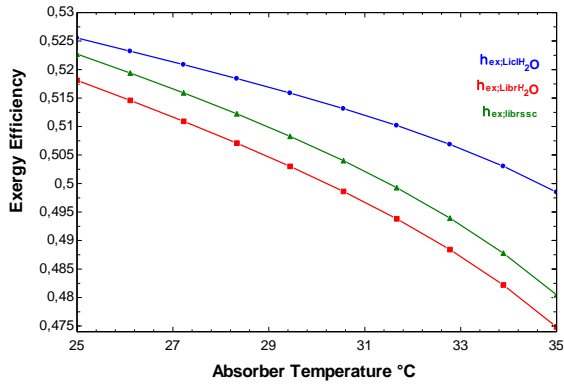


Figure.6. Role of absorber temperature on exergy efficiency

The relationship between the exergy efficiency and generator temperature for the fluid pairs used in the system is given in Fig. 7. As the generator temperature increases, the exergy efficiency decreases. For LiBr-H₂O and LiSSC fluid couples, the exergy efficiency of the absorption cooling system with the generator temperature is affected at the same rate.

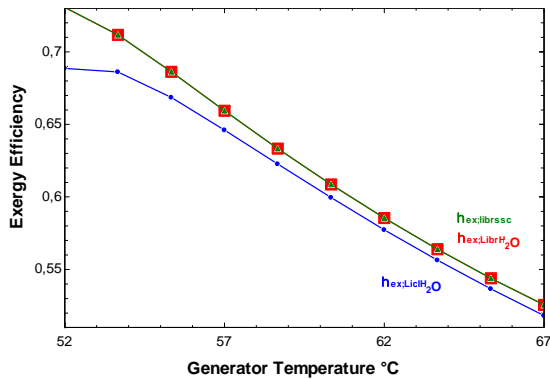


Figure. 7. Role of generator temperature on exergy efficiency

The relationship between the condenser temperature and the exergy efficiency of the system is shown in Fig. 8. As the condenser temperature increases, the exergy efficiency decreases. Exergy efficiencies are from highest to lowest, respectively, LiBr-H₂O, LiBrSSC and finally LiCl-H₂O fluid pairs. The exergy efficiency of the system depending on the evaporator temperature is shown in Fig. 9. It was determined that there was an inverse ratio between the evaporator temperature and the exergy efficiency of the system. In all three fluid pairs, as the evaporator temperature increases, the exergy efficiency decreases.

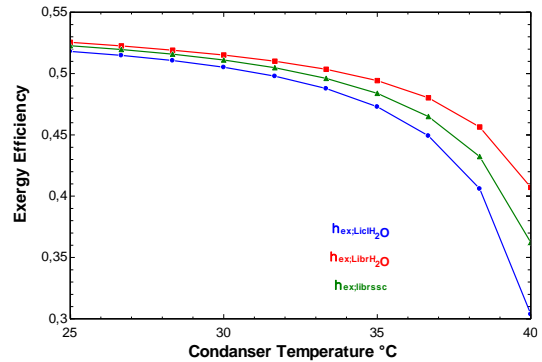


Figure. 8. Role of condenser temperature on exergy efficiency

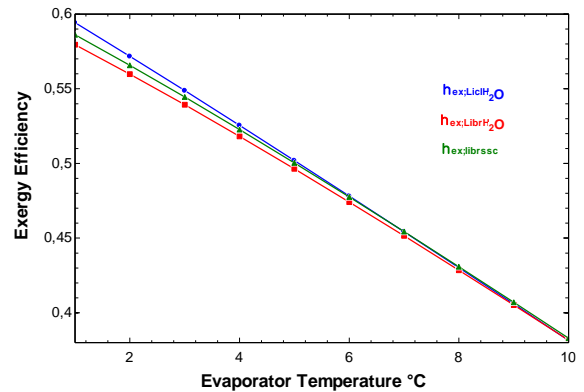


Figure. 9. Role of evaporator temperature on exergy efficiency

Fig.10 and Fig.11 show the variation between the flow ratio (FR) and evaporator and generator temperatures for different fluid pairs. Flow ratio values are seen decrease with increasing temperature. In Fig.12, effect of condenser temperature on flow ratio is seen. As the condenser temperature increases, the flow ratio values increase.

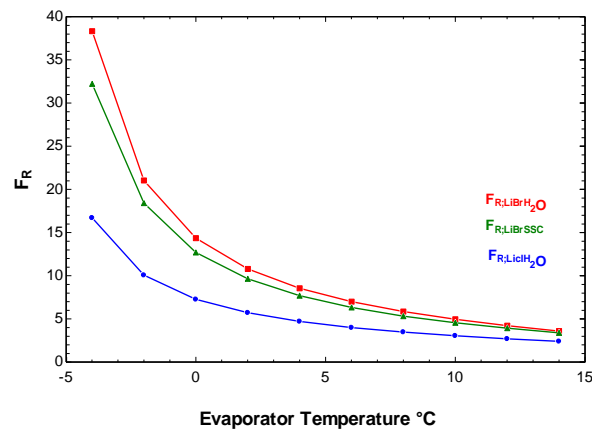


Figure. 10. Effect of evaporator temperature on flow rate

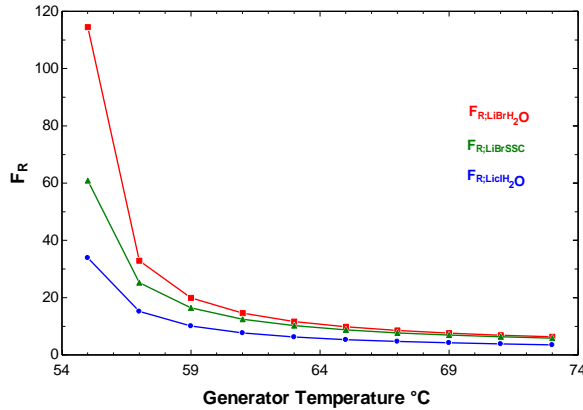


Figure 11. Effect of generator temperature on flow rate

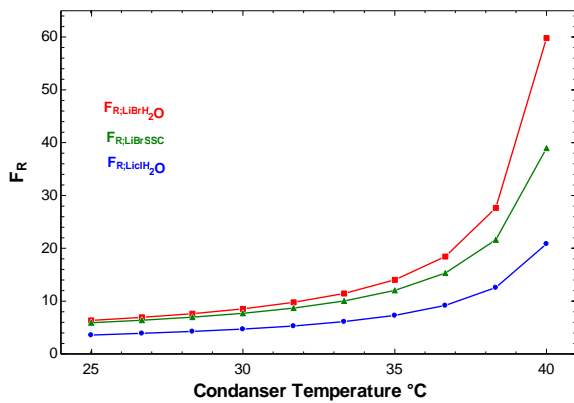


Fig. 12. Effect of condenser temperature on flow rate

Fig. 13. shows the relative irreversibility (exergy destruction) of each component of the absorption cooling system. For all fluid pairs, it is seen that the absorber has the highest irreversibility. The next highest irreversibility has occurred in the generator. Among the fluid pairs, the highest irreversibility in the system belongs to the system operating with the LiBrSSC fluid pair. Since irreversibility in the pump and expansion valves are small then their effect on the total irreversibility could be neglected.

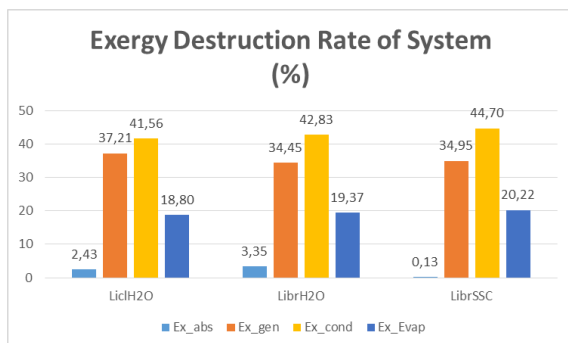


Figure 13. Role of exergy destruction rate of system (%)

4. Conclusion

In this work, comparative analysis of the performance and irreversibility of the single effect absorption cooling system for LiBr-H₂O, LiSSC and LiCl-H₂O working fluids was performed. The performance parameters computed are coefficient of performance (COP), irreversibility and exergetic efficiency. The results show that COP of the single effect system lies in range of 0.6–0.88. The flow ratio (FR) has a strong effect on the system performance. The relationship between the FR with evaporator, generator and condenser temperatures was investigated. It was shown that the obtained results were found in parallel to the system component temperature and the COP changing. Exergy efficiency of the single effect system lies in range of 0.3–0.73. Irreversibility is highest in the generator and absorber when compared to other system components. Obtained results from this study can be used for optimization of absorption cooling system and obtaining optimum operating conditions.

5. References

- [1] Kaushik SC, Arora, A. Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water–lithium bromide absorption refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration.*, 32(6), 1247–1258, 2009.
- [2] Arora A, Kaushik, SC. Theoretical analysis of LiBr/H₂O absorption refrigeration systems. *International Journal of Energy Research.*, 33, 1321–1340, 2009.
- [3] Kaynakli O, Saka K, Kaynakli F. Energy and exergy analysis of a double effect absorption refrigeration system based on different heat sources. *Energy Conversion and Management.*, 106, 21–30, 2015.
- [4] Aman J, Ting DK, Henshaw P. Residential solar air conditioning: Energy and Exergy analyses of an ammonia–water absorption cooling system. *Applied Thermal Engineering.*, 62(2), 424–432, 2014.
- [5] Khaliq A, Kumar R. Exergetic analysis of solar powered absorption refrigeration system using LiBr-H₂O and NH₃-H₂O as working fluids. *International Journal of Exergy.*, 4(1), 1–18, 2007.
- [6] Eisavi B, Khalilarya S, Chitsaz A, Rosen MA. Thermodynamic analysis of a novel combined cooling, heating and power system driven by solar energy. *Applied Thermal Engineering.*, 129, 1219–1229, 2018.
- [7] Maryami R, Dehghan, AA. An exergy based comparative study between LiBr/water absorption

- refrigeration systems from half effect to triple effect. *Applied Thermal Engineering*, 124, 103-123, 2017.
- [8] Razmi A, Soltani M, Kashkooli, F.M, Farshi, L.G. Energy and exergy analysis of an environmentally-friendly hybrid absorption/recompression refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 164, 49-59, 2018.
- [9] Hernando NG, Vega MD, Verdugo AS, Delgado, SS. Energy and exergy analysis of an absorption power cycle. *Applied Thermal Engineering*, 55(1-2), 69-77, 2013.
- [10] Gogoi T.K, Konwar D. Exergy analysis of a H₂O–LiCl absorption refrigeration system with operating temperatures estimated through inverse analysis. *Energy Conversion and Management*, 110, 436-447, 2016.
- [11] Joybari MM, Haghghat F. Exergy analysis of single effect absorption refrigeration systems: The heat exchange aspect. *Energy Conversion and Management*, 126, 799-810, 2016.
- [12] Agarwal S, Arora A, Arora, BB. Energy and exergy analysis of vapor compression– triple effect absorption cascade refrigeration system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(3), 625-641, 2020.
- [13] Singh D.V, Verma TN. Energy and exergy analysis of LiBr-H₂O-operated vapour absorption refrigeration system using the ANN approach. *International Journal of Ambient Energy*, 1-14, 2019.
- [14] Mahalle, K, Parab P, Bhagwat S. Optimization of cooling load in the combined vapour absorption–vapour compression refrigeration cycle using exergy analysis. *Indian Chemical Engineer*, 61(1), 52-66, 2019.
- [15] Canbolat AS, Bademlioglu, AH, Arslanoglu N, Kaynakli O. Performance optimization of absorption refrigeration systems using Taguchi, ANOVA and Grey Relational analysis methods. *Journal of Cleaner Production*, 220, 874-885, 2019.
- [16] Bagheri B.S, Shirmohammadi R, Mahmoudi, S.M.S., Rosen M.A. Optimization and comprehensive exergy-based analyses of a parallel flow double-effect water-lithium bromide absorption refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, 152, 642-653, 2019.
- [17] Parvez M, Khalid F, Khan O. Thermodynamic performance assessment of solar-based combined power and absorption refrigeration cycle. *International Journal of Exergy*, 31(3), 232-248, 2020.
- [18] Colorado GD. Advanced exergetic analysis of a double-effect series flow absorption refrigeration system. *Journal of Energy Resources Technology*. 142(10), 104503, 2020.
- [19] Mussati SF, Mansouri, SS, Gernaey KV, Morosuk T, Mussati M.C. Model-based cost optimization of double-effect water-lithium bromide absorption refrigeration systems. *Processes*, 7, 50-65, 2019.
- [20] Takalkar GD, Bhosale RR, Mali NA, Bhagwat SS. Thermodynamic analysis of EMISE–Water as a working pair for absorption refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, 148, 787-795, 2019.
- [21] Panahi Z.F, Bozorgan N. The energy and exergy analysis of single effect absorption chiller. *Majlesi Journal of Mechanical Engineering*, 4, 19-26, 2011.
- [22] Modi B, Mudgal A, Patel B. Energy and exergy investigation of small capacity single effect lithium bromide absorption refrigeration system. *Energy Procedia*, 109, 203-210, 2017.
- [23] Herold KE, Radermacher R, Klein, SA. Absorption chillers and heat pumps. 2nd ed. CRC Press; 2016.
- [24] Rivera W, Best R, Hernández J, Heard CL, Holland FA. Thermodynamic study of advanced absorption heat transformers—I. Single and two stage configurations with heat exchangers. *Heat Recovery Systems and CHP*. 1994;
- [25] Cengel YA, Boles MA. *Thermodynamics An Engineering Approach*. 8th Ed. McGraw-Hill Education, New York, USA, 2015.
- [26] Porumb R, Porumb B, Balan M. Numerical investigation on solar absorption chiller with LiBr-H₂O operating conditions and performances. *Energy Procedia*, 112, 108-117, 2017.

Nomenclature

h	: enthalpy (kJ/kg)
I	: rate of irreversibility (kW)
\dot{m}	: mass flow rate (kg/s)
Q	: heat load (kW)
s	: specific entropy (kJ/kgK)
T	: temperature (K)
W	: work (kW)
x	: mass concentration of LiBr in the solution (%)

Subscripts

A	: absorber
C	: condenser
E	: evaporator
EV	: expansion valve
G	: generator
i	: inlet
SHE	: solution heat pump
SP	: solution pump
T	: total
W	: work
o	: out
0	: ambient

Derleme Makale/Review Article

4 boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanlarının araştırılması

Berkay Ergene¹, Bekir Yalçın²

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 03204, Afyonkarahisar, Türkiye

Anahtar Kelimeler

4-B baskı
3-B baskı
Eklemeli imalat
Akıllı malzeme

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 10.02.2020

Kabul Tarihi: 07.09.2020

Öz: Hayal gücünü üç boyutlu olarak gerçek bir ürüne dönüştürmeye olanak sağlayan üç boyutlu baskı (3D Printing) teknolojisinin uzay-havacılık sektöründen sağlık sektörüne dek birçok farklı alanda yer almaya başladığı ve kullanımının da giderek arttığı bilinmektedir. Teknolojinin durdurulamaz gelişimi ile birlikte yeni malzemelerin ve imalat yöntemlerinin ortaya çıkması ya da var olanların geliştirilmesinin gerekliliği de kaçınılmaz bir gerçek haline gelmiştir. İçerisinde üç boyutlu (3B) baskı teknolojisini de barındıran dört boyutlu (4B) baskı teknolojisi de bu adımlardan yalnızca birisi olarak karşımıza çıkmakta olup, akıllı malzemeden üç boyutlu olarak basılmış ürünlerin, ısı, su, ışık vb. dış uyarıcılarla uyarılması ile bu ürünlerin zamanla şekil değiştirmesine olanak tanımaktadır. Yapılan bu çalışmada ise 4B baskı teknolojisi ve bileşenleri incelenerek, bu teknolojinin gelişim süreci ve potansiyel uygulama alanları hakkında ülkemiz araştırmacılarına ve mühendislerine bir takım faydalı bilgiler sunulmaya çalışılmıştır.

Atıf için/To Cite:

Ergene, B., Yalçın B. 4 Boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanları. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12(3), 108-117, 2020.

Investigation of 4D printing technology and application areas

Keywords

4-D printing
3-D printing
Additive manufacturing
Smart material

Article history:

Received: 10.02.2020

Accepted: 07.09.2020

Abstract: It is known that three-dimensional (3D) printing technology which enables to transform an imagination into 3D real product, has started to take place in many different areas from the space-aviation sector to the health sector and its usage is gradually increasing. With the unstoppable development of technology, the emergence of new materials and manufacturing methods or the necessity of developing existing ones has become an inevitable fact. Four-dimensional (4D) printing technology which also includes 3D printing technology as one of the steps of 4D printing and this 4D printing technology allows the 3D printed products from smart materials to change their shape over time when these 3D printed products are stimulated by external stimulus such as heat, water, light or etc. In this study, 4D printing technology and components have been examined and some useful information has been tried to be presented to our country's researchers and engineers about the development process and potential application areas of this technology.

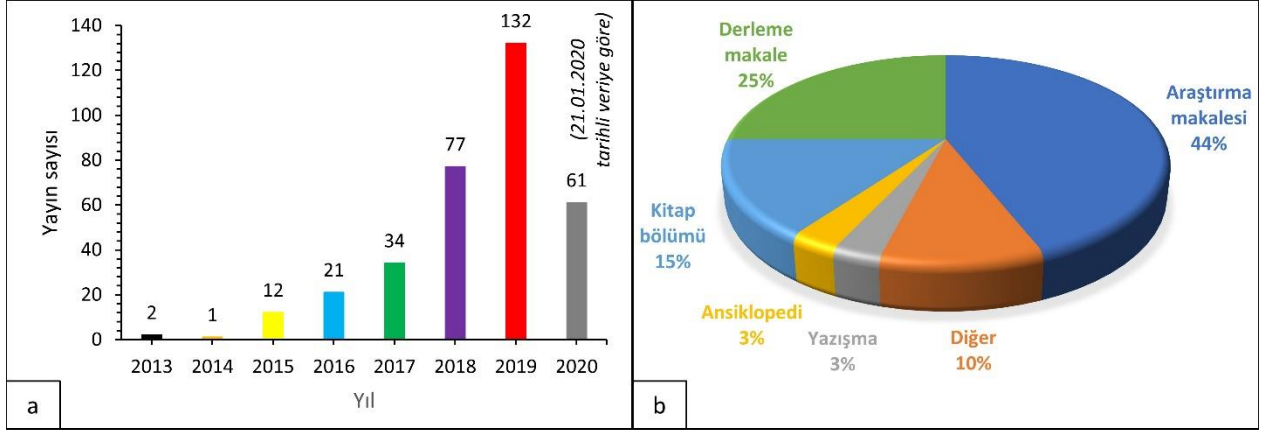
1. Giriş

Dört boyutlu baskı (4D printing) ifadesi ilk kez 2013 yılında bir TED konuşmasında, üç boyutlu imal edilen statik nesnelerin zamanla şekillerini değiştirmelerine olanak sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmış olup [1], 4B baskı ile ilgili ilk araştırma makalesi de aynı yıl içerisinde basılı sac halindeki aktif kompozitin şekil hafıza etkisini kullanarak karmaşık bir şekle dönüşmesi

üzerine yazılmıştır [2]. 4B baskı teriminin tanıtılması ve ilk makale çalışması sonrasında araştırmacılar 3B baskı teknolojisi ve akıllı malzemeleri kullanan 4B baskı teknolojisi üzerine odaklanmışlardır. İlk olarak 4B baskı ifadesi, zaman dördüncü boyut olmak üzere "3B baskı + zaman" olarak tanımlansa da [3],[4], zamanla bu tanım ısı [5], su [6], ışık [7], pH [8] vb dış uyarılara maruz kaldığında özelliklerinde ve şeklinde değişim meydana gelen 3B baskı ürünlerinin imalatı olarak

geliştirilmiştir. 4B baskı teknolojisinin gelecek on yıl içerisinde daha da önem kazanacağı tahmin edilmekte, ilk olarak tanımlandığı 2013 yılından itibaren günümüze dek tüm yıllarda yapılan yayın çalışmaları Sciencedirect bilimsel makale araştırma sayfasından “4D Printing” ifadesi ile taranarak toplam 340 adet akademik çalışma bulunmuş olup, Şekil 1’deki grafikler elde edilmiştir. Şekil 1a’dan da görülebileceği üzere bu

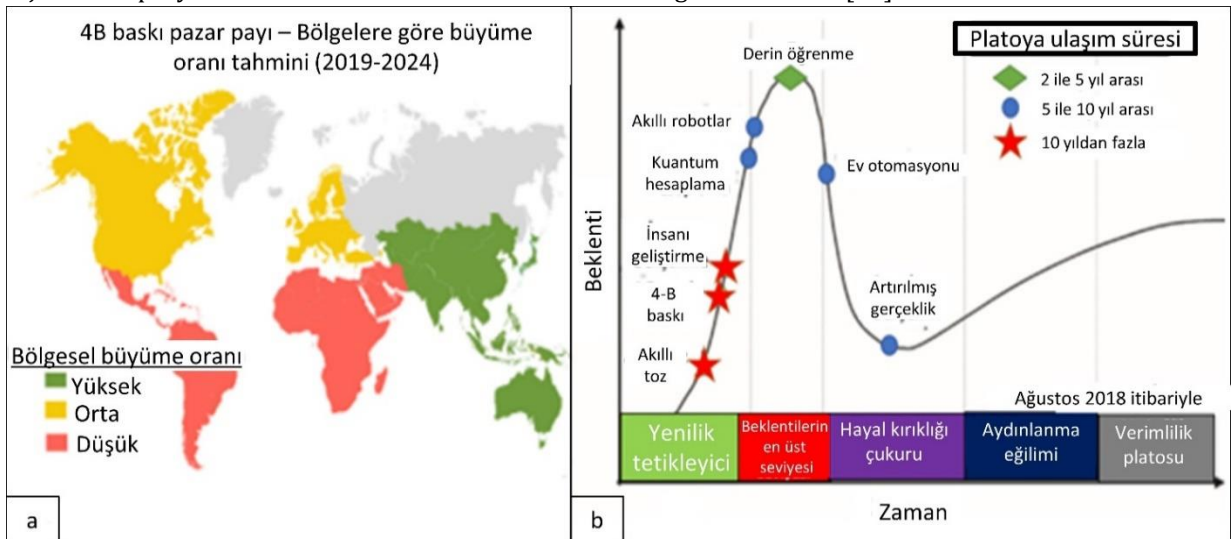
konu ile ilgili yapılan akademik çalışmaların sayısı 2019 yılında 132 adet iken, 22.01.2020 tarihi ile daha şimdiden 61 adete ulaşmıştır. Bu yayınların %44’ünü araştırma makalesi, %25’ini derleme makale, %15’ini kitap bölümü, %3’ünü ansiklopedi, %3’ünü yazışmalar ve %10’luk kısmını ise diğer yayın türleri oluşturmaktadır (Şekil 1b).



Şekil 1. 4B baskı ile ilgili yapılan akademik çalışmalar, a) Yıllara göre yayın sayısı, b) Yüzdesele olarak ne tür yayınların yapıldığı [9]

4B baskı teknolojisinin market payına baktığımızda da 2019 yılında yaklaşık 71 milyon \$ iken 2025 yılında ise yaklaşık 359 milyon \$'a ulaşması beklenmektedir [10]. 4B baskı teknolojisinde en önemli market liderlerinin ABD menşeli olan, 3B baskı ve eklemeli imalat üzerine de faaliyetlerini sürdüren Autodesk, Stratasys, 3D Systems Corporation, Hewlett Packard Enterprise ve ExOne şirketlerinin olduğu göze çarpmaktadır [10]. Şekil 2a’da 4B baskı pazar payının bölgelere büyüme oran beklentileri, Şekil 2b’de ise yenilikçi teknolojileri kapsayan Gartner’ın zaman-beklenti

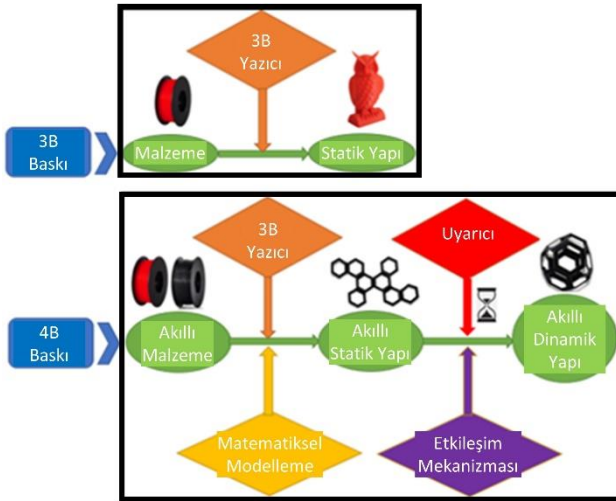
döngüsü verilmiştir. Yenilikçi teknolojilerin zamanla hangi aşamaya ulaşacağını tahmini üzerine oluşturulan bu döngüde akıllı robotlar, derin öğrenme, artırılmış gerçeklik ve 4B baskı teknolojileri gibi son zamanlarda popüler hale gelen teknolojilere yer verilmiştir. Gartner döngüsüne göre bir teknoloji, verimli bir ürünü belirli aşamaları geçtikten sonra sunabilecektir ki bu sürede derin öğrenme için 2 ile 5 yıl arası, artırılmış gerçeklik için 5 ile 10 yıl arası iken, 4B baskı teknolojisi için 10 yıldan fazla olarak öngörülmektedir [11].



Şekil 2.a) 4B baskı pazar payının bölgelere göre büyüme oranının tahmini, b) Gartner döngüsü [11]

2. 3B Baskı ile 4B Baskı Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve 4B Baskı Yönteminin Temel Bileşenleri

3B baskı ile 4B baskı arasındaki temel farklılıklar Şekil 3'te gösterilmiştir [12]. 3B baskı yönteminde 2 boyutlu katmanlar üst üste getirilerek 3B statik bir yapı elde edilirken, 4B baskı yönteminde akıllı malzemeler kullanıldığından dolayı ve dış uyarının etkisinden dolayı zamanla üretilen akıllı statik yapı, akıllı dinamik yapıya dönüşmektedir. Ayrıca, 4B baskı yönteminde akıllı malzemelerin programlanabilir olması da bu yöntemin 3B baskı yönteminden farklı olmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, 4B baskı ürünleri dinamik bir yapıya sahip olduklarından kullanım alanları ve potansiyel uygulamalar açısından statik 3B baskı ürünlerine oranla avantajlara sahiptir [13].



Şekil 3. 3B ve 4B baskı yöntemleri arasındaki temel farklılıklar [12]

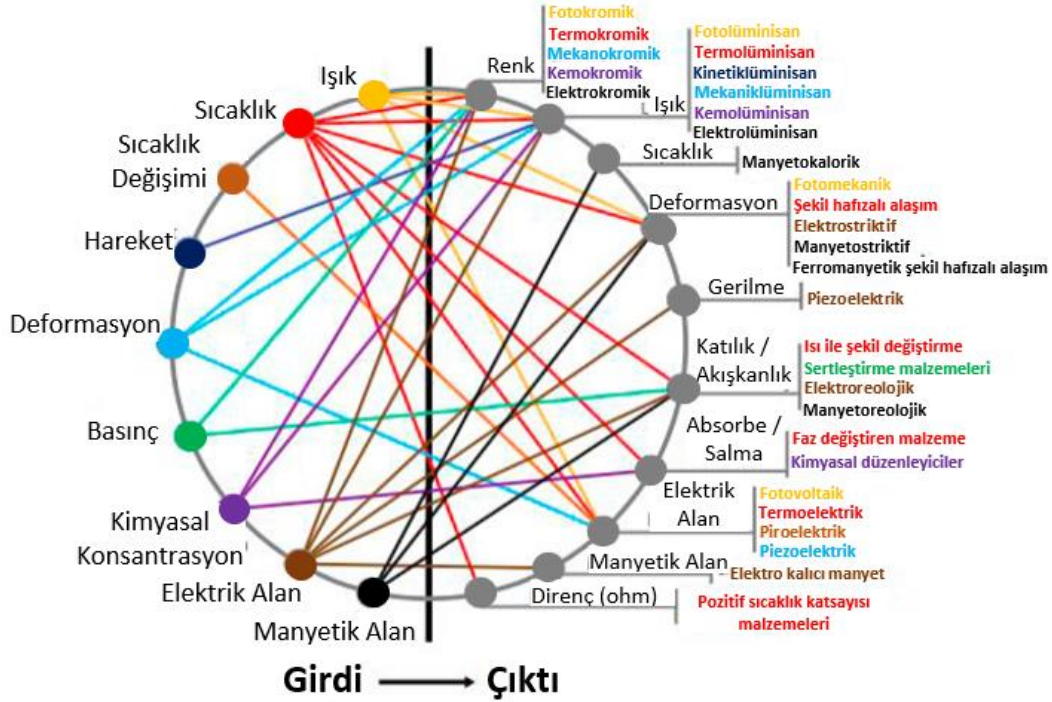
3B baskının aksine dinamik yapılar düzenlenebilir şekilleri, özellikleri ve işlevselliği ile 4B baskı teknolojisi kullanılarak üretilmektedir [4],[6],[14]. Bu tür bir dinamik ürünü basabilmek için, akıllı malzemelerin uygun bir kombinasyonu, yapıdaki çoklu malzemelerin dağılımını tasarlamak için matematiksel bir modelleme, 3B baskı sistemi, dış uyarıcı ve etkileşim mekanizması gereklidir. Şekil 4'te 4B baskı yönteminin temelleri gösterilmiştir [12].



Şekil 4. 4B baskının temelleri [12]

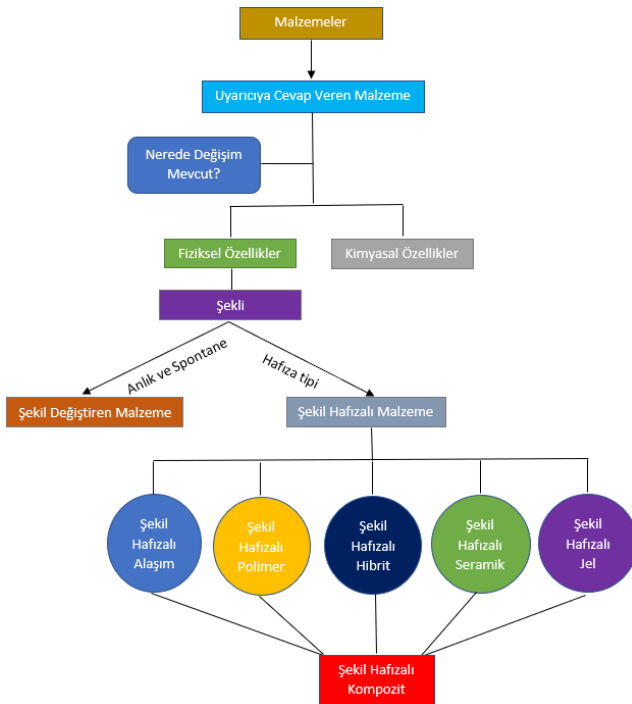
3B Baskı: 4B baskı çoğunlukla birden çok malzeme kombinasyonunun tek bir seferde basımına ihtiyaç duymaktadır. Termal genleşme katsayısı gibi malzeme özelliklerindeki farklılıklardan dolayı yapılarda şekil değişimi meydana gelmektedir. Bu nedenle, 3B baskı 4B baskının bir gereksinimi olarak görülmektedir. Şu an itibariyle, 4B baskı yöntemi eriyik yığıma modelleme [15], stereolitografi [16], lazer destekli biyobaskı [17] ve seçici lazer ergitme [18]. 3B yazıcının seçimi farklı akıllı malzeme türlerine göre dikkatlice yapılmalıdır.

Uyarıcı: 4B basılı yapının şekil / özellik / işlevsellik değişikliklerini tetiklemek için uyarıcı gereklidir. Araştırmacılar 4B baskıda genellikle su [3],[19], ısı [20], ısı ve ışık kombinasyonu [7] ve ısı ile su kombinasyonunu [21] kullanmışlardır. Spesifik uygulamanın gereksinimine göre, uyarıcı seçilmeli ve ayrıca 4B basılı yapıda kullanılan akıllı malzeme türleri de belirtilmelidir [12]. Addington ve Schodek çalışmalarında [22], akıllı malzemelerin genel olarak dolaysızlık, geçici olma, kendini çalıştırma, doğruluk ve seçicilik gibi 5 karakteristik özelliğe sahip olmasını tavsiye etmektedirler. Akıllı malzemelerin faydalarını ölçmek için, uyarılara ve kullanıcılara yanıt verebilirliklerine bağlı olarak doğru bir sınıflandırma yapılmalıdır. Uyarıcıyı ve yanıtı bağlayan geçiş olaylarının grafiği Şekil 5'te görülmektedir [23]. Açıklayıcı bir örnek vermek gerekirse, hareket girdisi yalnızca ışık çıktısı olarak sonuç verirken, elektrik alan girdisi ise renk, ışık, deformasyon, gerilme ve katılık/akışkanlık olmak üzere 5 farklı çıktı sunabilmektedir. Ayrıca, akıllı malzemelerin bir başka yönü de girdiler ve çıktılar ile etkileşimleridir ve iki yönlü ya da denge şeklinde gerçekleşebilir. Örnek olarak, iki yönlü olarak piezoelektrik akıllı malzemelerin geliştirilmesi verilebilir; deformasyon üreterek bir elektriksel uyarana tepki gösterirler ve elektrik üreterek deformasyona daha fazla tepki verirler [24],[25].



Şekil 5. Uyarıcı ve yanıt ilişkisinin detaylı olarak gösterilmesi [23]

Akıllı ya da uyarıcıya cevap veren malzemeler: Akıllı malzemeler ya da uyarıcıya cevap veren malzemeler 4B baskı işleminin en önemli bileşenlerinden birisi olup bu malzemeler Şekil 6'da görüldüğü üzere belirli alt başlıklara ayrılmıştır [26].

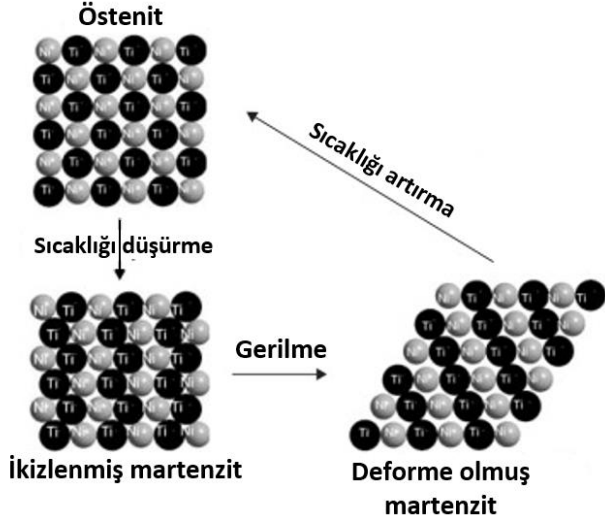


Şekil 6. Uyarıcıya cevap veren malzemelerin sınıflandırılması [26]

Ayrıca, bu malzemeler şekil değişimi gibi fiziksel özelliklerinin değişimine göre Şekil Değiştiren Malzemeler (ŞDM) ve Şekil Hafızalı Malzemeler (ŞHM) olarak iki sınıfa ayrılmaktadırlar. ŞDM'ler uygun bir uyarıcıyı kullanarak yapılarını aniden değiştirmektedirler. Açıklayıcı bir örnek olarak, piezoelektrik polimerler, bir elektrik alanının geri dönüşümlü olarak uygulanması üzerine şekillerini değiştirebilir [27] veya sıvı kristaller, moleküllerin belirli bir yön boyunca paralel düzenlenmesi sonucunda şekillerini değiştirebilir [28]. Ayrıca, ŞHM'ler uygun bir uyarıcı ile uyarıldığında ilk haline dönebilen ya da denge durumunda kalmayan malzeme grubu olarak bilinmektedir [29]. Ek olarak, ŞHM'ler şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), şekil hafızalı polimerler (ŞHP), şekil hafızalı seramikler (ŞHS), şekil hafızalı jeller (ŞHJ) ve şekil hafızalı hibritler (ŞHH) olmak üzere 5 grupta değerlendirilebilir [26].

ŞHA: Bu malzemeler martenzitik geçişe dayanan şekil hafızası etkisi sergilemektedir. Burada martenzitik fazı, sistemin daha yüksek bir sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklığa soğutulmasıyla elde edilmektedir. Yüksek sıcaklık fazı kübik simetriyi gösteren östenit olarak adlandırılırken, düşük sıcaklık fazı martenzittir. Martenzitik fazı %8'e kadar deforme olabilir ve deformasyon sadece östenit fazını elde etmek için malzeme ısıtılarak geri kazanılabilir ve yük ve sıcaklığın, nikel-titanyum alaşımlarındaki şekil hafızası etkisi üzerindeki etkisi Şekil 7'de gösterilmiştir [30]. En çok

kullanılan şekil hafızalı alaşımlar nikel-titanyum alaşımı, bakır-çinko-alüminyum ve bakır-alüminyum-nikel alaşımları olarak sınıflandırılabilir [31] ve iyi biyoyumluluklarından dolayı biyomedikal uygulamalar için son derece tercih edilirler [32],[33].



Şekil 7. ŞHA olan Ni-Ti alaşımında şekil hafızası etkisi [30]

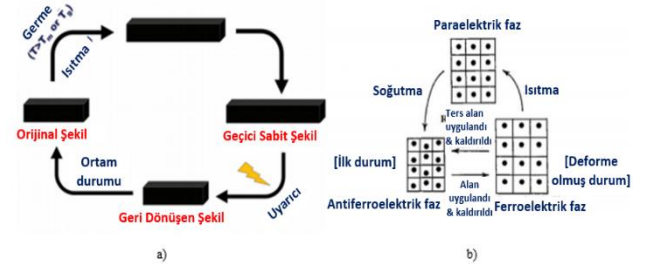
ŞHP: Şekil hafızası etkisi sergileyen polimerler ŞHP olarak adlandırılır ve mekanizmaları ŞHA'dan tamamen farklıdır. ŞHP'ler büyük ölçüde şekil hafıza etkisi için cam geçiş sıcaklığına (T_g) bağlıdır ve T_g sıcaklığının altında moleküller çok az göreceli hareket kabiliyetine sahip olup camı bir durumdadırlar. T_g genellikle amorf fazlara uygulanabilir ve T_g 'nin üzerinde ikincil olarak, polimer zincirleri arasındaki bağlar termal harekete kıyasla zayıf hale gelir ve polimer kauçuklaşır [34] ve ŞHP'lerin şekil hafıza davranışının şematik gösterimi Şekil 8a'da verilmiştir. Ayrıca ŞHP'ler genellikle biyomedikal ve tekstil endüstrilerinde kullanılmaktadırlar [35],[36].

Ek olarak, Tablo 1'de ŞHP ve ŞHA'lar özellikleri bakımından kıyaslanmış olup, ŞHP'ler ŞHA'lara göre farklı bir mekanizmaya sahip olmalarının yanı sıra daha hafif olma, daha basit yöntemlerle özelliklerinin değiştirilmesi, daha yüksek geri dönüşüm deplasman değeri göstermeleri, daha çok uyarıcı tarafından tetiklenebilmeleri ve maliyetlerinin düşük olmasından dolayı çok daha avantajlıdırlar ve bu özellikler ŞHP'leri 4B baskı için en iyi akıllı malzeme yapmaktadır [37-41].

Tablo 1. ŞHP ile ŞHA'ların kıyaslanması [42]

Özellik	ŞHP	ŞHA
Yoğunluk (g/cm^3)	0.9-1.2	6-8
Deformasyon derecesi	%800'e kadar	%8'den az
Deformasyon için gerekli gerilme (MPa)	1-3	50-200
Geri dönüşüm sırasında ortaya çıkan gerilme (MPa)	1-3	150-300
Geçiş sıcaklığı ($^{\circ}C$)	-10 ile 100 arası	-10 ile 100 arası
Geri dönüşüm hızı	1 saniye ile 1 dakika arası	1 saniyeden az
Uygulama koşulu	200 $^{\circ}C$ 'den düşük, düşük basınç	1000 $^{\circ}C$ 'den yüksek, yüksek basınç
Maliyet	1 kg için yaklaşık 100 TL	1 kg için yaklaşık 2500 TL

ŞHS: Alaşımlara benzer bir etki, belirli bir faz geçişine, yani bir "ferro elastik" faz geçişine sahip seramiklerde görülmektedir. Yapılan bir çalışmada ise, bir CeO_2 -stabilize tetragonal zirkonya (ZrO_2) polikristalinde şekil hafızası etkisini ve süper esnekliği incelemişlerdir. Tek eksenli basma durumunda, Ce katkılı zirkonyumda stresle indüklenen tetragonal-monoklinik geçiş nedeniyle numune plastik deforme olmaktadır [43]. Ayrıca, Şekil 8b'de, antiferroelektrik seramikler için şekil hafızası etkisi gösterilmiştir.



Şekil 8. a) ŞHP'lerde şekil hafıza etkisi b) ŞHS'lerde şekil hafıza etkisi [34]

ŞHJ: Son yıllarda araştırmacılar şekil hafızalı jelle (ŞHJ) odaklandılar ve akıllı bir malzeme olarak gelecekteki talebi karşılayabilecek en umut verici yeni malzemelerden biri olarak görmektedirler [44],[45]. ŞHJ'ler jelleşme işlemi sırasında orijinal şekillerini hatırlayabilmektedir ve bu duruma da şekil geri dönüşüm özelliği denmektedir. ŞHJ'ler faz durumunu değiştirdiği kritik sıcaklığın üzerine ısıtıldığında elastik ve yumuşak olmaktadır [46]. Deformasyondan sonra, jel kritik sıcaklığın üzerinde ısıtıldığında orijinal haline dönebilmektedir. Bu jeller biyoyumlu ve geri dönüştürülebilir olduğundan kırık bir kemiğe bandaj [47], optik lens yapımında [48] ya da akıllı bir buton yapımında [49] kullanılması uygundur.

ŞHH: Şekil hafızalı hibritler (ŞHH) mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmişlerdir [38]. Bir ŞHH malzeme biri elastik bileşen ve diğeri ise geçiş bileşeni olmak üzere genellikle en az iki bileşen ihtiva etmektedir. Bu kombinasyonda, elastik bileşen daima aşırı elastiktir ve programlamadan sonraki elastik enerjiyi depolamaktadır, geçiş bileşeni ise geçiş sıcaklığının üzerine ısıtılana dek yumuşamaya devam eder ve sertleştirme için soğutulduktan sonra deforme olmuş şeklini büyük ölçüde korumaktadır. Geçiş bileşeni tekrar yumuşatılmak için ısıtılmasıyla, elastik bileşende depolanan elastik enerji boşa çıkar ve bu da hibritin şekil değişimi için itici bir kuvvet sağlamaktadır [50].

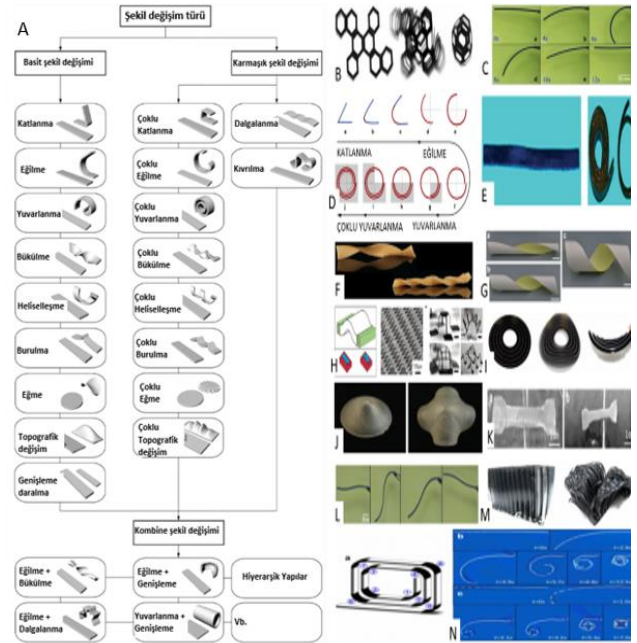
Etkileşim Mekanizması: Bazı durumlarda, akıllı malzemeye doğru sıralamada ya da uygun zaman süresince dış uyarıcılarının etkimesi sebebiyle 4B baskı ile imal edilmiş bir ürün arzu edilen şekilde olamayabilir. Örneğin, ana etkileşim mekanizmalarından biri kısıtlı termo-mekanik olabilir. Bu mekanizmada akıllı malzeme şekil hafızası etkisine sahiptir ve ısı uyarıcı olarak kullanılır. Ayrıca, bu mekanizma yüksek sıcaklıkta dış bir yük vasıtası ile deformasyon oluşumu, dış yük sabitken sıcaklığın düşürülmesi, düşük sıcaklıkta yüklemenin kaldırılması ve istenilen şeklin elde edilmesi olarak 4 adım içermektedir. Bu yapının tekrar ısıtılması ile ilk haline dönmesi de sağlanabilmektedir [29].

Matematiksel Modelleme: 4B baskıda matematik modelleme yapı içerisindeki malzeme dağılımını, uyarıcının türünü belirlemek ve doğru özellik ve nihai boyutlardaki ürünü elde etmek amacıyla gereklidir. Bu durum, uyarıcı ile malzeme özellikleri arasında bir bağlantı kurmayı da sağlamaktadır [29]. Ayrıca, Manen vd. de [51] belirli bir zaman içerisinde, basit şekillerinden şekil değişikliği ile karmaşık şekilleri elde etmek için basit şekillerin belirli bir deformasyon sırasını izleyecek şekilde programlanabileceğini vurgulamıştır.

2.1. 4B Baskı Yöntemi ile İmal Edilen Dinamik Parçaların Şekil Değişimleri

4B baskı yöntemiyle imal edilen dinamik parçaların şekil değişimleri; basit şekil değişimi, karmaşık şekil değişimi ve kombine şekil değişimi olmak üzere üç alt sınıfta değerlendirilebilmektedir (Şekil 9a) [52]. Basit şekil değişimi tek bir deformasyon basamağından oluşmakta ve bu tür şekil değişimleri katlanma (Şekil 9b), eğilme (Şekil 9c), yuvarlanma (Şekil 9e), bükülme (Şekil 9f), heliselleşme (Şekil 9g), burulma (Şekil 9h), eğme (Şekil 9i), topografik değişim (Şekil 9j), genişleme ve daralmadır (Şekil 9k).

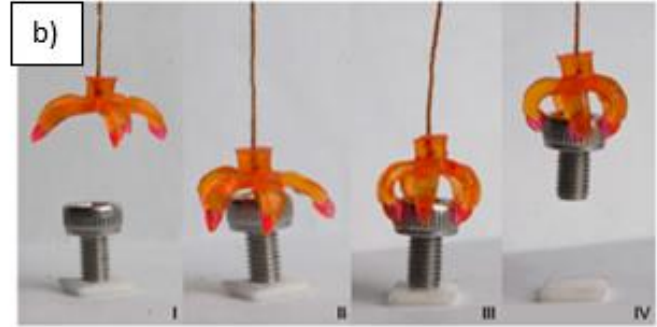
Karmaşık şekil değişimi, yukarıda ifade edilen basit bir şekil değişikliği ile elde edilen formun genişletilmesinden yani birden fazla basamağın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Karmaşık şekil değişimleri ise, çoklu katlanma (Şekil 9n), çoklu eğilme, çoklu yuvarlanma, çoklu bükülme, çoklu heliselleşme, çoklu burulma, çoklu eğme, çoklu topografik değişim ya da dalgalanma (Şekil 9l) ve kıvrılma (Şekil 9m) olarak sayılabilir. Son alt sınıf olarak nitelendirilen kombine şekil değişimleri ise iki veya daha fazla bileşen davranışının bileşende eşzamanlı olarak veya dikkatle zamanlanmış bir sırada meydana gelecek şekilde programlanabildiği farklı şekil değiştirme davranışlarının bir araya getirilmesi ile meydana gelmektedir [52]. Şekil 9d de ise katlanma, eğilme ve yuvarlanma arasındaki farklılık gösterilmiştir.



Şekil 9. a) Şekil değişim türleri [52], b) katlanma davranışına dair örnek [53], c) eğilme davranışına dair örnek [54], d) katlanma, eğilme ve yuvarlanmanın farkına dair örnek [52], e) yuvarlanma davranışına dair örnek [2], f) bükülme davranışına dair örnek [55], g) heliselleşme davranışına dair örnek [20], h) burulma davranışına dair örnek [51], i) eğme davranışına dair örnek [53], j) topografik değişime dair örnek [56], k) genişleme ve daralmaya dair örnek [57], l) dalgalanmaya dair örnek [54], m) kıvrılmaya dair örnek [14], n) çoklu katlanmaya dair örnek [58].

Ge vd., [59] yaptıkları çalışmada, akıllı tutucu üretmek amacıyla 4B baskı tekniğini kullanmışlardır. Projeksiyon mikrostereolitografisine dayanan eklemeli imalat yöntemiyle foto-kürlenebilir metakrilat

kopolimer reçinesini kullanarak şekil hafızalı yapıyı elde etmişlerdir. Üretilmiş olan bu yapı Şekil 10'da gösterildiği üzere ısı ile aktif hale getirilip, ilaç salınım sistemlerinde mikro tutucu olarak kullanılabilir. Üretilmiş olan bu yapı Şekil 10'da gösterildiği üzere ısı ile aktif hale getirilip, ilaç salınım sistemlerinde mikro tutucu olarak kullanılabilir.



Şekil 10. a) Üretildiği halden geçici şekle, şekil değişim karakterizasyonu, b) Cıvataı kaldırmak için kademeli olarak etkinleştirilen akıllı tutucu [59]

Başka bir çalışmada ise, Leist vd., [60] naylon kumaş üzerine termal olarak duyarlı bir malzeme olan PLA'yı basarak, ısı etkisine maruz kaldığında şeklini değiştiren kumaş elde etmişlerdir (Şekil 11).

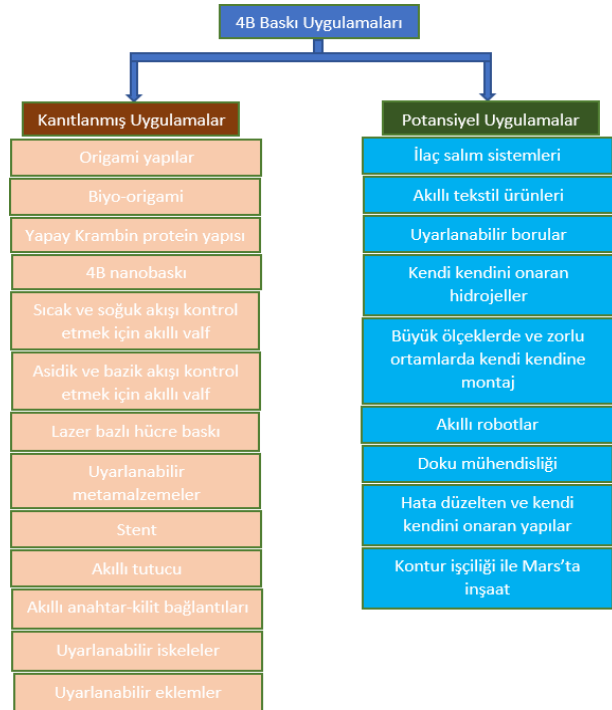
manyetik alan ile uyarılması durumundaki şekil hafıza davranışlarını incelemişlerdir.



Şekil 11. Akıllı tekstil ürünlerinde 4B baskının kullanımı [60]

3. 4B Baskı Uygulamaları ve 4B Baskının Geleceği

4B baskı, ilk tanımından bu yana dek origami, mimari, metalmalzeme, akıllı ambalaj / cihazlar ve biyomedikal mühendisliğinde yüksek potansiyele sahip uygulamalara sahip olmuştur. Özellikle, vücut ısısının artıp azalmasıyla genişleyen ya da daralan akıllı stentlerin yapımında [61], organ yapımında [62],[63, implantlarda [64] ve akıllı medikal cihazların imalatı [65] gibi medikal uygulamalarda bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 12'de 4B baskı uygulamaları kanıtlanmış uygulamalar ve potansiyel uygulamalar olarak iki sınıfa ayrılmıştır [12].



Şekil 12. 4B baskı uygulamaları [12]

Zhao vd. ise [67], SLA yöntemini kullanarak 4B baskı ile şekil hafızalı poliüretan imal etmiş ve bu malzemenin mükemmel şekil hafıza performansı, iyi mekanik özellikleri ve en önemlisi de yüksek baskı doğruluğu ve yeteneğine sahip olması ve tüm bunların kombinasyonlarının sunduğu avantajlarla birçok önemli alandaki uygulamalarda önemli bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır. Gerçekleştirilen tüm bu çalışmalar, 4B baskı işleminin emekleme döneminden

öteye geçmesine ve gelecekte hangi alanlarda nasıl kullanılabilceği üzerine bilim insanlarına yol göstermekte ve çalışmaya sevk etmektedir. Henüz emekleme döneminde olmasına rağmen, daha şimdiden NASA tamamen entegre bir laboratuvar kurarak burada metalleri de içerisinde barındıran çoklu malzemelerin geri dönüştürülerek 3B ve 4B baskıda tekrar kullanılmasının araştırılmasını hedeflemektedir [68]. Ayrıca, ABD ordusu da 4B baskı işlemiyle kendinden montajını gerçekleştirebilen silah ve araçların yanı sıra, ortam koşullarına göre renk değiştiren kamuflajların üretiminin geliştirilmesi amacıyla 3 üniversiteye 855,000\$ hibe etmiştir [69].

4. Sonuçlar

Gelişen teknoloji ile birlikte eklemeli imalat yöntemlerini ve akıllı malzemeleri bir potada eriterek statik cisimlere dinamik olabilme özelliği kazandıran 4B baskı teknolojisi son derece önemli hale gelmiştir. Gelecekte de önemini artırarak devam etmesi beklenen bu teknoloji ile ilgili yapılan bu çalışma sonucunda 4B baskı yöntemleri, kullanılabilen malzemeler, uyarıcı çeşitleri ve uyarıcıların hangi mekanizmalar ile akıllı malzemeleri etkilediği detaylı olarak anlatılmıştır. Yenilikçi ürünlerin, verimli bir ürün haline gelme süresini tahmin eden Gartner döngüsüne göre de 4B baskı teknolojisinin 10 yıl sonra verimli bir teknoloji haline gelmesi beklenmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Tibbits, S. 2019. The emergence of “4D printing”, https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing (Erişim tarihi: 18.08.2019).
- [2] Ge Q, Qi HJ, Dunn ML. Active Materials by Four-Dimension Printing. *Appl. Phys. Lett.*, 103, 131901, 2013.
- [3] Raviv D, Zhao W, McKnelly C, Papadopoulou A, Kadambi A, Shi B, Hirsch S, Dikovsky D, Zyacki M, Olguin C. Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations. *Sci. Rep.* 4, 7422, 1-8, 2014.
- [4] Pei, E. 4D Printing: dawn of an emerging technology cycle. *Assem. Autom.* 34(4), 310-314, 2014.
- [5] Ding Z, Yuan C, Peng X, Wang T, Qi HJ, Dunn ML. Direct 4D printing via active composite materials. *Sci. Adv.* 3(4), 1-6, 2017.
- [6] Gladman AS, Matsumoto EA, Nuzzo RG, Mahadevan L, Lewis JA. Biomimetic 4D printing. *Nat. Mater.* 15(4), 413-418, 2016.
- [7] Kuksenok O, Balazs AC. Stimuli-responsive behavior of composites integrating thermo-responsive gels with photo-responsive fibers. *Mater. Horiz.* 3, 53-62, 2016.
- [8] Nadgorny M, Xiao Z, Chen C, Connal LA. ACS Appl. Mater. Interfaces. 8(42):28946-28954, 2016.
- [9] Sciencedirect. 2020. <https://www.sciencedirect.com/search/advanced?q=%224D%20printing%22> (Erişim tarihi: 22.01.2020).
- [10] Mordorintelligence, 2020. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/4d-printing-market> (Erişim tarihi: 10.01.2020).
- [11] Walker MJ. Hype Cycle for Emerging Technologies, Gartner, Stamford, CT, 2018.
- [12] Momeni F, Seyed MMHN, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. *Materials and Design*, 122, 42-79, 2017.
- [13] Javaid M, Haleem M. 4D printing applications in medical field: A brief review. *Clinical Epidemiology and Global Health*, Article in Press., 2019.
- [14] Tibbits S, McKnelly C, Olguin C, Dikovsky D, Hirsch S. 4D Printing and universal transformation, *Materials Agency*. 539-548, 2014.
- [15] Wang G, Wang CN, Zhang YC, Liu TT, Lv JP, Shen X, Guo MR. Demonstrating printed paper actuator, in Ext. Abstr. 2018 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - CHI '18. 1-4, 2018.
- [16] Miao S, Cui H, Nowicki M, Xia L, Zhou X, Lee SJ, Zhu W, Sarkar K, Zhang Z, Zhang LG. Stereolithographic 4D bioprinting of multiresponsive architectures for neural engineering, *Adv. Biosyst.* 2(9), 1-19, 2018.
- [17] Koch L, Deiwick A, Chichkov B. *Laser-Based Cell Printing*. 3D Printing and Biofabrication, Cham: Springer International Publishing. 303-329, 2018.
- [18] Dadbakhsh, S., Speirs, M., Kruth, J.P., Schrooten, J., Luyten J, Humbeeck JV. Effect of SLM parameters on transformation temperatures of shape memory nickel titanium parts. *Adv. Eng. Mater.* 16 (9), 1140-1146, 2014.
- [19] Jamal M, Kadam SS, Xiao R, Jivan F, Onn TM, Fernandes TD, Nguyen Gracias DH. Bio-origami hydrogel scaffolds composed of photo crosslinked PEG bilayers. *Adv. Healthc. Mater.* 2, 1142-1150, 2013.
- [20] Zhang, Q, Zhang K, Hu G. Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique. *Sci. Rep.* 6, 1-8, 2016.
- [21] Bakarich SE, Gorkin R, Spinks GM. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromol. Rapid Commun.* 36, 1211-1217, 2015.
- [22] Addington M, Schodek D. *Smart Materials and Technologies for the Architecture and Design Professions*. UK, London: Taylor & Francis Group, 2016.
- [23] Lee AY, An J, Chua CK. Two-Way 4D Printing: A Review on the Reversibility of 3D-Printed Shape Memory Materials. *Engineering*, 3(5):663-674, 2017.
- [24] David EH, Wang KW, Smith EC. Dual-stack Piezoelectric Device with Bidirectional Actuation

- and Improved Performance. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15(7), 565-574, 2004.
- [25] Wang, G. Research on the Dynamic Model of the Bi-directional Smart Active Structure with two Piezoelectric Stacks. *International Conference on Control and Automation*, Seoul, South Korea, 2984-2989, 2007.
- [26] Sun I, Hoang WM, Ding Z, Zhao Y, Wang CC, Purnawali H. Stimulus-responsive shape memory materials: a review. *Mater Design*, 33; 577-640, 2012.
- [27] Aschwanden M, Stemmer A. Polymeric, electrically tunable diffraction grating based on artificial muscles, *Opt Lett.*, 31; 2610-2612, 2006.
- [28] Naciri J, Jeon H, Keller P, Ratna B. Nematic elastomer fiber with mechanical properties of a muscle (Patent), 2004.
- [29] Carmen M, Henriquez G, Mauricio A, Vallejos S, Hernandez JR. Polymers for additive manufacturing and 4D-Printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Polymer Science* (In Press), 2019.
- [30] John DW. *Dielectric elastomers as high-performance electroactive polymers*, Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers, 2008.
- [31] Mouritz AP. Titanium alloys for aerospace structures and engines. *Introduction to Aerospace Materials*, 202-223, 2012.
- [32] Chandrasekaran M. *Forging of metals and alloys for biomedical applications*. Metals for Biomedical Devices, 2010.
- [33] Sumita M, Yoneyama T. *Bioengineering*. Comprehensive Structural Integrity, 2003.
- [34] Gopi M, Kumar PR, Sravanth P, Aravind S. 2019. Shape memory polymers. <http://www.dstuns.iitm.ac.in/teaching-and-presentations/teaching/undergraduate%20courses/vy305-molecular-architecture-and-evolution-of-functions/presentations/presentations-2007/seminar-1/P9.pdf> (Erişim tarihi: 11.12.2019),
- [35] Thakur S. *Shape Memory Polymers for Smart Textile Applications*, Chapter 12. Textiles for Advanced Applications, 323-337, 2017.
- [36] Sokolowski W, Metcalfe A, Hayashi S, Yahia LH, Raymond J. Medical applications of shape memory polymers. *Biomed. Mater.* 2, 23-27, 2007.
- [37] Erkeçoğlu S, Sezer AD, Bucak S. Smart delivery systems with shape memory and self-folding polymers. In: *Sezer AD (ed) Smart drug delivery system*.://doi.org/10.5772/62199, 2016.
- [38] Huang WM, Ding Z, Wang CC, Wei J, Zhao Y, Purnawali H. Shape memory materials, *Mater Today*, 13; 54-61, 2010.
- [39] Xie T, Rousseau IA. Facile tailoring of the thermal transition temperatures of epoxy shape memory polymers. *Polymer*, 50; 1852-1856, 2009.
- [40] Yang B, Huang WM, Li C, Li I. Effects of moisture on the thermomechanical properties of a polyurethane shape memory polymer. *Polymer*, 47, 1348-1356, 2006.
- [41] Lenh J, Lu H, Liu Y, Huang WM. Du S. Shape-memory polymers – a class of novel smart materials. *MRS Bull*, 34, 848-855, 2009.
- [42] Liu C, Qin H, Mather PT. Review of progress in shapememory polymers. *J Mater Chem* 16:1543-1558, 2007.
- [43] Uchino K. Antiferroelectric shape memory ceramics. *Actuators*, 5(11), 1-23, 2016.
- [44] Kabir MH, Watanabe Y, Gong J, Furukawa H. The Applications of Shape Memory Gel as a Smart Material. *Proc. of SPIE*, 1, 1-4, 2014.
- [45] Osada Y, Matsuda A. Shape memory in hydrogels. *Nature*, 376, 219, 1995.
- [46] Kabir MH, Gong J, Watanabe Y, Makino M, Furukawa H. *Mater. Lett.* 108, 239-242, 2013.
- [47] Amano Y, Hidema R, Gong J, Furukawa H. Creation of Shape-memory Gels with Inter-crosslinking Network Structure. *Chemistry Letters*, 41(10), 1029-1031, 2012.
- [48] Yokoo T, Hidema R, Furukawa. *Surf. Sci. Nanotech.*, 10, 243-247, 2012.
- [49] Harada S, Hidema R, Gong J, Furukawa H. Intelligent Button Developed Using Smart Soft and Wet Materials. *Chemistry Letters*, 41(10), 1047-1049, 2012.
- [50] Huang W, Zhao Y, Wang CC, Purnawali ZDH, Tang C, Zhang JL. Thermo/chemo-responsive shape memory effect in polymers: A sketch of working mechanisms, fundamentals and optimization. *J. Polym. Res.* 19, 1-34, 2012.
- [51] Manen T, Janbaz S, Zadpoor A. Programming the shapeshifting of fat soft matter. *Mater Today* 21(2):144-163, 2018.
- [52] Nam S, Pei E. A taxonomy of shape-changing behavior for 4D printed parts using shape-memory polymers, *Progress in Additive Manufacturing*, 4:167-184, 2019.
- [53] Tibbits S. 4D printing: multi-material shape change. *Archit Des* 84(1):116-121, 2014.
- [54] Wu J, Yuan C, Ding Z, Isakov M, Mao Y, Wang T, Dunn M, Qi H. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape-memory polymers. *Sci. Rep* 6:24224, 2016.
- [55] Wang W, Yao L, Zhang T, Cheng C, Levine D, Ishii H. Transformative appetite: shape-changing food transforms from 2D to 3D by water interaction through cooking. In: *ACM 978-1-4503-4655-9/417/05*, 2017.
- [56] Hu G, Damanpack A, Bodaghi M, Liao W. Increasing dimension of structures by 4D printing shape-memory polymers via fused deposition modeling. *Smart Mater* 26, 1-11, 2017.

- [57] Bakarich S, Gorkin R, Panhuis M, Spinks G. 3D/4D printing hydrogel composites: a pathway to functional devices. *MRS Adv* 1(8):521–526, 2015.
- [58] Mark, C. (2014). “4D” printing: the next level of additive manufacturing. <http://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-processing/4d-printing-next-level-additive-manufacturing>. (Erişim tarihi: 25.01.2020).
- [59] Ge Q, AH, Sakhaei H. Lee CK, Dunn NX. Fang ML, Dunn. Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers, *Sci. Rep.* 6, 31110, 2016.
- [60] Leist SK, Gao D, Chiou R, Zhou J. Investigating the shape memory properties of 4D printed polylactic acid (PLA) and the concept of 4D printing onto nylon fabrics for the creation of smart textiles, *Virtual Phys. Prototyp.* 12, 290–300, 2017.
- [61] Zarek M, Mansour N, Shapira S, Cohn D. 4D printing of shape memory - based personalized endoluminal medical devices. *Macromol Rapid Commun.*, 38(2), 1-6, 2016.
- [62] Miao S, Castro N, Nowicki M, et al. 4D printing of polymeric materials for tissue and organ regeneration. *Mater Today.*, 20(10), 577–591, 2017.
- [63] Saunders S. 2017. 4D printing technique could Be used to develop 3D printed human organs for transplant patients. <https://3dprint.com/196141/4d-printing-humanorgans/>. (Erişim tarihi: 12.08.2019).
- [64] Akbari S, Sakhaeim AH, Kowsari K., et al. Enhanced multi-material 4D printing with active hinges. *Smart Mater Struct.*, 27(6), 1–23, 2018.
- [65] Castro NJ, Meinert C, Levett P, Hutmacher DW. Current developments in multifunctional smart materials for 3D/4D bioprinting. *Current Opinion in Biomedical Engineering.*, 2, 67–75, 2017.
- [66] Zhang F, Wang L, Zheng Z, Liu Y. Magnetic programming of 4D printed shape memory composite structures. *Composites Part A* 125, 1-7, 2019.
- [67] Zhao T, Yu R, Li X, Cheng B, Zhang Y, Yang X, Zhao X, Zhao Y, Huang W. 4D printing of shape memory polyurethane via stereolithography. *European Polymer Journal* 101, 120-126, 2018.
- [68] NASA, Refabricator 2019. https://www.nasa.gov/mission_pages/centers/marsall/images/refabricator.html (Erişim tarihi: 14.09.2019).
- [69] 4D Printing, 2019. 4D Printing May Bolster Arsenal of US Army, <https://www.livescience.com/40888-army-4d-printing-grant.html> (Erişim tarihi: 15.09.2019)