

# Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılan Otoklav Yöntemi İçin Karşılaştırmalı Maliyet Analizleri

Kaan Gölçek<sup>1</sup>

Asım Sinan Karakurt<sup>2</sup>

## Özet

Çevresel etmenlerin en az enerji üretimi ve kullanımı kadar etkili olduğu günümüzde üretilen ürün başına tüketilen enerjinin yanında ürün başına çevreye verdiği emisyonlar da etkili olmaktadır. Bu nedenle üretim sektöründe yaygın olarak kullanılan tekniklerinin iyileştirilmesi bu sürece olumlu katkıda bulunacaktır. Bu çalışmada, kompozit üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan otoklav fırınlar için alternatif enerjiler ve diğer enerjiler kullanılması ile karbon salımının minimize edilerek yatırım ve işletme maliyetleri gelecek piyasa koşulları için optimize edilmesi üzerine çalışılmıştır. Sistemde kullanılan enerji kaynağı olarak alternatif enerjiler ve doğal gaz kullanımı ile toplam enerji maliyetinin ve karbon salımının düşürüldüğü görülmüştür.

## 1. Giriş

Denizcilikten uzay ve havacılığa, otomotivden bilişim sistemlerine kadar birçok alanda ihtiyaç duyulan ürünlerin kısa sürede, kaliteli, çevreci ve ekonomik bir şekilde üretiminin yapılabilmesi sürdürülebilir bir rekabet için gerekli bir durumdur. Hızla artan ve sürekli değişen üretim ihtiyaçlarının optimum bir şekilde karşılanabilmesi için üretim maliyeti ve kullanılabileceği sıcaklık aralıklarının darlığı gibi dezavantajlarına karşın hafiflik, yüksek dayanım ve düşük termal genleşme gibi avantajları bulunan kompozit malzemelerin kullanımı geçmişte olduğu gibi günümüzde de ayrıcalıklı yerini korumaktadır (Dhaka ve Ismail, 2021). Özellikle havacılık ve uzay

1 Yüksek Mühendis, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE, Tulkas Mühendislik ve Teknoloji Limited Şirketi, kaan.golcek@std.yildiz.edu.tr, 0000-0002-6958-4863

2 Dr. Öğr. Üyesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE, asinan@yildiz.edu.tr, 0000-0002-6205-9089

endüstrisinde kompozit parçaların kullanılması, parça ağırlığını azaltarak artan hıza, iyileştirilmiş yakıt verimliliğine ve güç ve dayanıklılığı artırarak güvenilirliğin artmasına olanak sağlamıştır (Ekuase, Anjum, Eze ve Okoli, 2022). Üretim esnasında birim ürün başına harcanan enerjinin ve salınan emisyonların önemli olduğu ve bununla ilgili yasal düzenlemelerin de yürürlüğe konulduğu dikkate alınır ise hem üretim yöntemlerinde hem de üretimde kullanılacak malzeme türlerinde iyileştirmelerin yapılması gerekli bir durumdur.

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla türde ayrı bileşenden oluşur. Bu kombinasyon genellikle her bir bileşenin faydalarını ayrı ayrı gerçekleştirmek için uygulanırken, performans açısından her bir kompozit ayrı parçadan daha üstün olan yeni bir malzeme elde edilir. Kompozit üretimi için en yaygın kullanılan tekniklerden biri, reçine ve liflerin bir vakum torbası içine alınmış bir kalıba yerleştirilmesini içeren vakum torbası/otoklav kalıplama işlemidir (Advani ve Hsiao, 2012). 1800'lü yılların sonlarından beri tıbbi sterilizasyon işlemlerinde de kullanılan otoklav yöntemi temelde Dennis Papin tarafından icat edilen basınçlı kapların çalışma prensipleri ile aynı şekilde işlemektedir (Hugo, 1991).

Özellikle son zamanlarda yapılan çalışmalar incelendiğinde kalıpların ısıtma ve soğutma aşamalarında enerji verimliliği ve zaman optimizasyonu üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Dünyamız sanayisinde artan talepler ve üretim kapasiteleri karşısında dünyada yaşanmaya başlayan enerji kıtlığı, yüksek karbon emisyonlarından kaynaklanan çevre kirlilikleri ve bunların sebep olduğu iklim krizleri yakın gelecekte emisyonlarında maliyetlere ciddi oranda etkileyeceği senaryoları göz önüne alındığında hem ticari hem de küresel iklim anlamında sürdürülebilirlik hedeflerinin bu türlerde optimizasyon çalışmalarının yapılmasında önemli ölçüde etkili olmaktadır. Günümüzde birçok sektörde kullanılan ürünlerin üretim tekniklerindeki harcanan toplam enerji dikkate alındığında büyük bir çoğunluğunun termoset plastik ve termoplastik hammaddeler ile üretildiği bilinmektedir (Shama Rao, Simha, Rao ve Ravi Kumar, 2018). Bu ürünlerin üretiminde harcanan enerji ise kullanılan kalıpların ısıtma ve soğutma işlemleri sırasında ortaya çıktığından dolayı proseslerin enerji verimliliği oldukça ön plana çıkmaktadır.

Fisher ve diğ. (Fisher, Levy ve Kratz, 2023) hem fırın hem de otoklav üzerinde yaptığı ölçümlerde ısı transfer katsayılarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalar incelendiğinde otoklav içerisindeki ısı transfer katsayısının daha büyük olduğu gösterilmiştir. Athanasopoulos ve diğ. (Athanasopoulos, Koutsoukis, Vlachos ve Kostopoulos, 2013) vakum torbalama üretim

yönteminde ısıtıcı olarak fırın yerine kalıp üzerine serilen ısıtıcı kumaş ve film rezistanslar kullanmışlardır. Böylece daha verimli bir ısıtma sağlandığı görülmüştür. Liu ve Fu (Liu ve Fu) ısı transferini artırmak için kanatlı kalıp yüzeyleri ile çalışılmıştır. Kanatlar sayesinde ısıtma/soğutma veriminin artırılacağı ve bu artışın çevrim süresinin kısılması açısından önemli avantajlar sağladığını göstermişlerdir. Hassen ve diğ. (Hassen ve diğerleri, 2022) büyük parçaların eklemeli olarak üretilmesinde otoklav kullanılarak üretilmesini mümkün kılmak için basınç ve vakum bütünlüğünü sağlayacak O-ring'li birleştirme sistemi kullanmışlardır. Forcellese ve diğ. (Forcellese, Marconi, Simoncini ve Vita, 2020) otoklav kürelemeli kalıplama ile basınçlı torba kalıplama yöntemlerini karşılaştırmışlardır. En etkili sürecin kompozit kalıp ve poliüretan poşet ile en sürdürülebilir sürecin ise alüminyum kalıp ve otoklav torbası ile kalıplama olduğunu göstermişlerdir. Vita ve diğ. (Vita, Castorani, Germani ve Marconi, 2019) karbon takviyeli kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan otoklav ve basınçlı torba kalıplama yöntemleri arasında karşılaştırmalı bir yaşam döngüsü ve maliyet analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada belirlenen amaca göre farklı sonuçların elde edildiği ancak, çevresel şartlar dikkate alındığında ise otoklav yöntemin daha uygun olduğu belirtilmiştir. Yue ve diğ. (Yue ve diğerleri, 2022) otoklavı elektrik rezistansı ile ısıtarak küreme (ERHC) yöntemlerini karşılaştırmışlardır. ERHC'nin enerji tasarrufu ve hızlı ısıtma sağladığı gözlemlenmişti. Ding ve diğ. (Ding, Chiu ve Liu, 1999) yağ kullanımı ile ısıtma ve soğutma proseslerini incelemişlerdir. Yağ ısıtmalı aletler için ısıtma/soğutma işlemlerinin akış hızı ile kontrol edilebileceği, ısıtma işleminin homojen bir şekilde yapılabileceği, akış debisi yükseldikçe ısı transferinin hızlandığı gösterilmiş ve ısı işlemlerinin daha az enerji girdisi ile yapılabileceği belirtilmiştir.

Bohne ve diğ. (Bohne, Frerich, Jendry, Jürgens ve Ploshikhin, 2018) otoklavdaki ısı transferini incelemişlerdir. Sıcaklığın veya ısıtma hızının ısı transfer katsayısı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Buna karşın basınç ve otoklav içerisindeki konumun önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterilmişlerdir. Mirzaei ve diğ. (Mirzaei, Krishnan, Al Kobtawy, Roberts ve Palmer, 2021) belirli koşullar altında otoklav içerisinde parça sayısının iki katına çıkarılmasının, ısınma oranlarını önemli ölçüde etkilemeden ısı transferini yavaşatabileceğini göstermişlerdir. Bu nedenle yaşanan gecikmenin, üretim oranındaki artış sebebiyle tolere edilebileceğini belirtilmişlerdir. Zhang ve diğ. (Zhang, Zhang, Luo, Lin ve Xue, 2021) kalıp sıcaklık dağılımını iyileştirmek amacıyla, ısıtma performansını etkileyen metal ve ısı transfer sıvısı malzemelerinin termal özelliklerini incelemişlerdir. Kalıp malzemesi olarak bakır kullanıldığında çeliğe göre

sıcaklık farkının %30.63 oranında azaldığı ve ısıtma hızının %3.45 oranında arttığı belirtilmiştir. Isı transfer ortamı olarak helyum kullanımı sonucunda ise havaya göre sıcaklık farkının %68.27 azaldığı ve ısıtma hızının %32.76 arttığını belirtmişlerdir. Hu ve diğ. (Hu ve diğerleri, 2020) HFC (ısı transfer kanadı) ler ile kurulan kalıbın sıcaklık alanı sayısal analizi oluşturmuşlardır. Kalıp yüzeyinin maksimum sıcaklık farkı, orijinal kalıba göre %15.1 düşürülerek, kalıbın düşük sıcaklık alanının ısı transfer verimliliği iyileştirildiğini göstermişlerdir. Wang ve diğ. (Wang, Zhu, Wang, Xu ve Ke, 2019) homojen bir kürlenme prosesi elde etmek için kalıp plakasının altına yerleşik lokal bir izolasyon aracı kullanmışlardır. Bu yapının optimizasyonu için sayısal simülasyon ve algoritmalar ile yapılan analizler sonucunda kompozit parçadaki maksimum sıcaklık değişiminin %45.69; maksimum kürlenme derecesinin ise %40.16 oranında azaldığı belirtilmişlerdir. Xie ve diğ. (G. N. Xie, Liu, Zang, Lorenzini ve Biserni, 2013) otoklav içerisinde ısı dağılımını etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak kürlenme sıcaklığı alanı üzerinde bir simülasyon modeli tasarlamışlardır. Isı koruma süresi ve periyot sayısındaki artışın ısının homojen dağılımını önemli ölçüde artırdığını göstermişlerdir. Düşük hızda yapılan ısıtmanın; ısıtma verimliliği ve sıcaklık alanının homojenliği bakımından çok daha etkili bir proses sunduğunu belirtmişlerdir. Zhu ve diğ. (Zhu, Frerich, Dimassi, Droste ve Herrmann, 2021) ısı transferi katsayısını sonlu elamanlar metodu ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunu birleştirmişlerdir. İki simülasyon yaparak tam geçici ve yarı geçici olarak durumları ele almışlardır. Yarı geçici sonuçları çok az sayıda hesap yaparak doğru bir sonuç vermeyi başarmışlardır. Xie ve diğ. (G. Xie, Liu, Zhang ve Sunden, 2012) bir diğer çalışmada ise otoklavla kompozit üretiminde ısı dağılımının homojen olmasını sağlamak için termal analiz ve simülasyon yapmışlardır. Bu çalışmalarında kürlenmede sertleşen malzemenin ısı transferine etkisinin çok az olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışmalarında ısıtma hızının yavaş olması daha homojen ısıtma sağladığı göstermişlerdir. Lin ve diğ. (Lin ve Guan, 2021) otoklavlarda kürlenme prosesinde ısı dağılımını tahmin etmek için birkaç farklı makina öğrenmesi yöntemi kullanmışlardır. Bu çalışmalarında en iyi makine öğrenmesi yöntemini belirleyerek simülasyona ve denemeye gerek kalmadan en verimli sıcaklık dağılımını elde etmeye yardımcı olduğunu göstermişlerdir. Chen ve diğ. (Chen, Zhan ve Xu, 2015) otoklavlarda kürlenme kalıplarının sıcaklık dağılımı simülasyonunu yaparak daha verimli ve homojen ısıtılmasını incelemişlerdir. Böylece kalıp üretilmeden önce tasarımında iyileştirmeler yapılarak rehberlik etmesi sağlanmıştır.

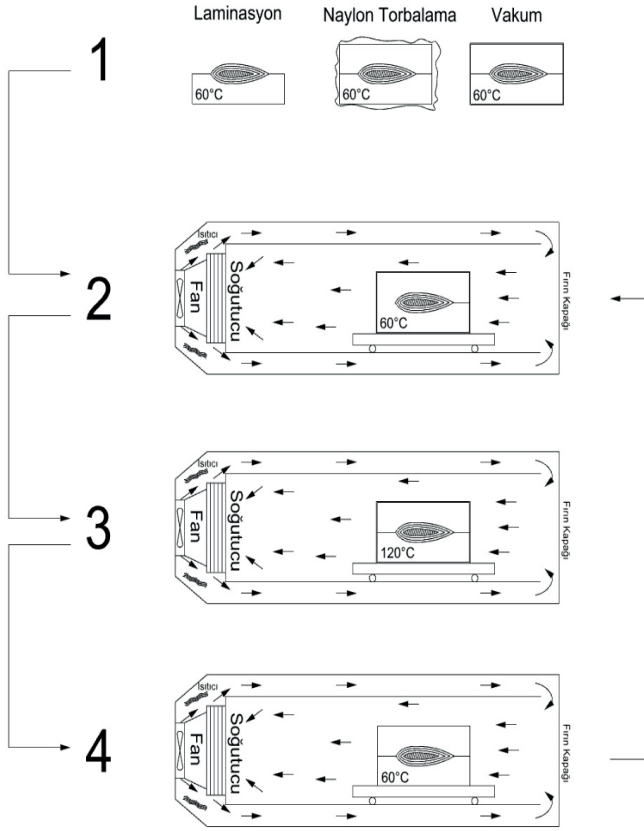
Bu çalışmada gelecekte değişecek maliyet faktörleri dikkate alınarak enerji maliyeti hesaplanırken karbon salımından oluşacak maliyetler de

hesap edilmiştir. Emisyon maliyetleri güneş enerji sisteminin kullanımı ile düşürülürken yatırım maliyeti ve kısıtlı panel alanı dikkate alınarak doğal gaz enerji sistemi ile hibrit şekilde çalışan optimizasyon çalışması yapılmıştır.

## 2. Modelleme

Otoklav yöntemi ile fiber takviyeli termoset plastiklerin imalatında cam, karbon, kevlar ve aramid elyaf hammaddesine sahip malzemeler ile polyester, vinilester ve epoksi gibi reçinelerin birleşimi ile birçok hammadde çeşidi ve bu hammaddelerin kullanıldığı vakum torbalama, kalıp sıkıştırma gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerde kullanılan kompozit malzemelerin kürlenme sıcaklıkları reçine sistemlerine bağlı olarak 100 - 200 °C arasında değişmekte ve kürlenme süreleri ise 90 dk – 300 dk arasında değişebilmektedir (Hubert, Fernlund ve Poursartip, 2012). Özellikle vakum torbalamalı otoklav yönteminde kürlenme işlemi yaklaşık 120 °C sıcaklıkta, kürlenme süresi ise yaklaşık 160 dk olmaktadır. Laminasyon planına göre kesilmiş prepreg karbonlar kalıbın ürün yüzeyine serildikten sonra kalıp kapatılarak sıkıştırılır ve kalıp naylon torbaya konularak vakumlanır. Kalıp 160 dk sonra açılarak içindeki ürün çıkartılır. Seri üretimde kalıp 60 °C sıcaklığa soğutulduktan sonra aynı işlemler tekrarlanır. Bu yöntemde enerji tüketimi, ısıtma ve soğutmada kullanılacak enerjinin kaynağı ve verimliliği karbon salımını doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmada fırın ile imalatı yapılan kompozit malzemelerin ısı çevriminin maliyet optimizasyonu üzerine çalışılmıştır. Hesaplamalar için iç hacmi 1 m<sup>3</sup> fırın, yüzey alanı 1x0.5 m, kalınlığı 0.1 m olan çift taraflı çelik bir kalıp örnek olarak alınmıştır. Bu kalıbın kürlenme sıcaklığı 120 °C'de 160 dk, ürünü kalıba koyma sıcaklığı ise 60 °C olarak belirlenmiştir. Üretim başlangıcında kalıp sıcaklığı 60 °C sıcaklığa çıkarıldığında kompozit laminasyon kalıbın içine yerleştirilip kalıp kapatılacaktır. Daha sonra kalıp naylon torba ile vakumlanıp fırında ısıtılacaktır. Kalıp sıcaklığı belirli bir hızda 120 °C'ye çıkartılıp toplamda 160 dk beklenicek ve kalıp otoklavdan çıkartılıp 60 °C'ye kadar soğutulduktan sonra ürün içerisinden alınarak üretim prosesi seri olarak tekrarlanacaktır.



Şekil 1. Üretim Prosesi Akış Şeması

Mevcut durumda Şekil 1'deki gibi kalıplar fırındaki rezistanslar ile ısıtılmaktadır. Bu rezistanslar elektrikle çalışmakta olup örnek alınan kalıbın bu süreç içerisinde ısıtma ve soğutma için gerekli olan enerji miktarları 1 ve 2 numaralı denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q = m c \Delta T \quad (1)$$

$$Q = \alpha A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Burada,  $Q$  alınan veya verilen ısı enerjisi miktarını [kJ],  $m$  ısıtılacak kalıbın kütesini [kg],  $C$  özgül ısıyı [kJ/kg°C],  $\Delta T$  sıcaklık farkını [°C],  $\alpha$  ısı taşınım katsayısını [W/m<sup>2</sup>°C],  $A_s$  fırın yüzey alanını [m<sup>2</sup>],  $T_s$  kalıp yüzey sıcaklığını [°C],  $T_{\infty}$  ortam sıcaklığını [°C] belirtmektedir.

1 numaralı denklem kalıbı ısıtmak için gerekli enerji miktarını hesaplarken ve soğutma için kalıptan çekilmesi gereken enerji miktarını hesaplamak için kullanılmaktadır. 2 numaralı denklem ise kalıp ve fırın arasındaki zorlamalı

ısı transferinin hesaplanması için kullanılacaktır. Bu çalışmada örnek olarak kullanılacak kalıbın özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

*Tablo 1. Kalıp özellikleri*

Kalıp Ağırlığı	350 kg
Öz ısı	0.45 kJ / kg.°C
Fırın toplam yüzey alanı	6 m <sup>2</sup>
Isı taşınım katsayısı	17 W/ m <sup>2</sup> °C
Malzemesi	Çelik

### 3. Analizler ve Değerlendirme

Yapılan çalışmada Tablo 1'de verilen kalıp özellikleri dikkate alınarak Şekil 1'deki akış şemasına göre harcanan enerji ve güç gereksinimleri Tablo 2'de verilmiştir.

*Tablo 2. Prosesin güç harcamaları*

Aşama	Kalıp sıcaklığı (°C)	Proses	Harcanan güç (W)	Fırının ısı kayıpları (W)	Süre (dk)	Harcanan Enerji (kWh)
1	60	Kalıbı Yerleştirme	0	192	1	0.0032
2	60-120	Isıtma	2718.75	648	60	3.36675
3	120	Kürleme	2718.75	1296	60	4.01475
4	120-60	Soğutma	4078.125	-648	40	2.28675
<b>Toplam</b>						<b>9.67145</b>

Yapılan hesaplamalara göre ürün üretim prosesindeki enerji tüketimi toplam 9.67145 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu tüketimlerin elektrik maliyeti 4.63 TL/kWh olarak kabul edilerek hesaplanacaktır. Buna göre bir ürün üretimi prosesi için 44.78 TL enerji maliyeti oluşmaktadır. Gün boyunca 8 saatlik mesai süresince 3 defa üretim yapılacağı için toplam 134.34 TL maliyet oluşmaktadır.

Gelecek yıllarda maliyet kalemi olarak ortaya çıkacak CO<sub>2</sub> emisyon ücretinin maliyeti de hesaplanmalıdır. Bu maliyet hesabında ikincil enerji kaynağı (şebeke elektriği) olan elektriğin CO<sub>2</sub> salım katsayısı 0.5 kgCO<sub>2</sub>/kWh olarak kabul edilmiştir. Karbon emisyonunun fiyatı da 1.7 TL/CO<sub>2</sub> olarak kabul edilmiştir. Gün boyunca yapılan karbon emisyonu 24.66 TL olarak maliyet oluşturmaktadır. Yapılan imalat yöntemine göre ayda 22 gün

mesai günü kabul edilerek yapılan hesapta aylık elektrik faturası 2955.40 TL aylık emisyon faturası 542.57 TL olarak hesaplanmıştır. Yıllık toplam maliyet 41975.64 TL olarak hesaplanmıştır.

Bu imalat aşamalarında güneş panelinden sağlanan elektrik enerjisi, doğalgaz ile su ısıtma sistemi ile sağlanan enerji ile şebeke elektriği kullanımı azaltılarak karbon emisyonu maliyetini düşürme ve enerji maliyetlerini azaltmak hedeflenmiştir. İmalat yapılan fabrika İstanbul'da kabul edilerek kurulacak güneş enerjisi elektrik üretimi ve doğal gaz su ısıtma sistemi için aylara göre ortalama güneşlenme süresi Tablo 3'te verilmiştir.

*Tablo 3. İstanbul için ortalama güneşlenme süreleri (Saat)*

Aylar	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN
Ortalama	3.46	4.43	5.32	6.85	8.61	10.51
Aylık Saat	107.26	124.04	164.92	205.5	266.91	315.3
Aylar	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
Ortalama	11.17	10.14	7.83	5.22	3.85	2.96
Aylık Saat	346.27	314.34	234.9	161.82	115.5	91.76
<b>Yıllık Saat</b>	<b>2448.52</b>					

Yıllık enerji sarfiyatı ve üretimini baz alarak hesaplama yapıldığı takdirde uygulanan üretim prosesi için güneş paneli alanının maliyete etkisi ve yatırım miktarı Tablo 4'te verilmiştir.



Tablo 4. Güneş Paneli Sisteminin Maliyetlere Etkisi

Kurulacak Güneş Paneli alanı [m <sup>2</sup> ]	Güç [kW]	Yıllık Toplam Enerji [kWh]	Yatırım Maliyeti [TL]	Güneş Paneli Sistemli Yıllık İşletme Güç Sarfıyatı [kWh]	Enerji Maliyeti [TL]	Karbon Emisyonu Maliyeti	Yatırım Maliyetinin Yıllık Maliyeti	Toplam Maliyet
0	0	0	0	9199.44	42593.39	7819.52	0.00	50412.91
2	0.46	1126.32	11557.08	8073.12	37378.53	6862.15	3467.13	47707.81
4	0.92	2252.64	23017.10	6946.80	32163.67	5904.78	6905.13	44973.58
6	1.38	3378.96	34380.05	5820.48	26948.82	4947.41	10314.02	42210.24
8	1.84	4505.28	45645.94	4694.16	21733.96	3990.04	13693.78	39417.78
10	2.3	5631.60	56814.77	3567.84	16519.10	3032.66	17044.43	36596.20
12	2.76	6757.92	67886.52	2441.52	11304.24	2075.29	20365.96	33745.49
14	3.22	7884.23	78861.22	1315.20	6089.39	1117.92	23658.36	30865.67
16	3.68	9010.55	89738.84	188.88	874.53	160.55	26921.65	27956.73
18	4.14	10136.87	100519.41	-937.44	-4340.33	-796.82	30155.82	25018.67
20	4.6	11263.19	111202.90	-2063.76	-9555.19	-1754.19	33360.87	22051.49
22	5.06	12389.51	121789.33	-3190.07	-14770.05	-2711.56	36536.80	19055.19
24	5.52	13515.83	132278.70	-4316.39	-19984.90	-3668.93	39683.61	16029.77
26	5.98	14642.15	142671.00	-5442.71	-25199.76	-4626.31	42801.30	12975.23
28	6.44	15768.47	152966.24	-6569.03	-30414.62	-5583.68	45889.87	9891.57
30	6.9	16894.79	163164.41	-7695.35	-35629.48	-6541.05	48949.32	6778.80
32	7.36	18021.11	173265.52	-8821.67	-40844.34	-7498.42	51979.65	3636.90
34	7.82	19147.43	183269.56	-9947.99	-46059.19	-8455.79	54980.87	465.88
36	8.28	20273.75	193176.53	-11074.31	-51274.05	-9413.16	57952.96	-2734.25
38	8.74	21400.06	202986.44	-12200.63	-56488.91	-10370.53	60895.93	-5963.51
40	9.2	22526.38	212699.29	-13326.95	-61703.77	-11327.91	63809.79	-9221.89
42	9.66	23652.70	222315.07	-14453.27	-66918.63	-12285.28	66694.52	-12509.38

Tablo 4'e göre 16 m<sup>2</sup> üzerinde güneş paneli sistemi kurulduğunda elektrik sarfıyatının ve dolayısı ile emisyon maliyetinin tamamını sıfırlayacağı görülmektedir. Fakat güneş paneli sisteminin yatırım maliyetleri faiz oranı %30 kabul edilerek yıllık olarak hesaplandığında 34 m<sup>2</sup> üzerinde panel sisteminin kurulması gerektiği görülmektedir. Kompozit imalatı yapan bir tesisin içerisinde birden fazla fırın ve ısıtıcı sistemlerin kullanıldığı kabul edilerek bu tesis içerisinde sadece bir fırını çalıştırmak için güneş paneline tesis çatısı üzerinde 34 m<sup>2</sup> alan ayrılması diğer alet ve teçhizatlarında aynı sistemle çalıştırma hedeflendiğinde çatının alanının kısıtlı olması sebebi ile mümkün değildir. Bu sebeple güneş enerjisinin kullanımının minimize edilerek farklı sistemlerle tasarruf sağlanması hedeflenmelidir.

Bu sisteme alternatif olarak doğalgaz ile fırın ısıtması sağlanıp soğutma için şebeke elektriği kullanımına devam edilerek oluşan maliyetler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Doğalgaz Sisteminin Maliyetlere Etkisi

Doğalgaz Hattı Gücü [kWh]	Doğalgaz Yıllık Toplam Enerji [kWh]	Yatırım Maliyeti [TL]	Yıllık İşletme Isıtma Güç Sarfıyatı [kWh]	Yıllık İşletme Soğutma Güç Sarfıyatı [kWh]	Doğalgaz Sistemli Yıllık İşletme Güç Sarfıyatı [kWh]	Enerji Maliyeti [TL]	Karbon Emisyonu Maliyeti	Yatırım Maliyetinin Yıllık Maliyeti	Toplam Maliyet
0	0	0	5848.68	1811.11	7659.79	35464.82	6510.82	0	41975.64
1	2080	15000	5848.68	1811.11	5579.79	25834.42	6510.82	4500	36845.24
2	4160	15000	5848.68	1811.11	3499.79	16204.02	6510.82	4500	27214.84
3	6240	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
4	8320	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
5	10400	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
6	12480	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
7	14560	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
8	16640	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
9	18720	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24
10	20800	15000	5848.68	1811.11	1811.11	8385.4208	6510.82	4500	19396.24

Tablo 5'e göre hesaplanan maliyetlerde, doğalgaz yatırım maliyeti 24 kWh'e kadar sabit olduğundan 15000 TL olarak kabul edilmiştir. Doğalgaz sadece ısıtmada kullanılabileceğinden dolayı şebekeden soğutma için kullanılan güç hiç azalmamıştır. Aynı zamanda karbon emisyonu maliyetinde de bir değişim olmamıştır. Yatırım maliyetinin yıllık bazda maliyeti hesabında yıllık faiz oranı %30 olarak kabul edilip yatırım maliyetinin yıllık faiz maliyeti olarak kabul edilmiştir. Bu hesaplara göre 41975.64 TL olan aylık yıllık maliyetleri 19396.24 TL'ye düşürmenin mümkün olduğu görülmüştür.

Fırının ısıtması için doğalgaz sisteminin kullanımı soğutma için ise güneş enerji sisteminin kullanımı sağlanarak şebeke elektriğinin kullanılmaması koşullarında oluşan maliyetler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Doğalgaz ve Güneş Enerji Sisteminin Maliyetlere Etkisi

Güneş Paneli Yıllık Enerji (kWh)	Yatırım Maliyeti [TL]	Doğalgaz Yıllık Toplam Enerji [kWh]	Doğalgaz Yatırım Maliyeti [TL]	Yıllık İşletme Isıtma Güç Sarfiyatı [kWh]	Yıllık İşletme Soğutma Güç Sarfiyatı [kWh]	Hibrit Sistemli Yıllık İşletme Güç Sarfiyatı [kWh]	Enerji Maliyeti [TL]	Karbon Emisyonu Maliyeti	Yatırım Maliyetinin Yıllık Maliyeti	Toplam Maliyet
0	0	0	0			7659.79	35464.82	6510.82	0.00	41975.64
563.16	5790.7	1040				6056.63	28042.19	6032.13	6237.20	40311.53
1126.32	11557.1	2080				4453.47	20619.56	5553.45	7967.13	34140.14
1689.48	17299.2	3120				2850.31	13196.93	5074.76	9689.77	27961.46
		4160				1247.15	5774.30			21775.51
		5200				207.15	959.10			16960.31
		6240								
		7280								
		8320								
		9360								
		10400								
		11440	15000	5848.68	1811.11					
		12480								
2252.64	23017.1	13520						4596.08	11405.13	
		14560				-441.53	-2044.30			13956.91
		15600								
		16640								
		17680								
		18720								
		19760								
		20800								
		21840								

Tablo 6'ya göre hesaplanan maliyetlerde, doğalgaz ve güneş enerjisi yatırım maliyeti yıllık bazda maliyeti hesabında yıllık faiz oranı %30 olarak kabul edilip yatırım maliyetinin yıllık faiz maliyeti olarak kabul edilmiştir. Doğalgaz sadece ısıtmada güneş paneli sistemi ise sadece soğutmada kullanılmıştır. Aynı zamanda karbon emisyonu maliyetini de sadece güneş paneli kullanımı azaltmıştır. Bu hibrit sistemde kullanılacak güneş paneli soğutma sisteminin gücünü karşılayan 4 m<sup>2</sup> panel alanı olarak hesaplanmıştır. Tesisin kısıtlı alana sahip çatısında bir fırın için güneş paneli sistemi kurulabilmesi bu hesaplanan alan için mümkün olduğu kabul edilmiştir. Hibrit sistem sadece doğalgaz sistemini kullanımına göre daha düşük olan 13956.91 TL yıllık maliyet olarak saplanmıştır.

#### 4. Sonuç

Hibrit sistemin enerji verimliliği açısından avantajları olduğu görülmüştür. Hibrit sistem, enerji kaynaklarını en etkin şekilde kullanarak enerji tüketimini optimize etmeye olanak sağlamaktadır. Bu, daha düşük

enerji maliyetleri ve daha az kaynak israfı anlamına gelmektedir. Bu sistemin işletme maliyetleri üzerinde de olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Güneş paneli sistemi, elde ettiği enerjii kullanarak tesisin elektrik ihtiyacını karşılamakta ve elektrik faturalarının azalmasını sağlarken ve uzun vadede maliyetleri düşürdüğü görülmüştür. Hibrit sistem, enerji arzında çeşitlilik sağlamaktadır. Tesisin Sadece doğalgaz sistemine bağımlı olmak yerine, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynakları da kullanarak enerji güvencesini arttırdığı görülmüştür. Bu durum enerji arzında süreklilik sağlarken ve enerji kesintilerinin etkisini de azaltmaktadır. Bu durum ayrıca işletmede üretim sürekliliğini korumakta ve bakım maliyetlerini düşürdüğü görülmüştür. Sonuç olarak, hibrit sistemler, çevreci olmaları, enerji verimliliği, işletme maliyetlerinde tasarruf sağlamaları ve enerji arzında çeşitlilik sunmaları gibi birçok avantaja sahiptir olduğu görülmüştür. Bu nedenlerle maliyet ve sürdürülebilirlik açısından optimum bir sistem olarak değerlendirilmektedir.

## Kaynaklar

- Advani, S. G. ve Hsiao, K.-T. (2012). Introduction to composites and manufacturing processes. Suresh G. Advani ve K.-T. Hsiao (Ed.), *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* içinde , Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering (ss. 1-12). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857096258.1.1
- Athanasopoulos, N., Koutsoukis, G., Vlachos, D. ve Kostopoulos, V. (2013). Temperature uniformity analysis and development of open lightweight composite molds using carbon fibers as heating elements. *Composites Part B: Engineering*, 50, 279-289.
- Bohne, T., Frerich, T., Jendry, J., Jürgens, J.-P. ve Ploshikhin, V. (2018). Simulation and validation of air flow and heat transfer in an autoclave process for definition of thermal boundary conditions during curing of composite parts. *Journal of Composite Materials*, 52(12), 1677-1687.
- Chen, F., Zhan, L. ve Xu, Y. (2015). Simulation of mold temperature distribution in a running process autoclave. *Iranian Polymer Journal*, 24, 927-934.
- Dhakal, H. N. ve Ismail, S. O. (2021). Introduction to composite materials. H. N. Dhakal ve S. O. Ismail (Ed.), *Sustainable Composites for Lightweight Applications* içinde , Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering (ss. 1-16). Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-12-818316-8.00001-3
- Ding, Y., Chiu, W. K. ve Liu, X. L. (1999). Numerical investigation on thermal response of oil-heated tool for manufacture of composite products. *Composite structures*, 47(1-4), 491-495.
- Ekuse, O. A., Anjum, N., Eze, V. O. ve Okoli, O. I. (2022). A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing. *Journal of Composites Science*, 6(6), 172. doi:10.3390/jcs6060172
- Fisher, A., Levy, A. ve Kratz, J. (2023). Effects of heat transfer coefficient variations on composite curing. *Journal of Composite Materials*, 57(3), 363-376.
- Forcelse, A., Marconi, M., Simoncini, M. ve Vita, A. (2020). Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122677.
- Hassen, A. A., Betters, E., Tsiamis, N., West, J., Smith, T., Billah, K. M. M., ... Kunc, V. (2022). Joining technique for in-oven/autoclave molds manufactured by large scale polymer additive manufacturing. *Manufacturing Letters*, 32, 77-82.
- Hu, J., Zhan, L., Yang, X., Shen, R., He, J. ve Peng, N. (2020). Temperature optimization of mold for autoclave process of large composite manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series* içinde (C. 1549, s. 032086). IOP Publishing.

- Hubert, P., Fernlund, G. ve Poursartip, A. (2012). Autoclave processing for composites. Suresh G. Advani ve K.-T. Hsiao (Ed.), *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* içinde, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering (ss. 414-434). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857096258.3.414
- Hugo, W. B. (1991). A brief history of heat and chemical preservation and disinfection. *Journal of Applied Bacteriology*, 71(1), 9-18. doi:10.1111/j.1365-2672.1991.tb04657.x
- Lin, Y. ve Guan, Z. (2021). The Use of Machine Learning for the Prediction of the Uniformity of the Degree of Cure of a Composite in an Autoclave. *Aerospace*, 8(5), 130.
- Liu, S.-J. ve Fu, K.-H. (2008). Effect of enhancing fins on the heating/cooling efficiency of rotational molding and the molded product qualities. *Polymer testing*, 27(2), 209-220.
- Mirzaei, S., Krishnan, K., Al Kobtawy, C., Roberts, J. ve Palmer, E. (2021). Heat transfer simulation and improvement of autoclave loading in composites manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2989-3000.
- Shama Rao, N., Simha, T. G. A., Rao, K. P. ve Ravi Kumar, G. V. V. (2018). Carbon composites are becoming competitive and cost effective. *White paper*. <https://www.infosys.com/engineering-services/white-papers/documents/carbon-composites-cost-effective.pdf> adresinden erişildi.
- Vita, A., Castorani, V., Germani, M. ve Marconi, M. (2019). Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producing CFRP components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5), 1967-1982. doi:10.1007/s00170-019-04384-9
- Wang, L., Zhu, W., Wang, Q., Xu, Q. ve Ke, Y. (2019). A heat-balance method for autoclave process of composite manufacturing. *Journal of Composite Materials*, 53(5), 641-652.
- Xie, G., Liu, J., Zhang, W. ve Sunden, B. (2012). Simulation and thermal analysis on temperature fields during composite curing process in autoclave technology. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* içinde (C. 45233, ss. 1-9). American Society of Mechanical Engineers.
- Xie, G. N., Liu, J., Zang, W. H., Lorenzini, G. ve Biserni, C. (2013). Simulation and improvement of temperature distributions of a framed mould during the autoclave composite curing process. *Journal of Engineering Thermophysics*, 22, 43-61.
- Yue, C., Zhang, Y., Lu, W., Zhang, Y., Wang, P., Li, Y. ve Zhou, H. (2022). Realizing the curing of polymer composite materials by using electrical

resistance heating: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 107181.

Zhang, G., Zhang, B., Luo, L., Lin, T. ve Xue, X. (2021). Influence of mold and heat transfer fluid materials on the temperature distribution of large framed molds in autoclave process. *Materials*, 14(15), 4311.

Zhu, J., Frerich, T., Dimassi, A., Droste, D. ve Herrmann, A. S. (2021). A quasi-transient coupling approach to the modeling of conjugate heat transfer in the autoclave. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40(23-24), 912-926.

