Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 14(3): 1213-1223 (2026)

Yığın Malzemesi Olarak PLA Kullanılan Duran Dalgalı Termoakustik Soğutucu Simülasyonu

Netice DUMAN[1*] Halil İbrahim ACAR[2]

[1]*Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Sivas, Türkiye*

[2] *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:22/12/2025
Düzeltme: 24/02/2026
Kabul: 26/02/2026

Anahtar Kelimeler

Termoakustik
PLA Yığın
Termoakustik Soğutucu
DeltaEC
Soğutma Performans Katsayısı(COP)

Article Info

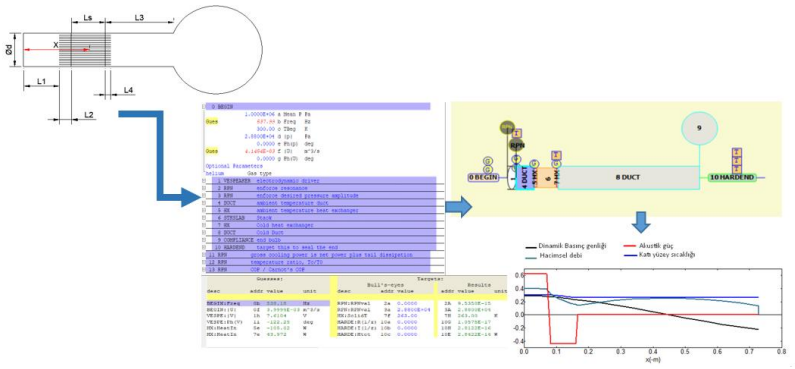
Research article
Received: 22/12/2025
Revision: 24/02/2026
Accepted: 26/02/2026

Keywords

Thermoacoustics
PLA Stack Thermoacoustic Thermoacoustic Refrigerator
DeltaEC
Cooling Coefficient of Performance (COP)

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, PLA yığın malzemesi kullanılan akustik tahrikli duran dalgalı bir termoakustik soğutucu DeltaEC programı ile simüle edilmiştir. Soğutma yükü ve yığın konumunun COP ve COP_R üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, optimum çalışma koşullarını ve PLA'nın alternatif malzeme potansiyelini ortaya koymuştur. / In this study, an acoustically driven standing wave thermoacoustic refrigerator using PLA stack material was simulated with the DeltaEC program. The effects of cooling load and stack position on COP and COP_R were investigated. The results revealed optimum operating conditions and the potential of PLA as an alternative material.



***Şekil A:** Simülasyonda İşlem adımları / **Figure A**: Simulation steps*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Soğutma yükünün artmasıyla sistemin performans katsayısı (COP) doğrusal olarak artar. / As the cooling load increases, the system's coefficient of performance (COP) increases linearly.*
- *Bağıl performans katsayısı (COP_R) belirli bir değere kadar artmakta ve bu noktadan sonra parabolik olarak azalmaktadır. / The coefficient of relative performance (COP_R) increases up to a certain value and then decreases parabolically.*
- *PLA termoakustik soğutuculardа diğer geleneksel yığın malzemelerine alternatif olarak kullanılabilir. / PLA can be used as an alternative to other traditional bulk materials in thermoacoustic refrigerator.*

***Amaç (Aim):** PLA yığın malzemesi kullanılan bir termoakustik soğutucunun DeltaEC programı ile simülasyonunu gerçekleştirerek; soğutma yükü ve yığın konumunun COP ve COP_R üzerindeki etkilerini incelemek ve PLA malzemenin yığın malzemesi olarak uygulanabilirliğini değerlendirmektir./ The aim of this simulation, performed using the DeltaEC program, of a thermoacoustic refrigerator utilizing PLA stack material, is to investigate the effects of cooling load and stack position on COP and COP_R and to evaluate the applicability of PLA as a stack material.*

***Özgünlük (Originality):** PLA yığın kullanılarak simülasyon yapılması / Performing simulations using the PLA stack.*

***Bulgular (Results):** COP, soğutma yüküyle doğrusal olarak artarken, COP_R optimum bir noktaya kadar yükseldi ve ardından azaldı. Yığının akustik sürücüden uzaklığının artırılması, COP'yi doğrusal olarak azalttı; COP_R ise optimum bir konuma kadar arttı ve ardından azaldı. / COP increased linearly with cooling load, while COP_R increased up to an optimum point and then decreased. Increasing the distance of the stack from the acoustic driver decreased COP linearly; COP_R increased up to an optimum position and then decreased.*

***Sonuç (Conclusion):** PLA'nın uygulanabilir bir alternatif yığın malzemesi olduğu tespit edilmiştir. / PLA was found to be a viable alternative stack material.*

*Netice Duman, e-mail: nduman@cumhuriyet.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1847061

GU J Sci, Part C, 14(3): 1213-1223 (2026)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Yığın Malzemesi Olarak PLA Kullanılan Duran Dalgalı Termoakustik Soğutucu Simülasyonu

Netice DUMAN[1*] Halil İbrahim ACAR[2]

[1]*Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Sivas, Türkiye*

[2] *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:22/12/2025
Düzeltme: 24/02/2026
Kabul: 26/02/2026

Anahtar Kelimeler

Termoakustik
PLA Yığın
Termoakustik Soğutucu
DeltaEC
Soğutma Performans Katsayısı (COP)

Öz

Termoakustik ses enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü veya bunun tersi ile ilgilenen multidisipliner bir bilim dalıdır. Termoakustik teknoloji, sürdürülebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik güçlü bir potansiyele sahip olan yeni ve gelişmekte olan bir teknolojidir. İmalatı basit olmasına rağmen, termoakustik cihazların tasarımı oldukça zordur. Bu çalışmada, tasarlanan akustik tahrikli, duran dalgalı, çeyrek dalga boylu, sabit çaplı rezonaratörlü ve yığın malzemesi olarak Polilaktik Asit (PLA) kullanılan termoakustik soğutucu (TAR), DeltaEC programı kullanılarak simüle edilmiştir. Tasarım için gerekli olan çalışma frekansı, iş akışkanı, sürücü oranı ve rezonaratör çapı gibi parametreler araştırmacılar tarafından ilgili literatüre uygun olarak seçilmiştir. Simülasyonda soğutma yükünün ve akustik sürücüye göre yığın konumunun değişiminin sistem performansı (COP) ve bağıl sistem performansı (COP_R) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca soğutma yükünün yığın merkez konumuna göre değişimi de incelenmiştir. Bulgular, soğutma yükünün artması ile COP değerinin doğrusal olarak arttığını; COP_R 'nin ise soğutma yükü artarken belirli bir değere kadar parabolik olarak arttığını bu değerden sonra yine parabolik olarak azaldığını göstermektedir. Ayrıca yığın merkez konumunun akustik sürücüden uzaklaşması ile COP değerinin doğrusal olarak azaldığını COP_R değerinin ise belirli bir değere kadar parabolik olarak arttığını bu değerden sonra yine parabolik olarak azaldığını göstermektedir. Yığın merkez konumunun akustik sürücüden uzaklaşması ile soğutma yükünün belirli bir değere kadar parabolik olarak arttığı bu değerden sonra yine parabolik olarak azaldığı tespit edilmiştir. Elde edile sonuçlar PLA malzemeden imal edilen yığın kullanılmasının diğer yığın malzemelerine alternatif olabileceğini göstermiştir.

Simulation of a Standing Wave Thermoacoustic Refrigerator Using PLA as Stack Material

Article Info

Research article
Received: 22/12/2025
Revision: 24/02/2026
Accepted: 26/02/2026

Keywords

Thermoacoustics
PLA Stack
ThermoacousticRefrigerator
DeltaEC
Cooling Coefficient of Performance (COP)

Abstract

Thermoacoustics is a combined science concerned with the conversion of sound energy into heat energy or vice versa. Thermoacoustic technology is a new and emerging technology with strong potential for the development of sustainable energy technologies. Although its fabrication is simple, the design of thermoacoustic devices is quite challenging. In this study, acoustically driven, standing wave, quarter-wavelength, fixed-diameter resonator TAR, using PLA as stack material, was simulated using the DeltaEC program. Parameters such as operating frequency, working fluid, drive ratio, and resonator diameter, which are necessary for the design, were selected by the researchers in accordance with the relevant literature. The simulation investigated the effects of varying cooling load and stack center position relative to the acoustic driver on system performance (COP) and relative system performance (COP_R). The variation of the cooling load with respect to the center of the stack position was also investigated. The findings show that the COP value increases linearly with increasing cooling load; The relative system performance shows a parabolic increase up to a certain value as the cooling load increases, and then a parabolic decrease after that value. Furthermore, it shows that as the center of the stack moves away from the acoustic driver, the COP value decreases linearly, while the COP_R value increases parabolically up to a certain value, and then decreases parabolically again. It was observed that as the center of the stack moves away from the acoustic driver, the cooling load increases parabolically up to a certain value, and then decreases parabolically again after that value. The results obtained have shown that using stack materials made from PLA could be an alternative to other stack materials.

*Netice Duman, e-mail: nduman@cumhuriyet.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1847061

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan küresel enerji krizi ve buna eşlik eden çevresel sorunlar nedeniyle verimli ve çevre dostu enerji dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi kritik bir önem kazanmıştır. Günümüzde cihaz ve süreç tasarımlarında çevresel etkilerin ön sırada olması gerekliliği giderek artmakta ve bu durum araştırmacıları geleneksel ve çevresel açıdan zararlı yöntemlerin yerine daha sürdürülebilir alternatifler geliştirmeye yöneltmektedir. Termoakustik teknoloji, ses enerjisinin işe ve ısıya dönüştürülmesi ya da bunu tersi ile ilgilenen disiplinler arası bir araştırma alanı olup, çalışma prensibi akustik, termodinamik ve akışkanlar mekaniği temellerine dayanmaktadır [1]. Termoakustik teknolojinin geleneksel enerji dönüşüm yöntemlerine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Geleneksel soğutma sistemleri, birden fazla hareketli parça içeren ve soğutucu buhar sıkıştırmalı çevrimlere dayanırken, termoakustik soğutma sistemleri hareketli parçalar içermeyen basit bir tasarıma sahiptir. Ayrıca çevre dostu akışkanlar kullanmaları, düşük maliyetli olmaları ve yapısal olarak daha az karmaşık olmaları nedeniyle önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [2,3]. Termoakustik soğutucuların düşük verimli olması ticari ölçekte uygulanmasında önemli bir dezavantajdır. Bu nedenle, termoakustik cihazların tasarımında uygulanabilir iyileştirmeleri araştırmak için çoğunlukla deneysel nitelikte birçok çalışma yapılmıştır.

Sondhauss 19. yüzyılın ortalarında cam bir ampule bağlı cam bir tüpte gözlemlenen termoakustik olguyu incelemiş ve bu yapı daha sonra "Sondhauss tüpü" olarak adlandırılmıştır. Bu çalışma, termoakustik cihazların öncüsü olarak kabul edilmektedir [4]. 1962 yılında Carter ve White [5], rezonaratör içerisine bir plaka dizisi ekleyerek "optimize edilmiş" bir Sondhauss tüpü geliştirmiş ve bu sayede sistemin performansında önemli iyileşmeler sağlamışlardır. Feldman (1966) ise Carter vd. çalışmalarını devam ettirerek 600 W ısı girdisiyle 27 W akustik güç üretmeyi başarmıştır [6]. Swift ve Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndaki araştırmacılar, lineer termoakustik, akış türbülansının viskoz kayıplar üzerindeki etkisi, gözenekli yığın simülasyonları, akış alanındaki değişimlere bağlı yerel kayıplar ve termoakustik benzerlik ilkeleri gibi konularda alana önemli katkılar sunmuşlardır [7,8,9]. Bu çalışmalar, lineer termoakustik teori kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonların doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca araştırma ekibi, farklı geometri ve konfigürasyonlara sahip termoakustik soğutucular ile motorların tasarlanması ve modellenmesi amacıyla "Düşük Genlikli Termoakustik Enerji Koruması için Tasarım Ortamı" (DeltaEC) adlı yazılımı geliştirmiştir [10]. Bu yazılım, günümüzde de termoakustik sistemlerin tasarımı ve analizi için temel araçlardan biri olarak geniş şekilde kullanılmaktadır.

Saredo vd. (2014) çalışmalarında, ısı ve ses etkileşimine dayanan termoakustik sistemlerinin performansını DeltaEC yazılımı kullanarak incelemektedir. He, Ar, N_2 ve He–Ar karışımı gibi farklı çalışma gazlarıyla yapılan simülasyonlarda, çalışma basıncı ve ısı girişinin basınç genliği ile başlangıç sıcaklığını artırdığı, ancak rezonans frekansını etkilemediği belirlenmiştir [11]. İrfan vd. (2019) çalışmalarında, duran dalgalı motor için optimum tasarım parametreleri DeltaEC yazılımı kullanılarak analiz etmişler ve DeltaEC'nin termoakustik motor tasarımında etkin bir optimizasyon aracı olduğunu doğrulamışlardır [12]. Kajurek vd. (2019), 10 W nominal soğutma kapasiteli termoakustik soğutucunun tasarımını ve performans analizini sunmuşlardır. Tasarım sürecinde, yığının optimum uzunluğu ve konumu basitleştirilmiş lineer termoakustik modelle belirlenmiş ve sistem DeltaEC yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir [13]. Abd El-Rahman vd. (2020), TAR sistemini DeltaEC ile modellemiş ve deneysel veriler ile model sonuçları arasında belirgin farklılıklar olduğunu göstermişlerdir. Bu uyumsuzluğun, sistemdeki nispeten yüksek sürüş oranından (yaklaşık %7) kaynaklandığı belirtilmiştir [14]. Jana vd. (2020) çalışmalarında, termoakustik soğutucularda soğutmanın oluşumunu sağlayan salınımlı basınç ve yer değiştirme dalgalarının davranışını, DeltaEC yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelemişlerdir [15]. Ramadan vd. (2021) akustik sürücünün yüksek genliklerinde çalıştığı durumlarda DeltaEC'nin doğruluğunun azaldığını ve özellikle yığın boyunca oluşan doğrusal olmayan sıcaklık gradyanını tahmin edemediğini rapor etmişlerdir [16]. Biswas vd. (2021) tarafından seramik yığınların yanı sıra eklemeli imalat (3D baskı) polimer yığınlarının da kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yığın parametrelerinin performansa etkisi hem deneysel çalışmalar hem de Rott'un doğrusal teorisine dayanan DeltaEC yazılımı ile gerçekleştirilen tek boyutlu simülasyonlar üzerinden incelenmiştir. Bulgular, polimer tabanlı eklemeli imalat yığınlarının uygun tasarım ile seramik muadilleriyle karşılaştırılabilir termoakustik performans sunabildiğini göstermektedir [17]. Patel vd. (2021) tarafından, çevreye zararlı soğutucu akışkanlar yerine helyum, argon, ksenon, oksijen ve azot gibi inert gazlar kullanan termoakustik soğutucuların performansı incelenmiştir. Yığının geometrik

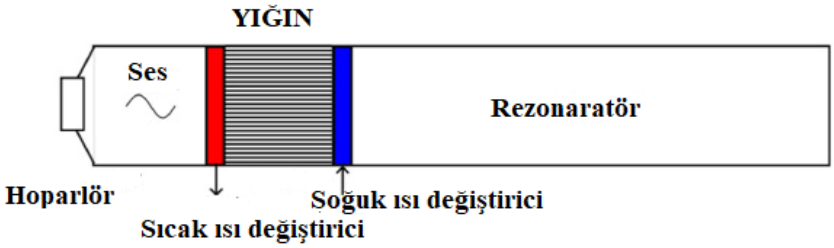
özelliklerinin sistem verimine etkisi değerlendirilmiş ve 3D baskı ile üretilen Polilaktik Asit (PLA) yığının performansı analiz edilmiştir. Paralel plaka ve spiral yığınlarda sık karşılaşılan tıkanma problemlerine dikkat çekilmiş, buna yönelik alternatif tasarımlar geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında DeltaEC kullanılarak farklı sıcaklık farkları ve frekans değerleri için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiş, 3D baskılı PLA yığının mylar ile karşılaştırılabilir performans sunduğu görülmüştür [18]. Sarpero ve ark. (2023), üç farklı yığın geometrisinin (dairesel, petek ve kare) test edildiği bir TAR sistemine ait deneysel verileri DeltaEC sonuçlarıyla karşılaştırmış ve modelin çoğu durumda yığın boyunca sıcaklık farkını ±2 K hata aralığı ile tahmin edebildiğini göstermiştir [19]. Prashantha vd. (2023), helyum ve hava kullanılarak 28 K sıcaklık farkına göre tasarlanmış 500 W kapasiteli TAR performansını incelemişlerdir. Tasarım, Rott'un doğrusal termoakustik teorisi kullanılarak normalleştirilmiş parametrelerle optimize edilmiş; plakalar arası boşluk, gözeneklilik ve rezonans frekansı gibi etkenlerin performansa etkisi analiz edilmiştir [20]. Siva vd. (2023), 500 Hz'de çalışan ve helyumu iş gören akışkan olarak kullanan yarım dalga boylu bir termoakustik soğutucu için iki yığınlı rezonaratör tasarımını incelemişler ve 1m uzunluğundaki rezonaratörde farklı yığın tiplerinin performansı DeltaEC yazılımı kullanılarak karşılaştırmışlardır [21]. Duman ve arkadaşları (2023), laboratuvar ölçeğinde 3 W güce sahip, çeyrek dalga boyu bir TAR, yine Duman ve arkadaşları (2024) diğer bir çalışmada ise kademeli bir rezonaratör tasarlayarak geliştirdikleri TAR sistemlerini DeltaEC yazılımı kullanarak simüle etmişlerdir [22,23]. DeltaEC ayrıca hareketli dalgalı TAR sistemlerinin modellenmesinde de kullanılmıştır [24,25].

Bu çalışmada, tasarlanan akustik tahrikli, duran dalgalı, çeyrek dalga boylu, sabit çaplı rezonaratörlü ve yığın malzemesi olarak PLA kullanılan termoakustik soğutucu, DeltaEC programı kullanılarak simüle edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Termoakustik Soğutucu (Thermoacoustic Refrigerator)

Termoakustik Soğutucu (TAR), ses enerjisini işe dönüştürerek soğutma yapan bir sistemdir [26]. TAR ana elemanları rezonaratör, yığın, ısı değiştiriciler ve akustik sürücüden oluşmaktadır [27]. Şekil 1'de duran dalgalı TAR'ın şeması görülmektedir.



Şekil 1. Duran dalgalı termoakustik soğutucu (Standing wave thermoacoustic refrigerator)

TAR, düşük sıcaklık bölgesinden yüksek sıcaklık bölgesine ısı taşımak için akustik sürücüler tarafından üretilen akustik gücü kullanır [28]. Akustik sürücü, rezonaratör içerisindeki ses dalgalarını oluşturan temel bileşendir ve hoparlör ya da bir termoakustik motor gibi çeşitli cihazlar bu amaçla kullanılabilir. Çalışma akışkanı, akışkanın yoğunluğu, izobarik özgül ısısı, akustik empedansı, ısıl iletkenliği ve Prandtl sayısı soğutucu performansı üzerinde belirleyici bir rol oynar. Bu özellikler, akışkan içerisindeki ısıl ve viskoz nüfuz derinliklerini belirleyerek enerji transfer mekanizmasını doğrudan etkilemektedir. Sürücü oranı, ortalama akışkan basınç ve sıcaklığı, sıcak ve soğuk ısı değiştiricileri arasındaki sıcaklık farkı ve çalışma frekansı, TAR performansı üzerinde kritik etkiye sahiptir. Çalışma frekansı, akustik dalga boyunu ve dolayısıyla soğutucunun geometrik boyutlarını belirler. Yüksek frekans, daha kompakt sistem tasarımına olanak sağlarken daha yüksek akustik güç gereksinimine ve artan ısı kayıplarına neden olabilir. Yığın malzemesinin yoğunluğu, ısı iletkenliği, geometrisi ve yığın konumu performansı doğrudan etkileyen parametrelerdir. Yığın tasarımı, termoakustik cihazların verimli çalışması için kritik öneme sahiptir. Duran dalgalı bir termoakustik soğutucuda, yığın ile çalışma akışkanı arasındaki ısıl temas ne çok zayıf ne de aşırı güçlü olmalıdır [27, 29]. Isıl temasın çok zayıf olması ısı transferini yetersiz kılarken, çok güçlü olması viskoz kuvvetlerin artmasına ve gazın salınım ataleti üzerinde baskın hale gelerek soğutucunun performansının azalmasına neden olur [26]. Isıl (δ_k)

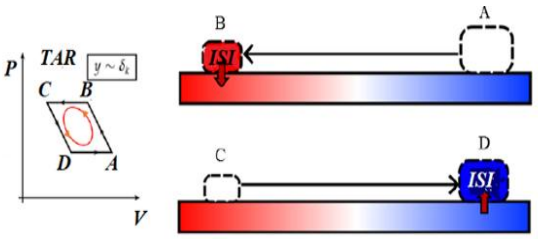
ve viskoz (δ_v) nüfuz derinlikleri ile frekansın tanımlandığı eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$\delta_k = \sqrt{2K/(\omega\rho_m c_p)} \quad 2.1$$

$$\delta_v = \sqrt{2\mu/(\omega\rho_m)} \quad 2.2$$

$$f = \frac{a}{4L_T} \quad 2.3$$

Şekil 2'de görülen termodinamik çevrim, Brayton çevrimiyle benzerlik göstermekte olup net akustik güç üretimi sağlamaktadır.



Şekil 2. (a) Duran dalga TAR için termodinamik çevrim ve (b) Yığınının içindeki bir gaz parselinin sıkışması ve genişlemesi [30] ((a) Thermodynamic cycle for standing-wave thermoacoustic refrigerator and (b) Compression and expansion of a gas parcel inside the stack)

Yığın üzerinde taşınan ısı ve iş enerjileri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [1].

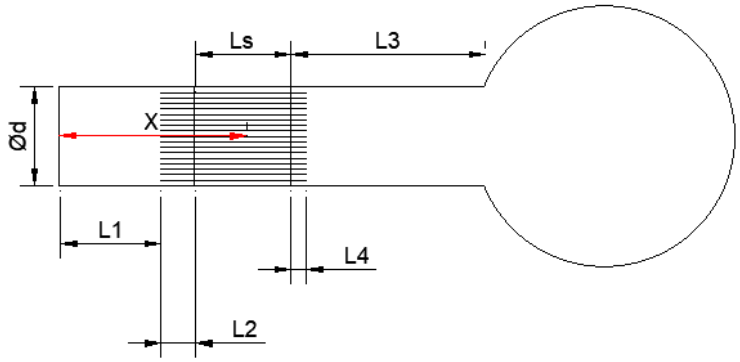
$$\dot{Q}_c = -\frac{1}{4}\Pi\delta_k\left(\frac{T_m\beta p_1^s\langle u_1^s\rangle}{(1+\varepsilon_s)(1+\sigma)\left(1-\frac{\delta_v}{y_0}+\frac{{\delta_v}^2}{2{y_0}^2}\right)}\right).\left[\Gamma\frac{1+\sqrt{\sigma}+\sigma+\sigma\varepsilon_s}{1+\sqrt{\sigma}} - \left(1+\sqrt{\sigma}-\frac{\delta_v}{y_0}\right)\right] - \Pi(y_0K+lK_s)\frac{dT_m}{dx} \quad 2.4$$

$$\dot{W}_2 = -\frac{1}{4}\Pi\delta_k\Delta x\frac{(\gamma-1)\omega({p_1}^s)^2}{\rho_m a^2(1+\varepsilon_s)}.\left(\frac{\Gamma}{\left(1+\sqrt{\sigma}\right)\left(1-\frac{\delta_v}{y_0}+\frac{{\delta_v}^2}{2{y_0}^2}\right)}-1\right) - \frac{1}{4}\Pi\delta_v\Delta x\frac{\omega\rho_m\langle{u_1}^s\rangle^2}{\left(1-\frac{\delta_v}{y_0}+\frac{{\delta_v}^2}{2{y_0}^2}\right)} \quad 2.5$$

Bu çalışmada kullanılan tasarım parametreleri Tablo 1 de verilmiştir. Tasarımda paralel plaka geometrili yığın kullanılmıştır. Rezonaratör boyu eşitlik 2.3 yardımı ile hesaplandıktan sonra tasarım için gerekli diğer boyutlar ilgili literatüre uygun olarak seçilmiş ve şekil 3' te gösterilmiştir.

Tablo 1. Tasarım Parametreleri değerleri (Design parameters and their values)

Tasarım Parametreleri	İş akışkanı Parametreleri (Helyum)	Yığın malzemesi Parametreleri (PLA)
P_m=10 Bar	ρ_m=1,6046 kg/m^3	ρ=1250 kg/m^3
T_m=281,5 K	c_p=5193,4 J/kgK	c=1800 J/kgK
ΔT=37K	σ=0,6793	2l=1,2 mm
f=350Hz	k=0,015243 W/mK	$2y_0$=0,6 mm
D=0,03	a=1019,2 m/s	k=0,13 W/mK



L_1=7 cm, L_2=1,2 cm, L_s= 7,85 cm, L_4=0,6 cm, L_3=56,2 cm X=12,125 cm, d_1=10 cm, $A_{küre}$=48310mm^2, $V_{küre}$=1,5 lt

Şekil 3. Tasarlanan TAR'ın CAD çizimi (CAD drawing of the designed TAR)

3. DELTA EC SİMÜLASYONU (DELTA EC SIMULATION)

Ward ve Swift [31] tarafından geliştirilen DeltaEC, termoakustik simülasyonda en yaygın kullanılan yazılımlardan biridir. Tek boyutlu sayısal simülasyonlar için tasarlanmış olan bu araç, termoakustik sistemlerin akustik ve termodinamik davranışlarını hızlı ve güvenilir şekilde modelleyebilme kapasitesi nedeniyle araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. DeltaEC, termoakustik sistemlerin tasarım ve performans optimizasyonuna yönelik olarak, kullanıcı tarafından tanımlanan hedefler doğrultusunda çözüm üretmektedir. Program, düşük genlikli akustik yaklaşım kapsamında tek boyutlu dalga denklemini; süreklilik, momentum ve enerji denklemleri ile birlikte çözmekte ve her bir sistem bileşeninde ortaya çıkan ısıl ve viskoz kayıpları hesaba katmaktadır. Ancak, akustik akış, sınır tabaka türbülansı ve dalga dikliği gibi doğrusal olmayan etkiler modele dâhil edilmemiştir. Programda eşitlik 2.3 ve 2.4 verilen denklemler zamandan bağımsız olarak eksenel doğrultuda nümerik olarak integre edilmektedir. Boru, koni, yığın ve ısı değiştiriciler gibi bileşenlerin geometrik tanımlamalarının ardından, yazılım bu bileşenler boyunca çözüm yaparak tahmin–hedef yöntemi aracılığıyla optimal tasarım parametrelerini belirlemektedir [32, 33]. Delta EC'deki bir model, birbirine bağlı birden fazla önceden tanımlanmış segmentten oluşur; her önceden tanımlanmış segment, kullanıcının belirli parametreleri ayarlamasına olanak tanır. Sayısal entegrasyon, her segmentin başından sonuna kadar gerçekleşir ve böylece tüm model çözülür. Şekil 3' te ölçüleri verilen sisteme ait Delta EC programının ara yüzü şekil 4' te görülmektedir.

```
  0 BEGIN
                1.0000E+06 a Mean P Pa
Gues                537.99 b Freq   Hz
                    300.00 c TBeg   K
                2.8800E+04 d |p|    Pa
                    0.0000 e Ph(p)  deg
Gues            4.1454E-03 f |U|    m^3/s
                    0.0000 g Ph(U)  deg
Optional Parameters
helium          Gas type
  1 VESPEAKER  electrodynamic driver
  2 RPN        enforce resonance
  3 RPN        enforce desired pressure amplitude
  4 DUCT       ambient temperature duct
  5 HX         ambient temperature heat exchanger
  6 STKSLAB    Stack
  7 HX         Cold heat exchanger
  8 DUCT       Cold Duct
  9 COMPLIANCE end bulb
 10 HARDEND    target this to seal the end
 11 RPN        gross cooling power is net power plus tail dissipation
 12 RPN        temperature ratio, Tc/T0
 13 RPN        COP / Carnot's COP
```

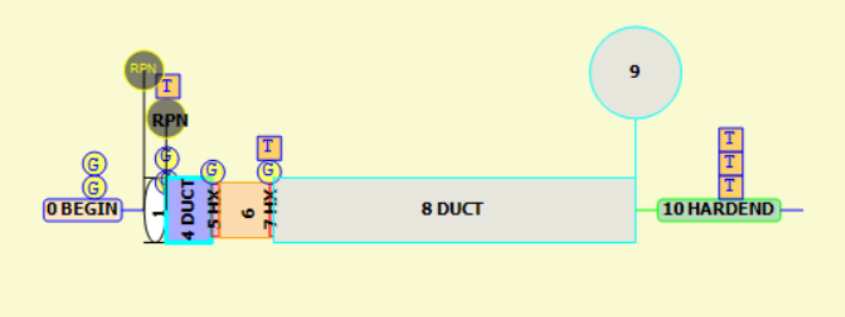
Şekil 4. DeltaEC programında kullanılan segmentler (Segments used in the DeltaEC program)

Simülasyonda kullanılan tahmin(G)-hedef (T) (guess-target) parametreleri şekil 5'te görülmektedir. Simülasyon rezonans frekansı tahmin edilerek gerçekleştirilmiştir.

Guesses:				Targets:					
				Bull's-eyes			Results		
desc	addr	value	unit	desc	addr	value	addr	value	unit
BEGIN:Freq	0b	538.18	Hz	RPN:RPNval	2a	0.0000	2A	9.5350E-15	
BEGIN:|U|	0f	3.9995E-03	m^3/s	RPN:RPNval	3a	2.8800E+04	3A	2.8800E+04	
VESPE:|V|	1h	7.6104	V	HX:SolidT	7f	263.00	7H	263.00	K
VESPE:Ph(V)	1i	-122.25	deg	HARDE:R(1/z)	10a	0.0000	10G	1.0575E-17	
HX:HeatIn	5e	-105.02	W	HARDE:I(1/z)	10b	0.0000	10H	2.8122E-16	
HX:HeatIn	7e	43.972	W	HARDE:Htot	10c	0.0000	10E	2.8422E-14	W

Şekil 5. DeltaEC Simülasyonda kullanılan tahmin (G)-hedef (T) parametreleri (DeltaEC simulation guess (G)-target (T) parameters)

DeltaEC programında tasarlanan TAR'ın şematik görünümü şekil 6 'da görülmektedir.



Şekil 6. DeltaEC simülasyonu TAR sistemi kısımları (Parts of the TAR system in DeltaEC simulation)

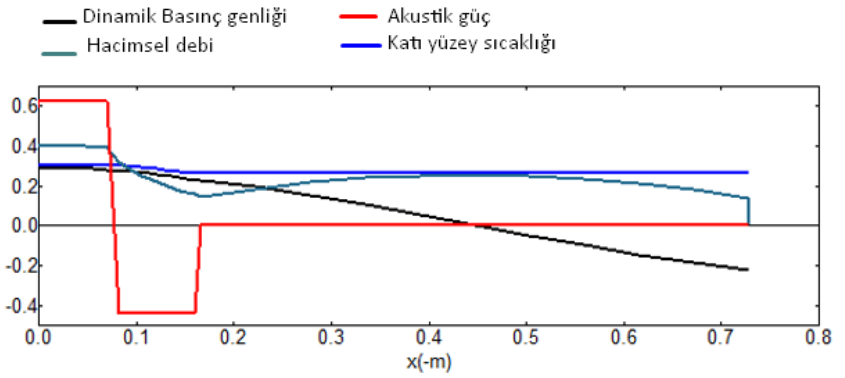
Simülasyonda kullanılan segmentler tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Simülasyonda kullanılan segmentler (Segments used in the simulation)

Segment No	Adı
0	Başlangıç
1	Hoparlör
2	Faz açısının sıfırlanması
3	D sürücü oranının değerinin verilmesi
4	Boru
5	Sıcak Isı Değiştirici
6	Paralele Plakalı Yığın
7	Soğuk Isı Değiştirici
8	Boru
9	Yarım Küre Hazne
10	Hardend

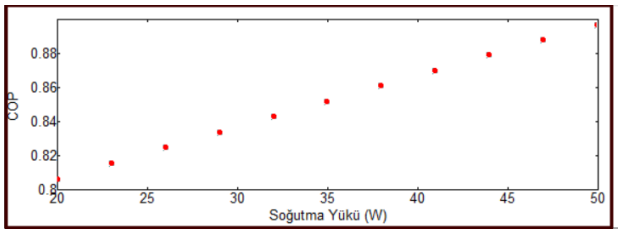
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (DELTAEC SIMULATION RESULTS)

Dinamik basınç genliği, hacimsel debi, akustik güç girdisi ve katı yüzey sıcaklığının rezonaratör boyunca değişimi şekil 7' de görülmektedir. Dinamik basınç genliğinin en büyük olduğu noktaya yakın bir yere yığın merkezi konumlandırılarak sistem COP' nin maksimum olması sağlanmıştır. Akustik güç başlangıç noktasında en büyük değerini alırken, rezonaratörün uç konumunda sıfır olmaktadır. Akustik güç tüketimi TAR segmentlerindeki tersinmezliklerden kaynaklanmaktadır. Katı yüzey sıcaklığı sadece yığın bölgesinde küçük bir değişim gösterirken diğer bölgelerde sabit kalmaktadır. Hacimsel debi başlangıç konumunda en büyük değerini alırken diğer segmentlerde artma ve azalma şeklinde değişim göstererek rezonaratörün uç kısmında sıfır olmaktadır.



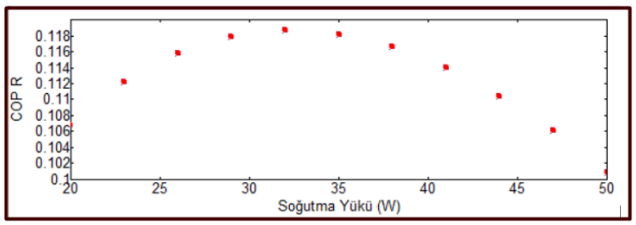
Şekil 7. Dinamik basınç genliği, hacimsel debi, akustik güç girdisi ve katı yüzey sıcaklığının rezonaratör boyunca değişimi (Variation of dynamic pressure amplitude, volumetric flow rate, acoustic power input and solid surface temperature along the resonator)

Soğutma yüküne bağlı olarak sistem performansının değişimi şekil 8'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sistemin COP değeri soğutma yükü artarken doğrusal olarak artış göstermektedir.



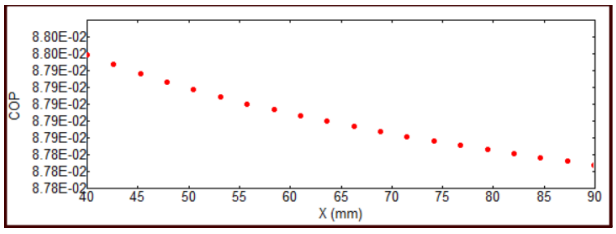
Şekil 8. COP' nin Soğutma yüküne bağlı olarak değişimi (Variation of COP as a function of cooling load)

COP_R 'nin soğutma yüküne bağlı olarak değişimi şekil 9'da görülmektedir. Soğutma yükü artarken COP_R soğutma yükü ile birlikte belirli bir noktaya göre parabolik olarak artış göstermiş, bu noktadan sonra ise parabolik olarak azalmıştır. Bu parabolik davranış, sistemde optimal bir çalışma noktasının varlığına işaret etmektedir. Düşük yüklerde sistem Carnot sınırından uzak çalışırken, yük arttıkça faz ilişkileri ve basınç–hız genliği etkileşimi daha verimli hale gelmektedir. Ancak daha yüksek yüklerde artan sıcaklık gradyanı, iletim kayıpları ve viskoz dağılma etkileri baskın hale gelmekte ve COP_R düşmektedir. Şekil 8 ve Şekil 9' da görülen COP ve COP_R değişimlerinin Tijani vd. (2002)' nin çalışmalarında elde ettikleri deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür [34].



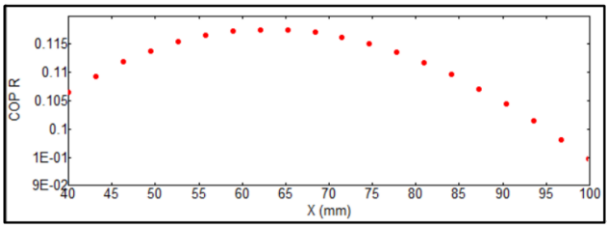
Şekil 9. Soğutma yüküne bağlı olarak COP_R değişimi (Variation of COP_R as a function of cooling load)

Yığının yüksek basınç genliğine sahip bölgede konumlandırılması, gaz parsellerinin sıkışma–genişleme döngüsünde daha büyük enerji alışverişi yapmasına olanak tanır ve COP maksimum olur. Yığın merkez konumunun akustik sürücüden uzaklaşması ile COP' nin azaldığı Şekil 10 'da görülmektedir. Bunun nedeni şekil 7 'de görüldüğü gibi dinamik basınç genliğinin rezonaratör boyunca azalmasıdır.



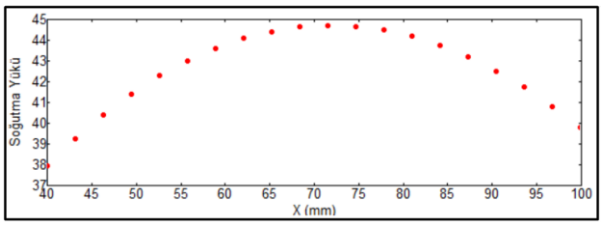
Şekil 10. Sistem COP sinin yığın merkez konumuna göre değişimi (Variation of system COP with respect to the stack center position)

Şekil 11 'de görüldüğü gibi, yığın merkez konumunun akustik sürücüden uzaklaşması ile COP_R belirli bir noktaya kadar parabolik olarak artmakta, bu noktadan sonra ise parabolik olarak azalmaktadır.



Şekil 11. Sistem COP_R'sinin yığın merkez konumuna göre değişimi (Variation of system COP_R with respect to the stack center position)

Şekil 12 'de görüldüğü gibi, yığın merkez konumunun akustik sürücüden uzaklaşması ile soğutma yükü belirli bir noktaya kadar parabolik olarak artmakta, bu noktadan sonra ise parabolik olarak azalmaktadır.



Şekil 12. Soğutma yükünün yığın merkez konumuna göre değişimi (Variation of cooling load with respect to the stack center position)

Farklı yığın ve ısı değiştiricileri malzemesi kullanılması durumlarına göre yapılan simülasyon sonuçları tablo 3' de görülmektedir. PLA malzemeden yapılmış yığının mylar ve kapton yığına alternatif olabileceği görülmüştür.

Tablo 3. Farklı yığın malzemeleri için simülasyon sonuçları (Simulation results for different stack materials)

Yığın malzemesi	COP	COP_R
kapton	0,87864	0,11624
Mylar	0,87863	0,11538
PLA	0,87864	0,11048
Çelik	0,87849	0,090671

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, 10 cm çapında, sıcak ve soğuk ısı değiştiriciler arasındaki sıcaklık farkı 37 K, yığın malzemesi olarak PLA kullanan küçük kapasiteli duran dalgalı bir termoakustik soğutucunun simülasyonu DeltaEC bilgisayar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Teorik tasarım, çalışma frekansı, çalışma basıncı, iş akışkanı, sürücü oranı ve rezonaratör çapı gibi araştırmacı tarafından seçilen tasarım parametrelerine dayanır. Tasarlanan duran dalgalı sabit rezonaratör çaplı model DeltaEC bilgisayar yazılımı ile kontrol edilmiş iyi bir uyum sağlanmıştır. Tasarımı yapılan soğutucunun performansı farklı soğutma yüklerinde sümile edilmiştir. Simülasyon sonucunda soğutucu performansının soğutma yükü ile birlikte doğrusal olarak arttığı bağıl soğutma performansının ise soğutma yükü ile birlikte belirli bir noktaya göre parabolik olarak artış gösterdiği, bu noktadan sonra ise parabolik olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Elde edile sonuçlara göre PLA malzemeden imal edilen yığın kullanılmasının diğer yığın malzemelerine alternatif olabileceğini göstermiştir. PLA malzeme kullanılmasının en önemli avantajı imalatlarının 3D yazıcılarda yüksek hassasiyette ve farklı geometrilerde kolaylıkla yapılabilmesidir. Daha ileri çalışmalar için yığın malzemesi olarak PLA kullanılarak tasarlanan termoakustik soğutucunun prototipi yapılarak bu prototip üzerinde deneyler gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları deneysel olarak doğrulanmalıdır.

SİMGELER DİZİNİ

a	Ses hızı, m/s	$\mathbf{T_C}$	Soğuk ısı değiştiricisi sıcaklığı, K
A	Yığının dik kesit alanı, m^2	$\mathbf{T_H}$	Sıcak ısı değiştirici sıcaklığı, K
$\mathbf{A_{küre}}$	Küre alanı, m^2	$\mathbf{T_m}$	Ortalama gaz sıcaklığı, K
$\boldsymbol{c_p}$	Sabit basınçta özgül ısı, J/kgK	$\mathbf{T_{solid}}$	Katı yüzey sıcaklığı, K
$\boldsymbol{c}$	özgül ısı, J/kgK	**X**	Yığın merkez konumu, mm
D	Sürücü oranı	**Δx**	Gaz parseli uzunluğu, mm
$\mathbf{d_1}$	Rezonaratör çapı, mm	**λ**	Dalga boyu, m
$\boldsymbol{f}$	Rezoranatör frekansı, Hz	$\boldsymbol{\mu}$	İş gören akışkanın dinamik viskozitesi, kg/ms
k	Isı iletim katsayısı, W/m.K	$\mathbf{\Delta T_m}$	Yığının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı, K
$\boldsymbol{l}$	Yığın plaka kalınlığının yarısı, mm		
$\mathbf{L_1}$	Hoparlörden sıcak ısı değiştiriciye kadar mesafe, mm	$\boldsymbol{\dot{W}_2}$	Rezonaratör sistemine akustik güç girişi, W
$\mathbf{L_2}$	Sıcak ısı değiştirici uzunluğu, mm	$\boldsymbol{\beta}$	Isıl genleşme katsayısı, K^{-1}
$\mathbf{L_3}$	Yığının uzunluğu, mm	$\boldsymbol{\delta_k}$	Isıl nüfuz derinliği, mm
$\mathbf{L_4}$	Soğuk ısı değiştirici uzunluğu, mm	$\boldsymbol{\delta_v}$	Viskoz nüfuz derinliği, mm
$\mathbf{L_T}$	Rezonaratör toplam boyu, mm	$\boldsymbol{\gamma}$	Özgül ısılar oranı
$\mathbf{P_m}$	Ortalama basınç, kPa	**Γ**	Normalize edilmiş sıcaklık farkı
$\mathbf{P_a}$	Akustik veya dinamik basınç genliği, kPa	$\mathbf{K_s}$	Yığının ısıl yayılım katsayısı
$\boldsymbol{p_1^s}$	Basınç genliğinin pozitif reel kısmı	$\boldsymbol{\rho_m}$	Ortalama yoğunluk, kg/m^3
$\boldsymbol{\dot{Q}_c}$	Yığın üzerinden taşınan ısı, W	$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk, kg/m^3
$\boldsymbol{u_1^s}$	Hız genliğinin pozitif reel kısmı	$\boldsymbol{\sigma}$	Prandtl sayısı
$\mathbf{V_{küre}}$	Küre hacmi, m^3	**Π**	Yığın ve ısı değiştiricilerin çevre uzunluğu, mm
ν	Kinematik viskozite, Pas	**ω**	Açısal frekans
$\mathbf{y_o}$	Plakalar arası boşluğun yarısı	$\mathbf{COP_C}$	Carnot soğutma performans katsayısı
COP	Soğutma performans katsayısı	$\mathbf{COP_R}$	Bağıl soğutma performans katsayısı
$\boldsymbol{\varepsilon_s}$	Boyutsuz yığın ısı kapasitesi düzeltme faktörü	$\boldsymbol{\Lambda}$	Gaz ısı iletimi düzeltme faktörü

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Netice DUMAN*:** Literatür araştırması, simülasyon için gerekli seçimlerin yapılması, simülasyon sonuçlarını elde edilmesi ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Halil İbrahim ACAR: Simülasyon için gerekli seçimlerin yapılması, sonuçların yorumlanması,

makalenin düzenlenmesi ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Rott, Nikolaus. Thermoacoustics. Advances in applied mechanics, 1980; 20: 135-175.

[2] Tijani, MEH, Zeegers JCH, and De Waele ATAM. The optimal stack spacing for thermoacoustic refrigeration. The Journal of the Acoustical Society of America 2002; 112.1: 128-133.

[3] Qiu, LM, et al. Numerical simulation of the onset characteristics in a standing wave thermoacoustic engine based on thermodynamic analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer 2012; 55.7: 2200-2203.

[4] Feldman Jr KT. Review of the literature on Sondhauss thermoacoustic phenomena. Journal of Sound and Vibration. 1968;7(1): 71-82.

[5] Carter RL, White M and Steele AM. Private communication of atomics international division of North American aviation. Inc. 1962; September 24.

[6] Feldman K. A Study of Heat Generated Pressure Oscillations in a Closed End Pipe, University of Missouri, 1966.

[7] Swift GW, Ward WC, Simple harmonic analysis of regenerators, J. Thermophys. Heat. Trans. 1996; 10: 652–662.

[8] Smith BL, Swift GW, Power dissipation and time-averaged pressure in oscillating flow through a sudden area change, J. Acoust. Soc. Am. 2003; 113: 2455–2463.

[9] Olson JR, Swift GW, Similitude in thermoacoustics, J. Acoust. Soc. Am. 1994; 95:1405– 1412.

[10] Ward WC, Swift GW, Design environment for low-amplitude thermoacoustic engines, J. Acoust. Soc. Am. 1994; 95: 3671–3672.

[11] Sarode, A, Dighe, V, Ingle V, & Kolekar N. Theoretical investigation on standing wave thermoacoustic prime mover using Delta EC. International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET). 2014; 562, 568.

[12] Irfan AR, Zarhamdy MZM, Sazli SM, Amni MN, Shuaib NA, & Azlida A. Computational study on thermoacoustic heat engine for proposing a new method renewable technique. In AIP Conference Proceedings. 2019; (Vol. 2129, No. 1, p. 020181). AIP Publishing LLC.

[13] Kajurek J, Rusowicz A, Grzebielec A. Design and simulation of a small capacity thermoacoustic refrigerator. SN. Appl. Sci. 2019; 1:579.

[14] Abd El-Rahman AI, Abdelfattah WA, Abdelwahed KS, Salama A, Rabie A, Hamdy A. A compact standing-wave thermoacoustic refrigerator driven by a rotary drive mechanism, Case Stud. Thermal Eng. 2020; 21:100708.

[15] Jana A, Sarkar S & Mukhopadhyay A. Performance Study of a Small Capacity Thermoacoustic Refrigerator Using DELTA EC Software. In International Conference on Thermal Engineering and Management Advances. Singapore: Springer Singapore. 2020; 157-169.

[16] Ramadan IA, Bailliet H, Poignand G, Gardner D. Design, manufacturing and testing of a compact thermoacoustic refrigerator, Appl. Therm. Eng. 2021; 189:116705.

[17] Biswas S, Krawczyk Z, & Manimala JM. Evaluation of additively manufactured stacks for thermo-acoustic devices. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Institute of Noise Control Engineering.2021; 263 (2): pp. 4376-4387.

[18] Patel R, Singh V & Shah M. Performance Analysis of 3D Printed Stack for Standing Wave Thermoacoustic Refrigerator. In: Proceedings of the 26thNational and 4th International ISHMT-ASTFE Heat and Mass Transfer Conference December 17-20. 2021; IIT Madras, Chennai-600036.

[19] Sarpero E, Gourdon E, Borelli D. Experimental development and optimization of a standing wave thermoacoustic refrigerator using additive manufactured stacks, Int. J. Refrig. 2023; 146: 63–73.

[20] Prashantha BG, Seetharamu S, Narasimham GSVL & Manjunatha K. Effect of gas spacing and resonance frequency on theoretical performance of thermoacoustic refrigerators. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration.2023;31(1): 11.

[21] Sakthi MS, Swathiga DC & Bogadi S. Design and Analysis of a Thermoacoustic Cooling System with Two-Stack Arrangement for Different Types of Stacks. In: International Conference on Advances in Mechanical

Engineering and Material Science. Singapore: Springer Nature Singapore 2023; 69-84.
[22] Duman N, Acar Hİ & Yıldırım G. Design and Simulation of Thermoacoustic Cooling System. 24th Thermal Science and Technology Congress (ULIBTK'23) with international participation, 2023; 1(1):83-91.
[23] Duman N, Acar Hİ and Ertürk L. Design and simulation of a standing wave thermoacoustic refrigerator using air as the working fluid. International Journal of Energy Studies 2024; 9(4): 905-924.
[24] Tijani MEH, Spoelstra S. Study of a coaxial thermoacoustic-Stirling cooler, Cryogenics. (Guildf) 2008; 48: 77–82,
[25] Desai AB, Desai KP, Naik HB, Atrey MD. Optimization of thermoacoustic engine driven thermoacoustic refrigerator using response surface methodology, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017; 171:012132,
[26] Setiawan I, Utomo ABS, Katsuta M, Nohtomi M. Experimental study on the influence of the porosity of parallel plate stack on the temperature decrease of a thermoacoustic refrigerator, J. Phys.: Conf. Ser. 2013; 423: 01203
[27] Nouh MA, Arafa NM, Abdel-Rahman E, Stack parameters effect on theperformance of anharmonic resonator thermoacoustic heat engine, Arch. Mech. Eng. 2014; 61: 115–127,
[28] Yahya SG, Mao X, Jaworski AJ. Experimental investigation of thermal performance of random stack materials for use in standing wave thermoacoustic refrigerators, Int. J. Refrig. 2017; 75: 52–63,
[29] Tasnim SH, Mahmud S, Fraser RA. Effects of variation in working fluids and operating conditions on the performance of a thermoacoustic refrigerator, Int. Commun. Heat Mass Transf. 2012; 39:762–768.
[30] Ali U, Al-Mufti O & Janajreh I. Harnessing sound waves for sustainable energy: Advancements and challenges in thermoacoustic technology. Energy Nexus. 2024; 15: 100320.
[31] Ward WC, Swift GW. Design environment for low-amplitude thermoacousti engines, J. Acoust. Soc. Am. 1994; 95: 3671–3672,
[32] Swift GW, Thermoacoustic engines. The Journal of the Acoustical Society of America, 1988; 84(4): 1145-1180.
[33] Johnson RA, Garrett SL & Keolian RM. Thermoacoustic cooling for surface combatants. Naval engineer's journal. 2000; 112(4): 335-345.
[34] Tijani MEH, Zeegers JCH & De Waele A TAM. Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator. Cryogenics. 2002; 42(1): 59-66.