

Havacılıkta Kullanılan Elektronik Podun Isıl Kontrolü

*¹Muhammed Asım Kesercioğlu, ¹Abdullah Feyzi Keleş, ^{2,3}Nedim Sözbir, ¹Yusuf Çay

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya, Türkiye,

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya, Türkiye

³TÜBİTAK MAM, Gebze, Kocaeli, Türkiye

Özet

Pod, havacılıkta farklı görevler için kullanılmak üzere içerisinde çeşitli faydalı yükler bulunduran kutudur. Bu faydalı yükler elektronik ekipmanlardan oluşurken; keşif, arazi gözetleme, hedefleme, kızılötesi görüş, navigasyon gibi görevlerde kullanılmak üzere pod içerisine yerleştirilir. Pod; ön, orta ve arka olmak üzere üç ana bölümden oluşur.

Podun içerisinde en önemli kısım ısı kontrol sistemidir. Podun içerisinde bulunan elektronik ekipmanlar belirlenmiş sıcaklık değerleri arasında olmalıdır. Tüm elektronik cihazlar gibi podun içerisindeki elektronik ekipmanlar da belli miktarda ısı yaymaktadır. Yayılan bu ısı bir soğutma sistemi ile alınmadığında elektronik ekipmanlara zarar vererek çalışma performanslarının düşmesine ya da tamamen çalışmamasına neden olmaktadır. Bu sebeple ısı yayan elektronik ekipmanlardan ısının alınması gerekmektedir. Yapılan soğutma sonucunda da istenilen şartlar altında elektronik podun çalışması sağlanmaktadır. Podun ısı kontrolünün en verimli şekilde yapılabilmesi için ısı kontrol sisteminin, podun orta kısmına yerleştirilmesi gerekmektedir. Ekipmanların ısı kontrolü; direk ram havasının kullanıldığı hava çevrimli sistem ile, buhar çevrimli soğutma sistemiyle veya bu ikisinin birlikte olduğu hibrit sistem ile yapılmaktadır.

Bu çalışmada havacılıkta kullanılan ve içerisindeki ekipmanların 5000 W ısı yaydığı elektronik podun soğutulması amacıyla hava çevrimini kullanarak çalışan bir ısı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Isıl kontrol için ram havası kullanılan hava soğutmalı sistem kullanılmıştır. Bu sistem, çalışmak için herhangi bir elektrik gücü almaz, gereken enerji uçağın uçuşu esnasında ram girişinden alınan ram havasının tahrik etmesi ile sistem çalışır. Ram havası ile çalışan sistem; ram havası girişi, türbin, kompresör, pompa ve ısı değiştiricisinden oluşmaktadır. Yapılan ısı kontrol ile farklı uçak hızları ve yüksekliklerinde, soğuk ve sıcak günlerde poda giren ve çıkan havanın sıcaklık değerleri, podun içerisindeki elektronik ekipmanların sıcaklık değerleri incelenmiş ve kullanılan hava çevrimi ile çalışan sistemin, incelenen şartlar altında elektronik ekipmanları soğutarak uygun çalışmalarını sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektronik pod, Soğutma, Isıl kontrol

Abstract

There are some electronic devices for use in aircraft within the electronic pod. Electronic equipments in the pod must be between the given temperature values. This equipments emits heat. If the radiated heat is not taken with a cooling system, it prevents the electronic equipment to work. For this reason, heat dissipating equipment must be cooled. As a result of the cooling process, it is ensured that the electronic pod works under the desired conditions.

In this study, an air cycle-operated cooling system is designed for the cooling of the electronic pod, which is used in airplanes and which supplies 5000 W of heat inside the equipment. Air cooled system is used for thermal control. The system does not receive any electrical power from the aircraft, but instead operates the system by driving the ram air received from the ram input during the flight of the required

*Corresponding author: Address: Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering Sakarya University of Applied Sciences, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: mkesercioğlu@sakarya.edu.tr, Phone: +902646160291

energy aircraft. The system which driven by ram air is contains ram air inlet, turbine, compressor, heat exchanger and pump.

The temperature values of the electronic equipment, air inlet and outlet of the pod were examined at different elevations and aircraft speeds for the hot and cold days. It is determined that the air-cooled systems can be used.

1. Giriş

Elektronik pod, uçaklarda farklı görevler için kullanılacak farklı ekipmanlar bulunduran kutudur. Podlar uçakların genelde altına uçağın uygun başka bir yerine monte edilirler. İçlerinde bulunan ekipmanlar genellikle keşif, arazi gözetleme, hedefleme, kızılötesi görüş, navigasyon ekipmanları olarak sıralanır.

Elektronik podun içerisinde bulunan elektronik ekipmanlar çalışırken belli miktarda ısı üretirler. Aynı zamanda bahsedilen ekipmanların, üreticiler tarafından belirlenen çalışma ve depolama sıcaklıkları vardır. Ekipmanlardan yayılan ısı podun içerisindeki ısıyı artırır. Bu ısının bir sistem yardımıyla poddan atılması gerekmektedir. Atılmadığı takdirde ekipmanlar çalışamaz ve görevini yerine getiremezler. Bunun yanında elektronik ekipmanların, belirlenen sıcaklık aralığının altındaki soğuk havalarda da ekipmanlar çalışmamaktadır. Dolayısıyla elektronik ekipmanların belirtilen sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak amacıyla optimum ısı kontrolün yapılması gerekmektedir. Bahsedilen ısı kontrol günümüzde; direk ram havası kullanılan hava çevrimli soğutma sistemi ile, buhar çevrimli soğutma ile veya bu ikisinin birlikte bulunduğu hibrit bir sistem ile gerçekleştirilmektedir. [1]

Price ve arkadaşları (2003) bir uçağın podunun içine monte edilmiş elektronik ekipmanın ısı kontrolünü zorlu bir mücadele olarak betimlemişlerdir. Bunun yanında podun kullanılacağı göreve, ekipmanların özelliklerine, ortam ve uçuş şartlarına bağlı olarak doğru ısı kontrol yönteminin seçilmesinin hayati öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. [3]

Elektronik ekipmanların güçlerinin gün geçtikçe artmasıyla birlikte, geleneksel pasif ısı kontrol tekniklerinin eski hale geldiğini ve yeni soğutma tekniklerinin zorunlu hale geldiğini belirten Zhihui Wu ve arkadaşları (2011) farklı yeni teknikler arasında, buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminin en ideal sistem olduğunu ortaya koymuştur. Yaptıkları çalışma sonucunda, elektronik ekipmanları soğutmak için minyatür bir buhar sıkıştırımlı soğutma sistemi ortaya konmuştur. [4]

Leitner ve arkadaşlarının 2012 yılında ortaya koyduğu çalışmada, bir hava döngülü soğutma sistemi tasarlanarak üzerinde deneyler yapılmıştır. Makine F-16'da kullanılan bir elektronik podun

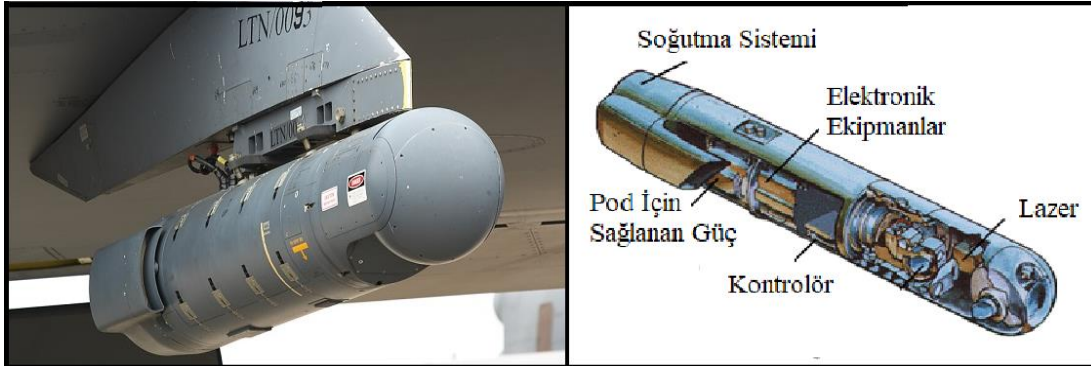
soğutulması amacıyla tasarlanmıştır. Aynı zamanda hava döngülü soğutma sistemi ile buhar çevrimi sistem karşılaştırılarak hava çevrimli sistemin avantajları anlatılmış ve sonuç olarak seçilen sistemin istenilen soğutma performansını sağladığı ortaya konmuştur. [5]

Bu çalışmada, 5000 W ısı yayan elektronik ekipmanların ısı kontrolünün yapılması için hava çevrimli bir ısı kontrol sistemi tasarlanacaktır ve pod giren ve çıkan havanın sıcaklık değerleri ile elektronik ekipmanların sıcaklık değerleri hesaplanacaktır. Bunun sonucunda sistemin uygunluğu ve ekipmanların soğutulmasının bu mümkün olup olmadığı ortaya konulacaktır.

2. Elektronik Pod Sistemi

Uçakların fonksiyonelliğini arttıran ve farklı donanımlarla donatan podlar için bazı sınırlamalar vardır. Bu sınırlamalar boyut, ağırlık, elektrik tüketimi limiti, uygun çalışma sıcaklık aralığı şeklinde sıralanabilir [6]. Dolayısıyla uçakta kullanılmak üzere üretilen podun tasarımı bu sınırlamalar göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Bir elektronik pod Şekil 1’de gösterildiği gibi tasarlanarak uçağa eklenmektedir ve genel itibariyle yine Şekil 1’de belirtilen ekipmanlardan oluşmaktadır. Çeşitli ekipmanlarla donatılan podlar ile birlikte uçakların kullanım ömrü ve kabiliyetleri arttırılmaktadır.



Şekil 1. Elektronik pod

Podun bahsedilen avantajlarının yanında bir de dezavantajı bulunmaktadır. Podun içerisinde bulunan elektronik ekipmanların, üreticilerin tanımladığı uygun çalışma ve depolama sıcaklık aralıklarında olması sağlanmalıdır. Eğer sıcaklık değerleri belirtilen aralıkların dışına çıktığı takdirde ekipmanlar zarar görerek çalışamaz hale gelir ve yeterli performansı sağlayamaz. Bununla birlikte her elektronik ekipman gibi podda bulunan ekipmanlar da çalıştıkları sırada belli miktar ısı üretir ve ürettikleri bu ısı sonucunda sıcaklıkları artar. Sonuç olarak ekipmanların istenilen sıcaklık aralığında tutmak amacıyla ısının bir ısı kontrol sistemiyle dışarı atılması gerekmektedir.

2.1. Podlarda Kullanılan Isıl Kontrol Sistemleri

Podun ısı kontrolü için kullanılacak sistemin seçimi, pod içindeki ekipmanların durumu ve çevre

şartları göz önünde bulundurularak yapılır. Direk ram havası kullanılan hava çevrim makinesi çalışmaya başlamak için dış güç istemeden ram havasının system tarafından yakalanmasıyla çalışan bir sistemdir. Sisteme giren ram havasının sıcaklığı, uçağın hızının karesiyle artar ve bunun sonucunda da basınç artar. Dolayısıyla sistemin verimli çalışması için uçak hızının yüksek olması gerekmektedir. Bu sebeple uçağın hızının Mach altı olduğu durumlarda sistemin tam anlamıyla çalışması ve performans sağlaması olanaksızdır. Ayrıca uçağın belli bir yükseklikte uçmayıp deniz seviyesinde olarak sistemin çalıştığı durumlarda sistemin çalışması için gereken ram havası olmayacak ve sistem çalışmayacaktır. Böyle durumlarda soğutma amacıyla uygun bir fan kullanımı mümkündür.

Podun ısı kontrolü için direk ram havası kullanılan sistemin dışında ikinci bir yol buhar çevrimli sistemdir. Sistemin ideal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimine göre çalışmaktadır. Uçağın düşük Mach hızlarında verimli çalışan ve yüksek soğutma performansı vermektedir. Bu sistemin başlangıcı için büyük bir güç gerekmektedir ve bu ciddi bir dezavantajdır. Diğer bir olumsuz tarafı ise; sistemdeki soğutucu akışkanın kullanım sınırlamasıdır. Buhar çevrimli sistemde kullanılan soğutucu akışkan olan kloroflorokarbonun, ozon delinmesinde payı büyük olduğu için 2006 yılı içerisinde kullanımı sınırlı hale getirilmiş, 2008 yılında ise kullanımı yasaklanmıştır. Kloroflorokarbon dışında farklı akışkanlar sistemde kullanılabilir olsa da sistem verimini %20 oranına kadar düşürmektedir. Buhar çevrimli sistemin bakımı oldukça zor ve hava çevrimli sisteme göre maliyeti daha yüksektir. Aynı zamanda sistemin elektrik tüketiminin yüksek olması sonucunda soğutma performansı elektrik gücü ile doğrudan bağlantılı ve sınırlıdır.

Üçüncü yol hibrit sistem ise, diğer iki sistemin (Hava çevrimi ve buhar çevrimi) birleşiminden oluşan sistemdir. Hava çevrimli ve buhar çevrimli sistemlerin bir uçağın tüm uçuş zarflarında tek başlarına yetmediği şartlarda ya da yeterli soğutmanın sağlanamadığı durumlarda kullanılmaktadır. Burada uçak eğer düşük Mach hızlarında uçuyor ve hava çevrimi ile soğutma yeterli oranda sağlanamıyorsa buhar çevrimli sistem devreye girerek soğutmayı gerçekleştirmektedir. Sistemin uçuş zarfına göre ve etkili kullanılması en belirgin avantajdır. Bunun yanında bakımı zor ve maliyeti diğer iki sisteme göre oldukça yüksektir. [7]

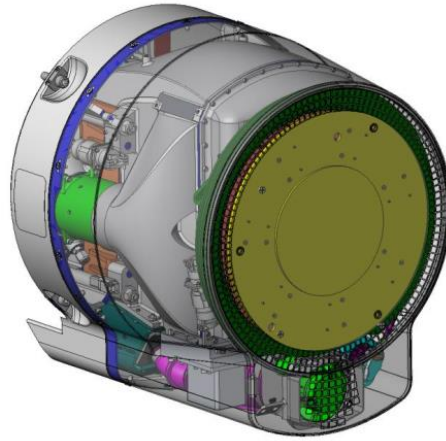
2.2. Hava Çevrimli Sistem

Soğutucu olarak uçak tarafından ram girişi ile yakalanan ram havası kullanılan hava çevrimli sistem, 1900'lerin ortalarından itibaren uçakların veya podların ısı kontrolü için kullanılmaktadır. Sistemi çalıştırmak için dışardan herhangi bir güç verilmesine ihtiyaç bulunmaz, ram girişi atmosferden yakalanan hava tarafından sistem çalıştırılır. Sistem; ram havası girişi, radyal türbin, radyal kompresör, soğutucu akışkan pompası ve ısı değiştiricisinden oluşmaktadır. Diğer sistemlerle kıyaslandığında, soğutucu olarak hava kullanılması sebebiyle daha az maliyetli ve bakımı kolaydır. Hava çevrimli sistemin COP değeri 10'dan daha büyük olmasına karşın, buhar çevrimli sistemin COP değeri 1 civarındadır [5]. Bunların yanında çevreye olan zararsızlığı da diğer sistemlerle kıyaslandığında önemli bir artıstır.

Sistemin çalışma prensibine bakıldığında; uçak belli bir irtifada ve Mach'ta uçarken podun yanına yerleştirilen ram havası girişi vasıtasıyla sisteme atmosferden hava alınır. Ram girişi lüle şeklinde yapılarak iş elde etmek için havanın basıncı ve sıcaklığı artırılır. Ram girişinden sonra hava,

türbine gönderilerek atmosfere göre yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta olması sebebiyle türbinin çalışması sağlanır. Aynı zamanda türbinin çalışması sonucunda bir mil ile türbine doğrudan bağlı olan kompresör de çalışır. Türbinden çıkan ve sıcaklığıyla basıncı düşen hava soğutmak amacıyla ısı değiştiricisine alınır. Sistemdeki ısı değiştiricisi, ekipmanlardan gelen sıcak soğutucu akışkanın, türbinden gelen soğuk ram havası ile soğutulması şeklinde çalışmaktadır. Elektronik ekipmanlar alüminyum plakaya bağlı olup plakanın içerisine boruyla giren soğutucu akışkan ile soğutma sağlanır. Isı değiştiricisinde hava, soğutucu akışkanın ısını alarak, türbinde iş üretilmesi sonucunda kompresöre alınır, sıcaklık ve basınç değerleri burada artarak uçuş yönünün tersinde bulunan çıkıştan atmosfere gönderilir. Bunun yanında, ısı değiştiricisinde havaya ısını vererek soğuyan soğutucu akışkan ekipmanları soğutmak için bir pompa ile ekipmanlara tekrar iletilir. Ram havası sıcaklığının 10 °C'nin altında olduğu durumlarda bir valf ile bypass yapılarak hava doğrudan ısı değiştiricisine gönderilir ve ısı değiştiricisinden sonra da kompresöre girmeden sistemden atılır. Bu sistem yoluyla istenilen durumlar altında ekipmanların ısı kontrolü gerçekleşir [8]. Sistemin büyük olması bir dezavantaj olması sebebiyle ısı değiştiricisi türbin ve kompresörün bağlı olduğu milin çevresine dairesel şekilde yerleştirilmektedir. Elektronik ekipmanlardan ısıyı etkin bir şekilde alabilmek için seçilen soğutucu akışkan önemlidir. Burada ısı çekmeyi etkileyen parametreler; akışkanın kaynama, donma noktaları ve, ısı geçirgenliği, yoğunluğu ve viskozitesidir [9]. R-236, R-123, R-134 gibi akışkanlar ekipmanların soğutulması amacıyla kullanılmaktadır. [5]

Şekil 2’de elektronik podların içerisinde kullanılan hava çevrimli soğutma sistemi görünmektedir.



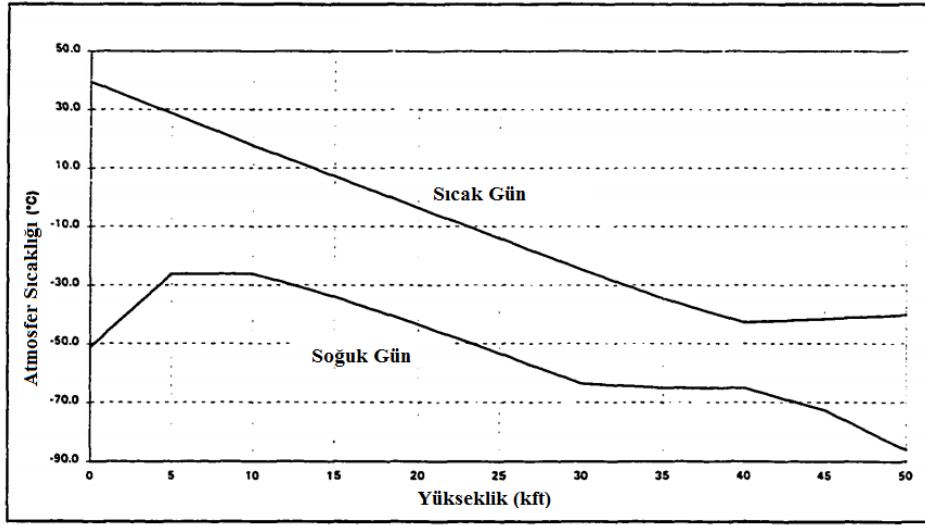
Şekil 2. Hava çevrimli soğutma sistemi [5]

2.3. Hesaplamalar

Bu çalışmada içerisindeki ekipmanların 5 kW ısı yaydığı elektronik podun ısı kontrolü yapılmıştır. Poddaki elektronik ekipmanların bulunması istenen sıcaklık aralığı -10 ile +85°C olarak verilmiştir. Ekipmanları bu değerler arasında tutabilmek amacıyla ısı kontrol yapılmıştır. Podun kalınlığı 75 santimetre, uzunluğu 3m ve yüksekliği 55 santimetredir. Ram havası girişindeki çap 4 santimetredir. Sistemde kullanılacak soğutucu akışkan hexafloropropan (R-236fa) olarak belirlenmiştir. Akışkanın özgül ısı oranı 1.08, doyma basıncı 25°C’de 2.72 bar, 50°C’de 5.84 bardır. Yoğunluğu 1268 kg/m³, ısı iletim katsayısı 0,0655 W/m°C, dinamik viskozitesi 2,087*10⁻⁴

kg/m.s ve Prandtl sayısı 4,1518 olarak alınmıştır. [10] Akışkan 0,025 metre çapındaki boruda 0.7 m/s hız ile dolaşarak alüminyum plaka içinde 2 metre uzunluğundaki bölümde akarak soğutmayı gerçekleştirmektedir. Alüminyum plaka uzunluğu 40 santimetre, kalınlığı 1,5 santimetre ve genişliği 30 santimetredir. Ekipman plakası alüminyum plaka ile aynı boyuttadır.

Isıl tasarım ve kontrolde, sistemdeki prosesin matematiksel modelini kolaylaştırmak için bazı fiziki kabuller yapılmıştır. Hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi yüksek ile değişimine oranla çok az olduğu için, hava yoğunluğu sadece yüksekliğe bağlı fonksiyon olarak kullanılmıştır. Havanın basıncındaki değişim ABD Standart Atmosfer Özelliklerine göre alınmıştır. Hava yoğunluğu 300 metre yükseklikte $1,225 \text{ kg/m}^3$ ve yüksekliğe göre değişimi ABD standartlarına göre alınmıştır [11]. Podun, hava sürtünmesinden kaynaklanana aerodinamik ısınması, mekanik sürtünmelerden kaynaklanan ısı ve verim kayıpları ve boru kayıpları ihmal edildi. Soğutucu akışkanın sitem içerisindeki kütleli debisi sürekli daima eşittir. Havanın kütle debisi hız ve yüksekliğe bağlı olarak değişmekte olup belli yükseklik ve hızda sistem içerisinde değişmemektedir. Soğutucu akışkanın ısı değiştiricisine giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla $47 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $40\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Alüminyum plakanın ısı iletim katsayısı $167 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ve ekipmanların ısı iletim katsayısı $386 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ' dir. Elektronik podun çevresi adyabatiktir [12]. Yükseklik ile değişen ortam sıcaklıkları Şekil 3'te gösterilen askeri standartlara göre seçilmiştir [13].



Şekil 3. Sıcak ve soğuk günler için yüksekliğe bağlı atmosfer sıcaklığı

Ram havası girişinden sisteme giren havanın kütle debisi Denklem 2.1 ile hesaplanır.

$$m_{hava} = \rho_{hava} \cdot A_{kesit} \cdot V_{uçak} \quad (2.1)$$

Uçağın hızı Denklem 2.2 ile hesaplanır. C ses hızı, M_∞ Mach sayısıdır.

$$V_{uçak} = M_\infty \cdot C \quad (2.2)$$

Lüle şeklindeki ram girişinden sisteme dahil olan havanın sıcaklığı Denklem 2.3 ile sıcaklığı artırılır, izantropik sıkıştırma ile de Denklem 2.4'teki şekilde basıncı artırılır. Denklem 2.5 ile özgül ısılar oranı k hesaplanır. T_∞ atmosfer havası sıcaklığı, T_1 ram çıkışındaki hava sıcaklığı, P_∞ atmosfer basıncı, P_1 ram çıkışındaki hava basıncıdır.

$$T_1 = T_\infty \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_\infty^2\right) \quad (2.3)$$

$$P_1 = P_\infty \left(\frac{T_1}{T_\infty}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.4)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.5)$$

Hava ram girişinden sonra T_1 sıcaklığında ve P_1 basıncında türbine girer ve izantropik genişleme ile basıncı azaltılır. Türbin çıkış sıcaklığı ve basıncı sırasıyla Denklem 2.6 ve Denklem 2.7 ile hesaplanır. P_r sıkıştırma oranı, T_2 türbin çıkışındaki hava sıcaklığı, P_2 türbin çıkışındaki hava basıncıdır.

$$T_2 = \frac{T_1}{\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (2.6)$$

$$P_2 = P_{r,türbin} \cdot P_1 \quad (2.7)$$

Türbinden çıkan hava T_2 sıcaklığında ve P_2 basıncında ısı değiştiricisine girer ve havaya ekipmanlardan gelen soğutucu akışkandan sabit basınçta ısı geçişi olur (Denklem 2.8). Isı geçişi sonucunda havanın sıcaklığı Denklem 2.9 ile hesaplanır. \dot{Q} elektronik ekipmanlardan gelen ısı miktarı, C_p sabit basınç altında havanın özgül ısısı, T_3 ısı değiştiricisinden çıkan hava sıcaklığı, P_3 ısı değiştiricisinden çıkan hava basıncıdır.

$$P_3 = P_2 \quad (2.8)$$

$$T_3 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot C_p} + T_2 \quad (2.9)$$

Isı değiştiricisinde havanın sıcaklığı artarak sıkıştırma oranı türbin ile aynı olan adyabatik kompresöre girer ve izantropik sıkıştırma ile basıncı artar. Kompresörden sonra hava uçak gidiş yönüne ters bir çıkıştan atmosfere gönderilir. Kompresörün çıkışındaki hava basıncı Denklem 2.10 ile, kompresör çıkışındaki havanın sıcaklığı Denklem 2.11 ile hesaplanır. P_3 girişindeki hava basıncı, P_4 kompresör çıkışındaki hava basıncı, T_3 kompresör girişindeki hava sıcaklığı, T_4 kompresör çıkışındaki hava sıcaklığıdır.

$$P_4 = P_{r,kompresör} \cdot P_3 \quad (2.10)$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.11)$$

Elektronik ekipmanları soğutan akışkanın dolaştığı ikinci çevrimde, soğutucu akışkan ekipmanlardan ısıyı alır ve sıcaklığı yükselir, daha sonra ısı değiştiricisine girer. Isı değiştiricisine gelen hava ile soğutucu akışkandan ısı çekilerek sıcaklığı düşürülür. Soğutucu akışkanın ekipmanlara giriş ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkı Denklem 2.12 ile hesaplanır. $T_{1,R}$ soğutucu akışkanın ekipmanlara giriş sıcaklığı, $T_{2,R}$ soğutucu akışkanın ekipmanlardan çıkış sıcaklığı, $Q_{ekipman}$ soğutucu akışkanın ekipmanlardan çektiği ısı, $C_{p,R}$ soğutucu akışkanın sabit basınçta özgül ısısı, \dot{m}_R soğutucu akışkanın kütle debisidir.

$$(T_{1,R} - T_{2,R}) = \frac{Q_{ekipman}}{\dot{m}_R C_{p,R}} \quad (2.12)$$

V soğutucu akışkanın hızı, D aktığı borunun çapı, ρ_R yoğunluğu, μ dinamik viskozitesi olmak üzere soğutucu akışkanın Reynolds sayısı Denklem 2.13 ile hesaplanır.

$$Re = \frac{\rho_R \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (2.13)$$

Re Reynolds sayısı, Pr Prandtl sayısı olmak üzere soğutucu akışkanın Nusselt sayısı Denklem 2.14 ile hesaplanır.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (2.14)$$

Nu Nusselt sayısı, D akışkanın aktığı boru çapı ve k ısı iletim katsayısı olarak ısı taşınım katsayısı h Denklem 2.15 ile hesaplanır.

$$h = Nu \cdot \frac{k}{D} \quad (2.15)$$

Denklem 2.16 ile toplam ısı direnç katsayısı hesaplanır. $A_{alüminyum}$ alüminyum plakanın ısı transfer alanı, $A_{ekipman}$ ekipmanın ısı transfer alanı, $k_{alüminyum}$ alüminyum plakanın ısı iletim katsayısı, $k_{ekipman}$ ekipmanın ısı iletim katsayısı, L_1 alüminyum plakanın kalınlığı, L_2 ekipmanın kalınlığı, A_{boru} soğutucu akışkanın aktığı borunun çapıdır.

$$R_{toplam} = \frac{1}{h \cdot A_{boru}} + \frac{L_1}{k_{alüminyum} \cdot A_{alüminyum}} + \frac{L_2}{k_{ekipman} \cdot A_{ekipman}} \quad (2.16)$$

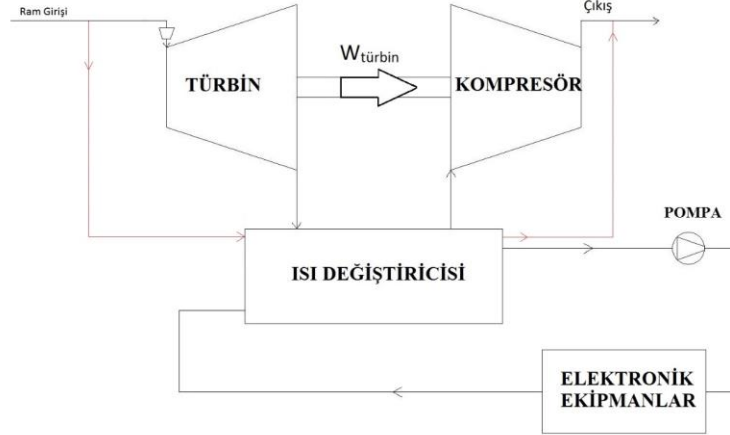
Ekipmanların ortalama sıcaklığı Denklem 2.17 ile, ekipmanlar ile soğutucu akışkan arasındaki sıcaklık farkı Denklem 2.18 ile, ekipmanların sıcaklığı da Denklem 2.19 ile hesaplanır.

$$T_R = \frac{T_{1,R} + T_{2,R}}{2} \quad (2.17)$$

$$\Delta T = \dot{Q} \cdot R_{toplam} \quad (2.18)$$

$$T_{ekipman} = T_R + \Delta T \quad (2.19)$$

Isıl kontrolde kullanılan hava çevrimli soğutma sisteminin şeması Şekil 4'te gösterilmektedir. Havanın 10 °C altında olduğu durumlarda yapılan bypass işlemi şekilde kırmızı oklar ile gösterildiği gibi yapılmaktadır.



Şekil 4. Hava çevrimli soğutma sisteminin şematik gösterimi

2.3.1 Isıl Kontrol Sonuçları

0,4, 0,9 ve 1,2 Mach hızlarında ve 100 m (300ft), 457 m , 914 m , 1524 m , 2133 m, 2743 m, 3962 m, 6096 m, 12192 m yüksekliklerde (sırasıyla 300 ft, 1500 ft, 3000 ft, 5000 ft, 7000 ft, 9000ft, 13000 ft, 20000 ft, 40000 ft), sıcak ve soğuk günlerde sıcaklıklar alınarak Matlab Simulink kullanılarak ram havası ile soğutma sistemi için ısıl kontrol yapılmıştır. Tablo 1'de sıcak gün için, Tablo 2'de soğuk gün için sıcaklık değerleri verilmiştir. Bunun yanında ısıl kontrol sonucunda kritik durum için ekipman sıcaklığı 83,91 °C olarak görülmüş ve yapılan ısıl tasarım ve kontrolün uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Sıcak günde çevrimdeki havanın sıcaklığı

Feet		Santigrat Derece				kg/s	kW	
Yükseklik	Mach	Atmosfer	Ram Çıkışı	Türbin Çıkışı	Eşanjör Çıkışı	Kompresör Çıkışı	Debi	Türbin İşi
300	0,4	39,43	48	-25,1	0,8	82,9	0,2117	15,77
	0,6	39,43	61,2	-15,7	1,7	84,2	0,3176	24,57
	0,9	39,43	89,4	6,1	17,5	104,5	0,4767	39,95
	1,2	39,43	128,6	36,2	44	140,14	0,6354	59,07

Tablo 1. Sıcak gün için çevrimdeki havanın sıcaklığı (devamı)

Feet		Santigrat Derece					kg/s	kW
Yükseklik	Mach	Atmosfer	Ram Çıkışı	Türbin Çıkışı	Eşanjör Çıkışı	Kompresör Çıkışı	Debi	Türbin İşi
1500	0,4	36,1	46,07	-27,5	-0,52	80	0,205762	15,2
	0,6	36,1	58,45	-17,8	0	81,9	0,30864	24,3
	0,9	36,1	86,27746	3,7	15,51	102,1	0,462967	37
	1,2	36,1	125,2241	33,4	42,52	137,3	0,6172	56
3000	0,4	32,8	42,72594	-30	-2,5	78,3	0,202392	15,3
	0,6	32,8	54,96338	-20,4	-2,4	78,7	0,303445	23,2
	0,9	32,8	82,49764	0,71	12,7	98,4	0,455186	37,2
	1,2	32,8	121,0455	30,32	39,5	132,8	0,606945	55,7
5000	0,4	28,5	38,2513	-33,5	-3,1	77,6	0,182755	13,5
	0,6	28,5	50,3152	-24,2	-4	76,7	0,274148	21,7
	0,9	28,5	77,4595	-3,5	10,4	94,8	0,411222	33,5
	1,2	28,5	115,4606	26,2	36,2	128,5	0,548296	49,2
7000	0,4	24,265	33,77643	-36,7	-4,2	75,5	0,171183	12,5
	0,6	24,265	45,66703	-27,8	-6,1	73,7	0,256775	19,2
	0,9	24,265	72,42077	-7,2	7,1	91,2	0,385162	32
	1,2	24,265	109,879	21,6	32,2	123,5	0,513557	46
9000	0,4	19,927	29,3018	-40,4	-6,1	73,3	0,161568	12
	0,6	19,927	41,01882	-31,2	-8,4	70,6	0,24235	19
	0,9	19,927	67,38238	-11,3	4,3	87,3	0,363524	30
	1,2	19,927	104,2914	17,2	28,6	119,2	0,4843	43
13000	0,4	11,255	20,35217	-47,1	-7,5	71,5	0,14004	11
	0,6	11,255	31,72244	-38,5	-12,3	65,7	0,21007	16
	0,9	11,255	57,3054	-18,8	-1,4	80,2	0,315133	25
	1,2	11,255	93,12175	8,9	22	110,4	0,420178	37
20000	0,4	-3,2	ByPass		45,8	141,2	0,112997	-
	0,6	-3,2	ByPass		29,5	120,4	0,169497	-
	0,9	-3,2	ByPass		18,6	105	0,254246	-
	1,2	-3,2	ByPass		13,2	98,8	0,338997	-
40000	0,4	-42,1	ByPass		63,5	164,4	0,052343	-
	0,6	-42,1	ByPass		28,3	118,6	0,078523	-
	0,9	-42,1	ByPass		4,8	88,2	0,117785	-
	1,2	-42,1	ByPass		-6,7	72,6	0,157047	-

Tablo 2. Soğuk günde çevrimdeki havanın sıcaklığı

Feet		Santigrat Derece					kg/s	kW
Yükseklik	Mach	Atmosfer	Ram Çıkışı	Türbin Çıkışı	Eşanjör Çıkışı	Kompresör Çıkışı	Debi	Türbin İşi
300	0,4	-51,2	ByPass		-24,8	ByPass	0,2117	-
	0,6	-51,2	ByPass		-33,5	ByPass	0,3176	-
	0,9	-51,2	ByPass		-39,3	ByPass	0,4765	-
	1,2	-51,2	ByPass		-42,2	ByPass	0,635454	-
1500	0,4	-45,1	ByPass		2	ByPass	0,205766	-
	0,6	-45,1	ByPass		-27,3	ByPass	0,30864	-
	0,9	-45,1	ByPass		-33,3	ByPass	0,462974	-
	1,2	-45,1	ByPass		-36,2	ByPass	0,6171	-
3000	0,4	-39,4	ByPass		-11,8	ByPass	0,202308	-
	0,6	-39,4	ByPass		-20,8	ByPass	0,303462	-
	0,9	-39,4	ByPass		-26,9	ByPass	0,455193	-
	1,2	-39,4	ByPass		-29,7	ByPass	0,606925	-
5000	0,4	-28,3	ByPass		2,1	ByPass	0,182764	-
	0,6	-28,3	ByPass		-7,7	ByPass	0,274147	-
	0,9	-28,3	ByPass		-14,5	ByPass	0,411222	-
	1,2	-28,3	ByPass		-17,8	ByPass	0,548296	-
7000	0,4	-28,3	ByPass		4,4	ByPass	0,171182	-
	0,6	-28,3	ByPass		-6,6	ByPass	0,256775	-
	0,9	-28,3	ByPass		-13,5	ByPass	0,385163	-
	1,2	-28,3	ByPass		-17,1	ByPass	0,513551	-
9000	0,4	-28,3	ByPass		6,3	ByPass	0,161565	-
	0,6	-28,3	ByPass		-5,2	ByPass	0,24233	-
	0,9	-28,3	ByPass		-12,7	ByPass	0,363524	-
	1,2	-28,3	ByPass		-16,5	ByPass	0,4848	-
13000	0,4	-31	ByPass		9,4	ByPass	0,14005	-
	0,6	-31	ByPass		-3,6	ByPass	0,21008	-
	0,9	-31	ByPass		-12,4	ByPass	0,315133	-
	1,2	-31	ByPass		-16,7	ByPass	0,420178	-
20000	0,4	-43	ByPass		4,8	ByPass	0,112998	-
	0,6	-43	ByPass		-11,3	ByPass	0,169497	-
	0,9	-43	ByPass		-22,2	ByPass	0,254246	-
	1,2	-43	ByPass		-27,6	ByPass	0,338997	-

Tablo 2. Soğuk günde çevrimdeki havanın sıcaklığı (devamı)

Feet	Santigrat Derece					kg/s	kW
------	------------------	--	--	--	--	------	----

Yükseklik	Mach	Atmosfer	Ram Çıkışı	Türbin Çıkışı	Eşanjör Çıkışı	Kompresör Çıkışı	Debi	Türbin İşi
40000	0,4	-64	ByPass		40,5	ByPass	0,052348	-
	0,6	-64	ByPass		5,3	ByPass	0,078523	-
	0,9	-64	ByPass		-18,2	ByPass	0,117785	-
	1,2	-64	ByPass		-29,7	ByPass	0,157047	-

Tablo 3. Soğutucu akışkan R-236fa'nın sistemdeki değerleri

	Eşanjöre Giriş Sıcaklığı (°C)	Eşanjörden Çıkış Sıcaklığı (°C)	Kütle Debisi(kg/s)	Yayılan Isı (kW)
R-236fa	41,4	48	0,435	5

Yapılan ısıl kontrolde atmsfer şartları ve uçak hızının, sistem üzerinde hayati öneme arz ettiği görülmüştür. Kontrol sonucunda, soğuk gün için uçak hızı arttıkça sistemin giriş ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkının, uçak düşük Machlarda iken azaldığı fakat mach sayısı arttıkça (Ses hızına yaklaştıkça) arttığı, bunun yanı sıra türbin işinin Mach'a bağlı olmadan hız arttıkça sürekli arttığı görülmüştür. Sıcak güne bakıldığında ise, hem türbin işinin hem de sıcaklık farkının mach sayısından bağımsız olarak arttığı görülmüştür. İkinci sonuç ise, sisteme giren ve çıkan havanın sıcaklık farkının yüksekliğe ilişkisidir. Uçağın irtifası arttıkça sıcak ve soğuk günde sıcaklık farkının arttığı görülmüştür. Hava yoğunluğunun yükseklikle beraber çok düşmesi ve bunun sonucunda sisteme giren havanın debisinin düşmesi, türbin işinin yükseklik arttıkça düşmesine sebep olmuştur.

3. Sonuçlar

Bu çalışma sonucunda uçakta kullanılan, 5 kW ısı üretimi olan ve içerisinde bir faydalı yük bulunduran elektronik podun ısıl kontrolü yapılmıştır. Kontrol için mümkün olan üç metot düşünüldüğü zaman, daha basit olan, bakımı kolay ve maliyeti daha düşük olan hava çevrimli soğutma sistemi seçilmiştir. Havacılık standartları göz önüne alınarak belirlenen soğuk ve sıcak günlerde, önerilen sistemdeki sıcaklık değerleri Matlab Simulink ile belirlenmiştir. Soğuk günde yükseklik çok fazla olduğunda hava sıcaklığı da çok düşük olacağı için elektronik ekipmanların çalışmama riskinin ortaya çıktığı düşünüldüğünde bir ısıtıcı yoluyla bunun önleneceği öngörülmektedir. Uçak deniz seviyesinde çalışırken herhangi bir hava girişi olmayacağı için sisteme gereken havanın fan yardımı ile alacağı da öngörülmüştür. Uçak ses hızına yakın ya da ses hızından yüksek hızda uçtuğunda sistemin daha verimli çalıştığı tespit edilmiştir. Uçağın uçuş yüksekliği arttıkça da sıcaklığın ciddi manada düştüğü tespit edilmiş ve türbin-kompresör sisteminin çalışmasına gerek duyulmamış, hava ısı değiştiricisine doğrudan girerek soğutma sağlanmıştır.

Isıl kontrol neticesinde ekipmanların sıcaklıklarının, istenilen aralıkta olduğu, sistemin belirlenen yükseklik ve hızlarda düzgün ve verimli çalıştığı tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] T. J. Kazan, Design, Analysis And Test Of An Air Cycle Environmental Control System For An Airborne Electronics Equipment Pod, Department of Mechanical Engineering California State University, Master Science Thesis, 1996.
- [2] S. Akçay, N. Sozbir, A. Aydemir, E.A. Başeşme, “Askeri hava araçlarındaki harici yüklerde kullanılan çevresel kontrol sistemlerinin incelenmesi,” pp. 1–7, 2016.4
- [3] D. C. Price, “Thermal Management of Military Fighter Aircraft Electro-optics Pod,” pp. 6–8, 2003.
- [4] Z. Wu and R. Du, “Design and experimental study of a miniature vapor compression refrigeration system for electronics cooling,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 2–3, pp. 385–390, 2011.
- [5] Z. Shavit and Y. Nishri, “On the Development of Air Cycle Machine for Cooling Airborne Pods,” 2012.
- [6] R. P. Scaringe, “A compact thermal control system for aircraft avionics pod cooling,” pp. 1492–1496.
- [7] R. Agrawal, S. Mada, "Hybrid Environmental Control System for Military Aircraft", Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineering, vol.13, 2013
- [8] I. de Boer, “The Cooling of a Pod-mounted Avionic System,” 1976.
- [9] M. Engelhardt, S. Principal, E. İi, and M. Engineering, “Thermal Control of an Airborne Electronics Bay,” vol. i, no. January, pp. 1–16, 2007.
- [10] R-236fa Specifications, Climalife, 2016
- [11] U.S. Standard Atmosphere Air Properties, 1976.
- [12] Y. Çengel, Isı ve Kütle Transferi, Üçüncü Basım, Güven Bilimsel,2012.
- [13] Environmental Extremes for the Design of Airborne Equipment, MIL-STD-210A, 1957