

Makine Mühendisliği: Teori, Metodoloji ve Uygulama

**Editör
Prof. Dr. Aydın Rüşen**

Makine Mühendisliği:
Teori, Metodoloji ve Uygulama

Editör
Prof. Dr. Aydın RÜŞEN

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Aydın Rüßen

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Ekim, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-7078-10-8

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1..... 5

**Sonlu Eleman Analizlerinde Farklı Yazılım Sonuçlarının Nedenleri ve Analizi:
Uzman Bir Kılavuz**

Mehmet Çalışkan

BÖLÜM 2..... 23

**Covid Döneminde Uçaklarda İç Hava Kalitesinin Mühendislik Yaklaşımıyla
Değerlendirilmesi**

Ahmet Çoşgun & Leyla Akbulut



BÖLÜM 1

Sonlu Eleman Analizlerinde Farklı Yazılım Sonuçlarının Nedenleri ve Analizi: Uzman Bir Kılavuz

Mehmet Çalışkan¹

Giriş: Sonlu Eleman Analizinin Görünmeyen Değişkenleri

Bir Sonlu Eleman Analizi (FEA) modelinin farklı yazılım paketlerinde, görünürde aynı koşullar altında analiz edilmesi durumunda çok farklı sonuçlar üretmesi, bu alanda çalışan mühendis ve araştırmacılar için sık karşılaşılan ve kafa karıştırıcı bir sorundur. Bu durum, genellikle kullanıcı tarafından tüm girdilerin (geometri, malzeme, yükler, sınır koşulları) aynı olduğu varsayımından kaynaklanır. Ancak, bu çalışma, bu tutarsızlığın altında yatan asıl nedenin, aynı fiziksel olayın matematiksel formülasyonu olan **Sonlu Eleman Yöntemi'nin (FEM)** farklı yazılımlar tarafından kendine özgü ve çoğu zaman detayları belirtilmeyen bir pratik uygulaması sayılabilecek **Sonlu Eleman Analizi (FEA)** olduğunun derinlemesine bir analizini sunmaktadır.¹

Analizler arasındaki farklılıklar, üç ana kategoriye ayrılabilir: temel modelleme varsayımları, sayısal ve hesaplama ayarları ve son işlem ile sonuç yorumlama aşamaları. Her bir yazılım, kullandığı eleman tiplerinden ve ağ oluşturma algoritmalarından, problemin çözümünde kullandığı dahili çözücülere ve hassasiyet toleranslarına kadar birçok kendine özgü varsayım ve varsayılan ayar barındırır. Bu ayarlar, kullanıcı tarafından açıkça belirtilmediğinde bile sonuçlar üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu rapordaki ana fikir, nihai hedefin iki programın tamamen aynı sonucu vermesi için zorlamak değil, her bir programın neden farklı davrandığını anlamak ve fiziksel gerçekliği en doğru şekilde yansıtan, **doğrulanmış ve geçerli kılınmış** bir çözüm elde etmek için sistematik bir yaklaşım benimsemektir.

Sonlu Eleman Yöntemi (FEM), mühendislik ve matematiksel modelleme alanlarında karşılaşılan diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözmek için kullanılan genel bir matematiksel çerçevedir.²

Sonlu Eleman Analizi (FEA) ise, bu yöntemin bir yazılım aracılığıyla pratik bir şekilde uygulanmasıdır.¹ Kullanıcının "aynı koşullar" olarak gördüğü durum, genellikle bu iki kavram arasındaki temel farkı göz ardı eder. Bir problemin FEM'e dayalı çözümü teorik olarak aynı olsa da, her bir yazılımın bu teoriyi

¹ Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID ID: 0000-0002-7835-9414

uygulaması, kendi özel mühendislik kararları, dahili algoritmaları ve varsayılan ayarlarıyla şekillenir.

Bu durum, tıpkı aynı tarife göre pasta yapan ancak farklı fırınlar, farklı un ve farklı mikserler kullanan iki fırıncının birbirinden farklı pastalar yapmasına benzetilebilir. Girdiler kâğıt üzerinde aynıdır, ancak süreç ve kullanılan araçlar benzersizdir. Örneğin, FreeFEM gibi bazı yazılımlar, kendi dahili ağ oluşturma algoritmalarını (BAMG) ve dış çözücü kütüphanelerini (mumps, PETSc) kullanırken ⁴, diğer yazılımlar farklı kombinasyonlar kullanır. Bu yazılıma özgü yaklaşımlar, analiz sonuçlarında ortaya çıkan tutarsızlıkların en temel sebebidir. Bu raporda, bu temel farklılıklar ayrıntılı olarak incelenerek, "aynı koşullar" yanılığının ardındaki gerçekler ortaya konacaktır.

Bölüm I: Temel Modelleme Varsayımlarından Kaynaklanan Tutarsızlıklar

Analiz sonuçlarındaki farklılıkların en derin kökleri, bir modelin dijital olarak nasıl oluşturulduğu ve fiziksel özelliklerinin nasıl tanımlandığına dair temel varsayımlarda yatmaktadır. Bu varsayımlar, her yazılımda farklı varsayılan değerlerle gelebilir ve kullanıcının farkında olmadığı bir dizi benzersiz seçime yol açabilir.

1.1. Diskretizasyon İkilemi: Ağ Yapısının Çözümü Tanımlayışı

Sonlu elemanlar yönteminde bir problemi çözmek için, büyük ve karmaşık bir sistem daha küçük, basit parçalara veya "sonlu elemanlara" ayrılır.³ Bu işleme ağ oluşturma (meshing) denir. Ağın kalitesi ve yapısı, nihai sonuçların doğruluğunu, yakınsamasını ve tutarlılığını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

1.1.1. Eleman Tipi ve Derecesi: Çözümün DNA'sı

Bir modelde kullanılan eleman tipi ve derecesi, sonuçlar üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Genellikle iki ana eleman türü kullanılır:

- **Doğrusal (Linear) Elemanlar:** Sadece köşelerinde düğümleri bulunan daha düşük dereceli elemanlardır. Kenarları düzdür.⁵ Bu elemanlar, bükülme gibi karmaşık deformasyonları iyi yakalayamazlar ve eleman içinde sabit bir gerilme durumu varsayarlar.⁶ Bu durum, özellikle bükülme problemleri için modeli aşırı sert hale getirir.
- **Karesel (Quadratic) Elemanlar:** Kenarların ortasında da düğümleri bulunur ve doğrusal olmayan bir şekil fonksiyonu kullanırlar.⁶ Bu ek düğümler sayesinde, karesel elemanlar kavisli kenarları, bükülme deformasyonlarını ve gerilme gradyanlarını daha doğru bir şekilde temsil edebilirler.⁶ Çoğu durumda, daha az sayıda karesel eleman

kullanarak doğrusal elemanlardan daha doğru sonuçlar elde etmek mümkündür, ancak bu elemanlar daha fazla hesaplama maliyeti gerektirir.⁶

Bir kullanıcının, bir yazılımda varsayılan olarak doğrusal dörtgen elemanlar, diğerinde ise karesel tetrahedral elemanlar kullanması, her iki durumda da "aynı ağ yoğunluğu" gibi görünse de, çözülen sayısal problem temelde farklıdır. Birincisi aşırı sert ve hatalı bir sonuç verirken, ikincisi daha gerçekçi bir çözüm sunabilir. Bu durum, eleman tipi seçiminin, yazılımlar arasında sonuçların neden farklı olduğunu açıklayan en önemli gizli değişkenlerden biri olduğunu göstermektedir.

1.1.2. Ağ Kalitesinin Kritik Rolü

Ağ kalitesi, sadece öznel bir değerlendirme değildir; Aspect Ratio, Skewness, Jacobian Oranı ve Warpage gibi belirli metriklerle nicel olarak belirlenebilir.⁸ Bu metrikler, ağın simülasyon için uygunluğunu belirler ve yakınsama, kararlılık ve doğrulukla doğrudan ilişkilidir.⁹ Her yazılım, geometrilere ağ döşemek için farklı algoritmalar (örneğin, advancing front veya Delaunay üçgenlemesi) kullanır¹² ve bu algoritmaların dahili toleransları farklıdır.¹⁰ Bu durum, aynı geometri üzerinde bile farklı kalitede ağların oluşmasına yol açabilir. (Tablo1)

Örneğin, bir yazılım tarafından otomatik olarak oluşturulan bir ağın, diğer bir yazılımda oluşturulan ağa göre yüksek Skewness veya Aspect Ratio değerleri içermesi, çözücü hatalarına veya sayısal hassasiyetsizliklere yol açabilir.⁸ Bu, birincil düzeyde gizli bir değişkendir; kullanıcı geometriyi sağlar, ancak yazılım kalitesi bilinmeyen bir ağ sunar.

Tablo 1. Ağ (Mesh) kalitesi metrikleri.

Metrik Adı	Tanımı	İdeal Değer	Fiziksel Sonuç
Aspect Ratio (En Boy Oranı)	Bir elemanın en uzun kenarının en kısa kenarına oranı. ⁹	1.0	Yüksek değerler (örneğin > 10) elemanın bozulduğunu ve gerilme gradyanlarını doğru yakalayamadığını gösterir. ⁹
Skewness (Çarpıklık)	Elemanın ideal şekilden (eşkenar üçgen veya kare) açısal sapması. ⁸	0.0	Yüksek değerler (>0.5) elemanın bozulduğunu ve sonuçların

			güvenilirliğini azalttığını gösterir. ¹¹
Jacobian Ratio (Jakoben Oranı)	Elemanın şeklinin ideal elemana göre bozulmasının ölçüsü. ⁸	1.0	0.6'dan düşük değerler elemanın kötü kalitede olduğunu gösterir ve hatalı gerilme sonuçlarına yol açabilir. ¹¹
Warping Factor (Bükülme Faktörü)	Dörtgen elemanların ne kadar "büküldüğünün" veya düzlemsel olmadığının ölçüsü. ⁸	0.0	Yüksek değerler, elemanın gerçek geometriyi doğru temsil etmediğini ve yerel hatalara neden olabileceğini gösterir. ⁸

1.2. Modelin Fiziği: Malzeme, Temas ve Sınır Koşulları

1.2.1. Malzeme Formülasyonu ve Gerçeklik

FEA'da malzeme modelinin seçimi hayati önem taşır. Doğrusal analiz, malzemenin Hooke yasasına (gerilme ile birim şekil değiştirme arasında doğrusal ilişki) uyduğunu ve elastik bölgede kaldığını varsayar.¹⁵ Ancak birçok gerçek dünya problemi, plastisite (kalıcı deformasyon) ve hiperelastisite (örneğin kauçuk) gibi doğrusal olmayan malzeme davranışları içerir.¹⁸

Farklı yazılımlar, doğrusal olmayan malzeme davranışlarını modellemek için farklı kütüphaneler ve yaklaşımlar sunar.¹⁸ Doğrusal bir analizde bile, yüksek bir yüke maruz kalan bir malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin doğrusal bölgesinin dışına çıkması, gerilme değerlerinin fiziksel olarak mantıksız seviyelere (akma dayanımının çok üzerine) çıkmasına neden olabilir.²¹ Bir program bu fiziksel gerçeği açıkça belirtirken, diğerinin farklı dahili hesaplama yöntemleri yanıltıcı bir şekilde daha düşük sonuçlar gösterebilir. Bu durum, sonuçlardaki farklılığın doğrudan, her bir yazılımın doğrusal bir modeli yüksek yüklere maruz kaldığında nasıl yorumladığından kaynaklandığını gösterir.

1.2.2. Temas Algoritmaları: Sürtünmeli ve Değişken Arayüz

Temas, doğrusallık dışı (nonlinear) davranışın en büyük kaynaklarından biridir. İki farklı programın aynı temas koşullarını "aynı" olarak yorumlaması pek

olası değildir. Temas kısıtlamalarını uygulamak için kullanılan iki ana algoritma vardır:

- **Kinematik Yöntem:** Penetrasyonun (bir cismin diğerinin içine girmesinin) olmasını engellemek için katı bir kural uygular.²³
- **Cezalandırma (Penalty) Yöntemi:** Çok hafif bir penetrasyona izin verir ve bu penetrasyonu telafi etmek için yay benzeri bir kuvvet (rijitlik) uygular.²³

Bazı yazılımlar (örneğin Abaqus), modeldeki tüm temas durumlarını otomatik olarak algılayıp yöneten güçlü "genel temas" algoritmaları sunar.²³ Diğerleri (örneğin Nastran) ise, kullanıcının temas çiftlerini (contact pairs) ve "master/slave" (usta/köle) yüzeylerini manuel olarak tanımlamasını gerektirebilir.²⁵ Bu algoritmik ve varsayılan ayarlar, sonuçlarda büyük farklılıklara yol açan önemli bir faktördür. Örneğin, master/slave atamasındaki bir hata bile farklı sonuçlara yol açabilir.²⁵

1.2.3. Sınır Koşulları ve Sayısal Kararsızlık

Kullanıcının "aynı koşullar" varsayımındaki en yaygın hata, sınır koşullarının (BCs) aşırı basitleştirilmesidir. Gerçek dünyadaki destekler asla tamamen sabit veya sürtünmesiz değildir.²⁷ Bir program, bir kısıtlamayı üç serbestlik derecesine (x, y, z öteleme) uygularken, diğeri ek bir dönme serbestlik derecesini (örneğin z dönmesi) kısıtlayabilir.

Bu küçük farklılık, bir sistemin bir programda "kinematik olarak belirsiz" (sınırsız serbest hareket) olmasına ve çözüm üretememesine neden olabilirken¹⁷, diğer program hatalı veya anlamsız bir sonuç üretebilir. Sınır koşullarının yazılımlar arasındaki yorumlanma farklılıkları, kullanıcı kaynaklı hataların en yaygın ve en önemli nedenlerinden biridir.¹⁷

Bölüm II: Hesaplamaya Dayalı Ayarlardan Kaynaklanan Tutarsızlıklar

Bir FEA modelinin "altın standart"ı, aynı geometri, ağ ve fiziksel tanımlamaların farklı yazılımlarda aynı sonucu vermesidir. Ancak, bu raporun ilk bölümü, bu varsayımların bile nadiren aynı olduğunu göstermektedir. Bu bölüm, sonuçların neden farklı olduğunu açıklayan, genellikle kullanıcının farkında olmadığı daha derin ve sayısal faktörleri ele almaktadır.

2.1. Perde Arkası: Çözücü Algoritmaları ve Etkileri

FEA yazılımları, denklemlerin büyük sistemlerini çözmek için tasarlanmış, karmaşık çözücüler (solver) kullanır. Bu çözücülerin türü, çözümün hızını, kararlılığını ve doğruluk potansiyelini belirler.

2.1.1. Implicit ve Explicit Çözücüler

- **Implicit (Örtük) Çözücüler:** Statik ve quasi-statik (yarı-statik) problemler için idealdir.³¹ Bu çözücüler, her bir artım (increment) için büyük bir denklem sistemini çözerek, sistemi dengeye getirecek düğüm deplasmanlarını bulmaya çalışır.³² Bu yöntem, her bir adımın daha maliyetli olmasına rağmen, genellikle daha büyük zaman adımlarına izin verir. Ancak, yüksek derecede doğrusal olmayan problemlerin (örneğin temas veya plastik deformasyon) çözümünü sırasında yakınsama sorunları yaşayabilirler.³²
- **Explicit (Açık) Çözücüler:** Çarpışma, darbe veya metal şekillendirme gibi yüksek hızlı dinamik problemler için tasarlanmıştır.³² Bu çözücüler, bir önceki zaman adımından gelen bilgiyi kullanarak bir sonraki adımı doğrudan hesaplar ve dengeyi her adımda zorunlu kılmaz.³² Yakınsama sorunları yaşamazlar, ancak kararlılığı korumak için çok küçük zaman adımları gerektirirler.³²

Kullanıcının, bir programda quasi-statik bir problemi implicit çözücüyle çözerken, diğerinde ise explicit çözücünün kullanılması (kütle ölçekleme (mass scaling) gibi tekniklerle), temelde farklı bir hesaplama yaklaşımı benimsenmesine ve dolayısıyla farklı sonuçlara yol açabilir.³² Bu durum, sonuç farklılıklarının doğrudan, yazılımların varsayılan çözücü tercihlerinden kaynaklandığını göstermektedir.

Tablo 2 Sonlu eleman çözücülerinin nitelikleri.

Kriter	Implicit (Örtük) Çözücü	Explicit (Açık) Çözücü
Problem Tipi	Statik, quasi-statik, lineer dinamik. ³¹	Yüksek hızlı dinamik, darbe, çarpışma. ³²
Zaman Adımı	Genellikle büyüktür. ³²	Çok küçüktür (kararlılık için). ³²
Yakınsama	Doğrusal olmayan problemlerden etkilenebilir, yakınsama sorunları yaşayabilir. ³²	Yakınsama sorunu yoktur; her zaman bir çözüm bulunur. ³²
Hesaplama Maliyeti	Her adım daha maliyetlidir (matris tersi alma). ³²	Her adım daha az maliyetlidir. ³²

2.2. Hassasiyet ve Toleranslar: Yakınsamanın Temel Ayarları

2.2.1. Tekil (Single) ve Çift (Double) Hassasiyet

Bir bilgisayarın kayan nokta sayılarını temsil etme şekli, sonuçların doğruluğunu etkiler. Tekil hassasiyet (FP32) 32 bit bellek kullanırken, çift hassasiyet (FP64) 64 bit kullanır.³⁴ Bu, çift hassasiyetin 15'e kadar ondalık basamakta yüksek doğruluk sunmasını sağlarken, tekil hassasiyetin yaklaşık yedi ondalık basamakla sınırlı kalmasına neden olur.³⁵

Bu durum, özellikle çok farklı uzunluk ölçeklerine sahip geometrilerde (örneğin, uzun ve ince bir boru gibi) veya küçük basınç farklılıklarının akışı yönlendirdiği durumlarda kritik hale gelir.³⁶ Bir programın varsayılan olarak hıza öncelik veren tekil hassasiyeti kullanması, diğerinin ise doğruluğu ön planda tutan çift hassasiyeti kullanması, sonuçlarda tek başına önemli farklılıklara yol açabilir.³⁶

2.2.2. Yakınsama Kriterleri ve Yük Artımı Kontrolü

Doğrusal olmayan problemler, tek bir adımda çözülemezler; bunun yerine, çözümün kararlı bir değere ulaşana kadar tekrarlandığı küçük yük artımlarıyla çözülürler.³⁷ Bu iterasyonların ne zaman duracağını belirlemek için, deplasman, yük veya iş gibi kriterler için bir tolerans belirlenir.³⁸

Yazılımlar, varsayılan yakınsama toleranslarında ve yük artımlarını yönetme stratejilerinde farklılık gösterir. Bir yazılım daha sıkı bir tolerans kullanırken (örneğin %0.1), diğerinin varsayılan toleransı daha gevşek olabilir.³⁸ Bu durum, daha sıkı bir toleransın daha doğru bir çözüm üretmesine rağmen, yakınsamayı zorlaştırarak analizin başarısız olmasına neden olabileceği anlamına gelir.³⁷ Bu farklılıklar, sonuçların tam olarak neden "aynı" görünmediğini açıklayan gizli ama kritik faktörlerdir.

Bölüm III: İnsan Faktörü ve Sonuçların İşlenmesi

FEA sonuçlarındaki tutarsızlıklar, bazen modelleme veya hesaplama farklılıklarından değil, kullanıcı hatasından veya sonuçların sunuluş şekline kaynaklanabilir. Bir analistin, sonuçları doğru bir şekilde yorumlamak için bu nüansları anlaması esastır.

3.1. Son İşleme Paradoksu: İki Farklı Gerilme Hikayesi

FEA'da gerilme ve gerinim sonuçları, her elemanın içindeki Gauss (veya integrasyon) noktalarında hesaplanır ve daha sonra düğümlere (node) ekstrapole edilir.³⁹ Bir düğüm birden fazla eleman tarafından paylaşıldığında, her bir eleman bu düğüm için hafif farklı gerilme değerleri üretecektir. Bu durum, gerilmelerin nasıl sunulduğuna bağlı olarak sonuçların çok farklı görünmesine neden olabilir:

- **Düğümsel Gerilme Grafiği (Ortalama Alınmış):** Bu grafikte, bir düğümdeki gerilme değeri, o düğümü paylaşan tüm bitişik elemanlardan gelen gerilme değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanır.³⁹ Sonuç, eleman sınırlarında sürekli ve pürüzsüz görünen bir kontur grafiğidir.⁴⁰
- **Elementsel Gerilme Grafiği (Ortalama Alınmamış):** Bu grafikte, her elemanın kendi içindeki ortalama gerilme değeri gösterilir. Bu nedenle, bitişik elemanlar arasında keskin gerilme değişiklikleri gözlemlenir ve grafik "gürültülü" veya sürekli olmayan bir görünüme sahiptir.³⁹

Bir kullanıcı, bir programdan ortalama alınmış düğümsel gerilme grafiğini, diğerinden ise ortalama alınmamış elementsel gerilme grafiğini karşılaştırdığında, sonuçların "çok farklı" olduğu sonucuna varabilir. Oysaki, altta yatan sayısal çözüm çok benzer olabilir. Elementsel ve düğümsel gerilmeler arasındaki büyük fark, aynı zamanda ağın ilgili bölgede yeterince hassas olmadığını ve daha fazla ağ yoğunlaştırması gerektiğini gösteren önemli bir işarettir.³⁹

3.2. Doğrulama ve Geçerli Kılma: Nihai Otorite

Sonuçlara olan güven, iki yazılımın sonuçlarının birbirine benzemesinden değil, modelin doğrulanmış ve geçerli kılınmış olmasından gelir. Bu iki terim arasında kritik bir fark vardır:

- **Doğrulama (Verification):** Bu süreç, FEA modelinin matematiksel denklemleri doğru bir şekilde çözdüğünü onaylama sürecidir.⁴² Bu, hesaplamadaki sayısal hataların ortadan kaldırılmasını sağlamakla ilgilidir. Doğrulamanın birincil aracı **ağ yakınsama çalışmasıdır (mesh convergence study)**.³⁷ Bu çalışma, ana sonuçlar (gerilme, deplasman) kararlı bir değere yakınsayana kadar ağın sistematik olarak hassaslaştırılmasını içerir.³⁷
- **Geçerli Kılma (Validation):** Bu süreç, FEA modelinin fiziksel gerçekliği ne kadar doğru temsil ettiğini onaylama sürecidir.⁴² Bu, modelin, fiziksel deneylerden elde edilen verilerle (örneğin, strain gauge veya Digital Image Correlation (DIC) ölçümleri) karşılaştırılmasını içerir.⁴⁶

Analiz sonuçlarının neden farklılaştığına dair bir arayış, çoğu zaman ne yazık ki kullanıcı tarafından yapılan veya yazılımın varsayılan ayarlarından kaynaklanan binlerce farklılık nedeniyle boşa çıkabilir. Bu nedenle, bir uzmanın amacı, iki programın aynı sonucu vermesini sağlamak değil, her iki programdan

da elde edilen sonucun doğrulanmış ve geçerli kılınmış olup olmadığını belirlemektir. Gerçek anlamda güvenilir sonuçlar elde etmenin tek yolu budur.⁴⁹

4.0. Tutarsız Sonuçlar İçin Kapsamlı Sorun Giderme ve En İyi Uygulamalar Kılavuzu

Bir FEA modelindeki tutarsız sonuçları gidermek ve analizlerin doğruluğunu artırmak için sistematik bir yaklaşım şarttır. Bu kılavuz, potansiyel hataları ele alarak daha güvenilir sonuçlar elde etmenize yardımcı olacak adımları sunmaktadır.

4.1. Ön Analiz Kontrol Listesi: Hataları Ortaya Çıkmadan Engellemek

- **Amaçları ve Fiziki Tanımlayın:** Analizin temel amacı nedir? (Örneğin, pik gerilme, sistem rijitliği, yorulma ömrü).⁵⁰ Bu, uygun modelleme tekniklerini ve varsayımları seçmenize yardımcı olur.
- **Varsayımları Doğrulayın:** Malzeme özellikleri doğru ve tam mı? Yükler ve sınır koşulları fiziksel gerçekliğin makul bir basitleştirmesi mi?²²
- **Birimleri Kontrol Edin:** Görünürde aynı olan bir model, sadece birim sistemlerindeki tutarsızlık nedeniyle tamamen farklı sonuçlar verebilir.²⁷

4.2. Tutarsız Sonuçlar İçin Sorun Giderme Rehberi

Eğer sonuçlar zaten farklıysa, aşağıdaki adımları sırayla izleyerek sorunun kaynağını belirleyebilirsiniz:

- **Adım 1: Temelleri Kontrol Edin.**
 - Modelin birimlerinin her iki yazılımda da tutarlı olduğundan emin olun.²⁷
 - Sınırlaması olmayan gövdeler (unconstrained bodies) veya serbestlik dereceleri olup olmadığını kontrol edin. Bunlar, "rijit gövde hareketi"ne yol açarak çözücünün başarısız olmasına neden olabilir.¹⁷
- **Adım 2: Ağ Yapısını İnceleyin.**
 - Her iki modeldeki ağların eleman tiplerini (doğrusal vs. karesel, tetrahedral vs. heksahedral) ve derecelerini karşılaştırın.⁶
 - Ağ kalitesi metriklerini (Aspect Ratio, Skewness, Jacobian) kontrol edin.⁸ Bir ağın kalitesiz elemanlar içermesi, tek başına önemli farklılıklara yol açabilir.¹¹

- **Adım 3: Fiziği Sorgulayın.**

- Problemin gerçekten doğrusal olup olmadığını yeniden değerlendirin. Yüksek deformasyonlar, karmaşık temaslar veya malzeme akması (plasticity) varsa, doğrusal bir analiz yeterli olmayacaktır ve doğrusal olmayan bir yaklaşıma geçiş düşünülmelidir.¹⁵
- Kontak tanımlamalarını karşılaştırın (kinematik vs. penalty, master/slave tanımlamaları).²³

- **Adım 4: Çözücü ve Sayısal Ayarları İnceleyin.**

- Kullanılan çözücü tipini (implicit vs. explicit, direct vs. iterative) kontrol edin.³
- Varsayılan hassasiyet ayarlarını (single vs. double precision) karşılaştırın.³⁴
- Yakınsama kriterlerindeki (tolerance) farkları inceleyin. Bir programın daha gevşek bir toleransla hızlı bir şekilde çözüme ulaşması, diğerinin daha sıkı tolerans nedeniyle yakınsayamaması olasıdır.³⁷

- **Adım 5: Dügümsel ve Elementsel Sonuçları Karşılaştırın.**

- Eğer görsel çıktılar farklı görünüyorsa, birinin ortalama alınmış düğümsel gerilmeleri, diğerinin ise ortalama alınmamış elementsel gerilmeleri gösterip göstermediğini kontrol edin.³⁹ Elementsel ve düğümsel gerilmeler arasındaki büyük farklılık, ağ hassaslaştırmasına ihtiyaç duyulduğunun bir göstergesidir.⁴¹

4.3. FEA Yazılımları: Karşılaştırmalı Genel Bakış

Her yazılım paketi, farklı bir felsefe, kullanıcı kitlesi ve güçlü yönler setiyle tasarlanmıştır. Bu farklılıklar, bir uzmanın hangi araçların ne tür problemler için en uygun olduğunu bilmesini gerektirir.⁵²

Tablo 3 Sonlu elemanlar analizi yazılımları.

Kriter	Abaqus	ANSYS	Nastran	CAD-Entegre Araçlar (SolidWorks, NX, Creo)
Genel Kullanım	Doğrusal olmayan analizlerde, karmaşık malzeme modellerinde ve dinamik problemlerde çok güçlüdür. ⁵⁴	Geniş bir yelpazede (yapısal, akış, termal) kullanılabilir; kullanıcı dostu arayüzü vardır. ⁵³	Havacılık ve uzay endüstrisinde bir referanstır; lineer ve dinamik analizlerde güçlüdür. ⁵⁴	Hızlı ve basit lineer analizler için uygundur; tam kapsamlı yeteneklerden yoksundur. ⁵²
Özel Güçlü Yönleri	Çok güçlü malzeme kütüphanesi ⁵³ , esnek kullanıcı tanımlı alt programlar (subroutines) ⁵⁶ ve entegre explicit çözücü. ⁵⁴	Otomatik ağ oluşturma ve adaptif ağ özellikleri. ⁵⁶ Enerji endüstrisinde tercih edilir. ⁵⁴	Aerodinamik ve flutter analizleri gibi özel çözüm tipleri vardır. ⁵⁸	Doğrudan CAD geometrisi üzerinde çalışır, tasarım sürecini hızlandırır. ⁵²

5.0. Sonuç: Güvenilir FEA'ya Bütünsel Bir Yaklaşım

Sonlu eleman analizinde sonuçların farklı yazılımlarda tutarsız çıkması, bir arıza değil, yazılımların içsel farklılıklarının bir sonucudur. Bu farklılıklar, eleman tipi seçiminden ve ağ kalitesinden, çözücü algoritmalarına, sayısal hassasiyet varsayımlarına ve sonuçların nasıl işlendiğine kadar uzanan bir dizi karmaşık faktörün birleşimiyle ortaya çıkar.

Gerçek bir FEA uzmanının amacı, iki programın birbirine benzeyen sonuçlar üretmesi değil, elindeki sonucun fiziksel gerçekliği doğru bir şekilde temsil ettiğinden emin olmaktır. Bu, sonuçların sürekli olarak doğrulanmasını (ağ yakınsama çalışmalarıyla) ve mümkünse geçerli kılınmasını (fiziksel testlerle) gerektirir. Yüzeydeki "aynı koşullar" varsayımını aşarak, her bir analizin altında yatan gizli varsayımları ve sayısal ödünleşimleri anlamak, bir analisti sorun

özücüden bir uzmanaya dönüştüreceğ kritik bir beceridir. Bu bütünsel yaklaşım, mühendislik kararlarında güvenilirliğin anahtarıdır.

Kaynaklar

- Differences Between Finite Element Analysis (FEA) and Finite Element Method (FEM) - AltaSim Technologies, LLC, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://altasimtechnologies.com/differences-between-finite-element-analysis-fea-and-finite-element-method-fem-2/>
- What is Finite Element Analysis (FEA)? - Ansys, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-finite-element-analysis>
- Finite element method - Wikipedia, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method
- FreeFEM - An open-source PDE Solver using the Finite Element Method, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://freefem.org/www.autodesk.com>, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.autodesk.com/learn/ondemand/course/product-simulation-with-inventor-nastran/unit/1vSMi0fQ5ZgiF26xdrwirH#:~:text=Linear%20and%20parabolic&text=Linear%20elements%20are%20considered%20lower,six%20edges%2C%20and%20four%20nodes>
- Linear vs Quadratic FE Elements - FEA Tips, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://featips.com/2019/03/29/linear-vs-quadratic-fe-elements/>
- Explain it like I'm five, the difference between finite difference and finite element. - Reddit, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.reddit.com/r/engineering/comments/v5vq7/explain_it_like_im_five_the_difference_between/
- Ansys Mesh Metrics Explained - Mechead.com, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.mechead.com/mesh-quality-checking-ansys-workbench/>
- Mesh Quality | Mesh Visualization Tips - SimScale, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/mesh-quality/>
- Verifying your mesh, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://abaqus.uclouvain.be/English/SIMACAECAERefMap/simacae-c-mgnconcpartitionverify.htm>
- Which Abaqus Element Type Should I Use - Article 4: Element Quality Check Criteria, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.fidelisfea.com/post/which-abaqus-element-type-should-i-use-article-4-element-quality-check-criteria>
- Mesh generation - Wikipedia, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Mesh_generation

Mesh Generation Algorithms - Altair Product Documentation, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://2022.help.altair.com/2022/hwdesktop/hm/topics/pre_processing/meshing/meshing_generation_algorithms_r.htm

Fully automatic meshing or mixed meshing: comparison - Altair Product Documentation, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://help.altair.com/flux/Flux/Help/english/UserGuide/English/topics/MaillageEntierementAutomatiqueOuMaillageMixte.htm>

Linear versus Nonlinear FEA: What's the Difference? - Situs Engineering LLC, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://situsengineering.com/linear-versus-nonlinear-fea/>

In short explained: Linear and nonlinear structural analysis - Femto Engineering, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.femto.eu/femto_story/linear-non-linear-analysis-explained/

Warning! Are You Making Any Of These 8 Common FEA Mistakes? - caendkölsch, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://caendkoelsch.wordpress.com/2020/02/27/warning-are-you-making-any-of-these-8-common-mistakes-that-fe-analysts-make/>

Nonlinear Material Behavior in FEA - Number Analytics, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/nonlinear-material-behavior-fea>

Nonlinear Material Models in FEMAP - Saratech, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://saratech.com/2019/02/nl-materials-in-femap/>

NonLinear Materials | PDF - Scribd, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.scribd.com/doc/134187496/NonLinear-Materials>

How to Interpret FEA Results? - Enterfea, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://enterfea.com/how-to-interpret-fea-results/>

Failure potential: FEA (Finite Element Analysis) - 9 criteria - maschinenkanzlei.de, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.maschinenkanzlei.de/en/finite-element-analysis-error-expert/>

Abaqus General Contact Tutorial - Chani Greenbaum, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.chanigreenbaum.com/pdf/upload/abaqus%20general%20contact%20tutorial.pdf>

Understanding Abaqus General Contact - GoEngineer, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.goengineer.com/blog/understanding-abaqus-general-contact>

MSC Nastran Contact - SIMTEQ Engineering, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://simteq.co.za/blog/msc-nastran-contact/>

Linear Contact Analysis: Demystified - Applied CAx, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.appliedcax.com/wp-content/uploads/2010-07-29_Femap-NX_Nastran_Seminar-Linear_Contact_Analysis-WhitePaper.pdf

FEA Fails: 5 Embarrassing Mistakes Even Experts Make (And How to Avoid Them), erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://featips.com/2025/03/26/fea-fails-5-embarrassing-mistakes-even-experts-make-and-how-to-avoid-them/>

Simulation error unknown : r/SolidWorks - Reddit, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.reddit.com/r/SolidWorks/comments/1hfgdun/simulation_error_unknown/

Understanding Boundary Conditions in Finite Element Analysis - Alooba, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.alooba.com/skills/concepts/finite-element-analysis-386/boundary-conditions/>

6 Reasons Why Your FEA Analysis Doesn't Work - Mechartes, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://mechartes.com/resources/reasons-fea-analysis-work/>

Abaqus Standard Vs Explicit Explained: Pick The Right One, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://caeassistant.com/blog/abaqus-standard-or-abaqus-explicit/>

In layman terms, why is Abaqus an 'explicit' solver? - Reddit, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.reddit.com/r/Abaqus/comments/1b3xtzn/in_layman_terms_why_is_abaqus_an_explicit_solver/

A contact algorithm for explicit dynamic FEM analysis E. Anderheggen", D. Ekcian", K. Heiduschke", P. Bartelt^ & - WIT Press, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CON93/CON93032FU.pdf>

Single, Double, Multi, and Mixed-Precision Computing - AMD, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.amd.com/en/resources/articles/single-precision-vs-double-precision-main-differences.html>

Difference between Single Precision and Double Precision - GeeksforGeeks, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.geeksforgeeks.org/computer-organization-architecture/difference-between-single-precision-and-double-precision/>

ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 1.1.1 Single-Precision and Double-Precision Solvers, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.afs.enea.it/project/neptuinus/docs/fluent/html/ug/node11.htm>

Convergence In FEA - What Should We Look Out For? - Fidelis Engineering Associates, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.fidelisfea.com/post/convergence-in-fea-what-should-we-look-out-for>

Understanding convergence in a Nastran nonlinear analysis - Autodesk, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/Understanding-convergence-in-an-Autodesk-Nastran-nonlinear-analysis.html>

Node Values Versus Element Values - 2018 - SolidWorks Web Help, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://help.solidworks.com/2018/english/solidworks/cworks/c_node_values_versus_element_values.htm

What is the difference between the results generated by Nodal solution and Element solution in ANSYS? | ResearchGate, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.researchgate.net/post/What_is_the_difference_between_the_results_generated_by_Nodal_solution_and_Element_solution_in_ANSYS

SolidWorks Simulation - Element Stresses and Nodal Stresses - YouTube, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=wkzGRIuphdc>

Difference between verification and validation? : r/fea - Reddit, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.reddit.com/r/fea/comments/t6qlz1/difference_between_verification_and_validation/

Mesh Convergence: The Key to Reliable FEA - Number Analytics, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/mesh-convergence-key-to-reliable-fea>

Can identical parts yield different Static Analysis results? : r/SolidWorks - Reddit, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.reddit.com/r/SolidWorks/comments/mkw7lt/can_identical_parts_yield_different_static/

Finite Element Model Validation and Mesh Refinement - FEMtools, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.femtools.com/solutions/updating.htm>

FEM/FEA Model Validation | Luna, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://lunainc.com/solution/model-validation>

Validation of Finite-Element Models using Full-Field Experimental Data - OSTI.GOV, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1602622>

How to Validate your next Finite Element Analysis (FEA) Model using Strain Gauges | ITM, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://itestsystem.com/posts/how-to-validate-you-next-finite-element-analysis-fea-model-using-strain-gauges/>

Can two different modeling programs be used to confirm the results of each other?, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://engineering.stackexchange.com/questions/2237/can-two-different-modeling-programs-be-used-to-confirm-the-resu-lts-of-each-other>

15 Common Mistakes in FEA - FEA Academy, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://fea-academy.com/index.php/component/content/article/27-blog/fea-generalities/70-15-common-mistakes-in-fea?Itemid=101>

Setting Up the Finite Element Model, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.sandia.gov/files/cubit/15.4/help_manual/WebHelp/item/set-up.htm

INTEGRATED FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) IN THREE-DIMENSIONAL COMPUTER AIDED DESIGN PROGRAMS (CAD) - OVERVIEW AND COMPARISON, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.designsociety.org/download-publication/25371/integrated_finite_element_analysis_fea_in_three-dimensional_computer_aided_design_programs_cad-overview_and_comparison

The Top 6 Best Finite Element Analysis (FEA) Software 2025 - WorQuick, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.worquick.com/post/best-finite-element-analysis-fea-software>

What are the advantages of ABAQUS over ANSYS? - ResearchGate, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.researchgate.net/post/What-are-the-advantages-of-ABAQUS-over-ANSYS>

ABAQUS Vs ANSYS | CAE Assistant, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://caeassistant.com/wp-content/uploads/2022/04/caeassistant-com-blog-abaqus-vs-ansys-.pdf>

What is the difference between Ansys and Abaqus? | by Shwe Nwe - Medium, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://medium.com/@shwenwe13/what-is-the-difference-between-ansys-and-abaqus-720c93cd71ef>

ABAQUS Vs ANSYS: Difference Between Ansys And Abaqus-2025 - CAE Assistant, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://caeassistant.com/blog/ansys-vs-abaqus/>

I'm familiar with ansys. Should I go for Abaqus or Nastran? : r/fea - Reddit, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.reddit.com/r/fea/comments/55ttdd/h/im_familiar_with_ansys_should_i_go_for_abaqus_or/

MSC/NASTRAN or ABAQUS - Which software is more compatible for modelling of composite materials? | ResearchGate, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.researchgate.net/post/MSC_NASTRAN_or_ABAQUS-Which_software_is_more_compatible_for_modelling_of_composite_materials



BÖLÜM 2

Covid Döneminde Uçaklarda İç Hava Kalitesinin Mühendislik Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi

Ahmet Çoşgun¹ & Leyla Akbulut²

1.GİRİŞ

Bilindiği üzere dünya geneline yayılan COVID-19 salgınının Türkiye'de tespit edilen ilk vakası Sağlık Bakanlığı tarafından 11 Mart 2020 günüdür. Türkiye de virüse bağlı ilk ölüm ise 15 Mart 2020'de gerçekleşmiştir. Bu tarihten sonra Tüm dünyada olduğu gibi sağlık bakanlığı koordinesinde gerekli önlemler alınmaya başlanmıştır. Bunlardan biriside seyahat uçaklarında alınacak önlemlerdi. Uçak kabinlerinde iç hava kalitesi, hem yerde hem de uçuş sırasında sistemsel nedenlerle zaman zaman kirletici unsurlarla bozulabilmektedir. Bu durum, mürettebatın sağlık şikayetlerine neden olabilmektedir. Hava kirliliği genellikle hoş olmayan kokular şeklinde ortaya çıkar. Özellikle medya raporları, bu kokuların olası nedenlerini buharlar veya türbin yağlarının ayrışma ürünleri ve ilgili katkı maddesi Trikresil Fosfat (TF) olarak göstermektedir. Trikresil fosfatlar birkaç farklı izomerik formda bulunabilir. Yağ bileşenlerinin, tahliye havasıyla birlikte kazara kabin ve kokpite girmesi mümkün olabilmektedir.

Ancak yolcu uçaklarındaki rahatsız edici kokular sadece türbin yağlarından kaynaklanmaz. Hoş olmayan ve rahatsız edici kokuların başka kaynakları da vardır. Geçmişte mürettebat üyeleri kokudan kaynaklanan sağlık sorunlarına ilişkin bildirimlerde bulunmuştur. Trafik ve ulaşım sosyal kurumları, bu tür sağlık şikayetlerinin bildirildiği sorumlu sigorta kurumudur. Bu durum, çok faktörlü bir olgunun varlığını düşündürmektedir. Tek başına TF'nin ve özellikle orto izomerlerinin sağlık üzerindeki olumsuz etkileri, biyolojik izleme sonuçlarına dayanarak azaltılabilir. Havayolu seyahati uluslararası alanda önemli bir toplu taşıma biçimidir, uluslararası hava seyahati büyük ölçüde aşmaktadır. Havayolu endüstrisinin hava kalitesine ilişkin iddiaları, ulaşım ve bina hava kalitesi tasarımı ve analizinde önemli kavramları incelemek için kullanışlı bir çerçeve sunmaktadır[1,2].

Uçaklardaki iç hava kalitesi (IAQ), modern havacılık endüstrisinin önemli bir konusudur. Uzun süreli uçuşlar sırasında yolcuların sağlık ve konforunu etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Uçak kabininde bulunan havanın kalitesi, yolcuların

¹ Dr. Öğr. Üyesi., Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Bölümü, Termodinamik Bilim Dalı Kampüsü/ANTALYA

² Öğr. Gör., Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Akseki Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü Akseki/ANTALYA

ve mürettebatın sağlık ve konfor düzeyini belirleyen önemli bir unsurdur. Uçak kabinindeki iç hava kalitesi; basınç düzeyi, nem miktarı, karbondioksit oranı, uçucu organik bileşiklerin varlığı ve havadaki partiküller gibi çeşitli çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Uçaklardaki iç hava kalitesi sorunları, çözümleri ve gelecek perspektifleri detaylı bir şekilde bu kitap bölümünde ele alınmaya çalışılmıştır. Uçaklardaki iç hava kalitesi (IAQ), uçuş sırasında maruz kalınan fiziksel ve kimyasal etkenlerle doğrudan ilişkilidir. Bu etkenler arasında; uçak motorlarından ve diğer teknik sistemlerden kaynaklanan gazlar ve buharlar, kabin içindeki malzemelerden yayılan kimyasallar, yolculardan kaynaklanan biyolojik kirleticiler ve dış ortamdan kabine sızan hava kirliliği bulunur. Özellikle, uçuş esnasında kabin basıncının deniz seviyesinden daha düşük olması, oksijen seviyelerinin azalmasına ve yolcuların daha çabuk yorgun hissetmesine neden olabilir. Aynı zamanda, düşük nem oranları cilt kuruluğu, gözlerde tahriş ve solunum yolu rahatsızlıklarına yol açabilir. Uçaklarda maruz kalınan iç hava kalitesinin yolcu ve mürettebat sağlığı ile konfor düzeyi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde analiz edilmesi, Bu bağlamda, iç hava kalitesinin sürdürülebilir şekilde iyileştirilmesi için havalandırma sistemlerinin modernize edilmesi ve gelişmiş filtreleme teknolojilerinin entegrasyonu gerekmektedir. Özellikle uzun mesafeli uçuşlarda, optimize edilmiş iç hava yönetimi hem sağlık açısından hem de operasyonel konfor açısından hayati önem taşımaktadır. Bu çalışma, uçaklarda içi hava kalitesi ile ilgili mevcut literatürü gözden geçirerek, bu alandaki en güncel bulguları ve gelecekte yapılması gereken araştırma alanlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Havayolu yolcu endüstrisine geçildiğinde, örneğin yolcu kabin hava kalitesinin birçok başka ortamla karşılaştırıldığında olağanüstü derecede iyi olduğu iddia edilmiştir. Bazı havayolları, uçak kabinlerindeki hava ofislerdekine kıyasla daha temiz olduğunu ve hastanelerdeki hava ile aynı düzeyde olduğunu iddia etmektedir, çünkü kabin havalandırma sistemlerinde HEPA filtreleri kullanılmaktadır. Kabin içerisinde havalandırma sistemlerindeki HEPA filtreleri, kabin içindeki yolcular arasında dağılan aerosollerini engelleyemez. Bazı havayolu şirketleri, uçak kabin havasının ofis ortamlarından daha temiz ve hastane standartlarına yakın olduğunu öne sürmektedir. Bu iddianın temelinde, kabin havasının sirkülasyonunda kullanılan HEPA filtrelerin etkinliği yer almaktadır. Hemen hemen hepsi hava değişim oranının bina ortamlarına kıyasla yüksek olduğunu ve devir edilen havanın HEPA filtrelerinden geçerek hava yoluyla yayılan virüslerin neredeyse %100'ünü temizlediğini belirtmektedir [3,4,5,6,7,8,9,10].

COVID-19 endişesi olduktan sonra 'hava değişim oranı ne kadar yüksekse hava kalitesi o kadar iyidir' denilebilir. Son zamanlarda, bazı endüstri yayınları uçak kabinlerinde solunan virion taşıyan aerosollerin sayısının, yayılan sayıya kıyasla çok az olduğunu gözlemlemiştir [11,12].

2. UÇAK KABİNİNDE ÇEVRESEL KOŞULLAR VE SAĞLIK ETKİLERİ

2.1. Kabin Basıncı ve Oksijen Seviyesi:

Uçaklar seyir irtifasında yaklaşık 30.000 ila 40.000 feet (9.000–12.000 metre) arasında uçarlar. Bu yüksekliklerde atmosferik basınç oldukça düşük olduğundan, uçak içi kabinler yaklaşık 8.000 feet (2.438 metre) irtifaya eşdeğer bir basınçta tutulur. Bu durum yolcular için genellikle tolere edilebilir olsa da, bazı bireylerde hipoksiye bağlı yorgunluk, baş ağrısı, baş dönmesi veya nefes darlığı gibi etkiler ortaya çıkabilir [13].

Oksijen parsiyel basıncının düşmesi, özellikle yaşlı yolcular, solunum hastalıkları olanlar veya kalp yetmezliği gibi kronik rahatsızlığı bulunan kişilerde daha belirgin fizyolojik stres yaratabilir. Araştırmalar, bu basınç seviyesinde sağlıklı bireylerde bile kandaki oksijen doygunluğunun %95'ten %89'a kadar düşebileceğini göstermiştir [14].

2.2. Kabin Nem Oranı ve Fizyolojik Etkileri:

Modern yolcu uçaklarında, havalandırma sistemlerinin dış hava alımına dayalı çalışması nedeniyle, kabin içindeki bağıl nem oranı genellikle %10–20 arasında kalır. Uçak kabinlerindeki bağıl nem oranı, standart iç mekânlarda kabul edilen %40–60 seviyesine kıyasla belirgin şekilde daha düşüktür ve bu durum fizyolojik rahatsızlıklara zemin hazırlayabilir. Düşük nem, cilt kuruluğu, göz yanması, boğazda tahriş ve ses kısıklığı gibi semptomlara neden olabilir [15].

Ayrıca, kuru hava solunum yollarındaki mukus tabakasının viskozitesini artırarak mukosilier temizlik mekanizmasını zayıflatabilir. Bu durum, patojenlerin solunum yollarında daha uzun süre kalmasına ve enfeksiyon riskinin artmasına yol açabilir [16].

Yeni nesil uçaklarda (örneğin Boeing 787 ve Airbus A350) bu sorunu azaltmak amacıyla kabin içi nem oranlarını %25'e kadar yükseltebilen sistemler geliştirilmiştir. Bu, özellikle uzun mesafeli uçuşlarda konforu artırmakta ve solunum sistemi üzerindeki yükü azaltmaktadır [17].

2.3. Karbondioksit Seviyeleri ve Hava Kalitesi Göstergeleri:

Uçaklarda kabin içi hava kalitesi göstergeleri arasında en önemli parametrelerden biri karbondioksit (CO₂) seviyesidir. CO₂, yolcuların solunumuyla sürekli olarak ortama salınır. Uçaklardaki HVAC sistemleri hava değişim oranı yüksek olmasına rağmen, doluluk oranı yüksek kabinlerde CO₂ seviyesi 1.500 ppm'in üzerine çıkabilir [18].

Bu düzeydeki CO₂ konsantrasyonları, baş ağrısı, halsizlik ve bilişsel performansta azalma gibi etkilere neden olabilir. Yüksek karbondioksit

seviyeleri, sadece bir konfor sorunu değil, aynı zamanda havalandırma sistemlerinin yetersiz çalıştığı durumların bir göstergesidir [19].

CO₂'nin yanı sıra, uçucu organik bileşikler (VOC'ler), ozon ve azot dioksit gibi diğer hava kirleticileri de kabin içinde ölçülmesi gereken parametreler arasındadır.

2.4. Kimyasal Kirleticiler (TF, VOC'ler) ve Duman:

Uçaklarda kabin içinde zaman zaman algılanan "yağ kokusu" veya "yanık havası", genellikle uçak motorlarından veya türbin yağlarından kaynaklanan buharların kabine sızmasından dolayı oluşur. Bu tür durumlar genellikle bleed air sistemlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Trikresil Fosfat (TF), bu yağlarda bulunan bir katkı maddesidir ve toksik etkileri nedeniyle sıkça tartışma konusu olmuştur. TF'nin özellikle ortoisoimerik formlarının nörotoksik etkileri literatürde tanımlanmıştır. Uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ise kabin içindeki döşeme, yapıştırıcılar ve temizlik kimyasallarından kaynaklanabilir. Bu maddeler, maruziyet düzeyine göre baş ağrısı, mide bulantısı ve irritasyon gibi etkilere neden olabilir [20].

2.5. Düşük Nem – Solunum Sistemi ve Mukosilier:

Temizlik Solunum yolları, vücuda giren havayı nemlendirerek ve partikülleri filtreleyerek çalışan bir mukosilier savunma sistemi ile korunur. Uçaklarda kabin içi düşük nem oranları, bu savunma sisteminin etkinliğini azaltır. Mukosilier aktivitenin yavaşlaması, virüslerin ve bakterilerin daha derin solunum yollarına ulaşma olasılığını artırır [21].

Bu nedenle, kuru hava sadece konfor sorunu değil, aynı zamanda enfeksiyonlara karşı savunmasızlık artışı anlamına gelir. Yapılan çalışmalarda, düşük nem ortamında grip virüslerinin daha uzun süre havada kalabildiği ve bulaşıcılığını koruduğu saptanmıştır [22].

3. HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ VE FİLTRASYON

3.1. HVAC Sistem Dinamikleri :

Uçaklardaki çevresel kontrol sistemi (HVAC – Heating, Ventilation, and Air Conditioning), kabin içi sıcaklık, basınç, nem ve hava kalitesini kontrol eden karmaşık bir sistemdir. Bu sistemin en temel bileşeni bleed air olarak adlandırılan ve uçak motorlarının kompresör kademesinden alınan yüksek basınçlı, sıcak havadır. Bu hava, soğutulduktan sonra kabin ortamına aktarılır ve burada yolcuların soluduğu havanın %40 ila %60'ını oluşturur. Geriye kalan kısmı ise kabin içinden devir daim edilen havadır [23]. Bu sistemin amacı sadece kabini ısıtmak veya soğutmak değil, aynı zamanda iç ortam havasını filtreleyerek sağlıklı bir atmosfer oluşturmaktır. Tüm bu işlemler, pack adı verilen üniteler

tarafından yürütülür. Kabin içinde hava genellikle üstten aşağıya doğru yönlendirilir; böylece yolcular arası yatay partikül taşınımı en aza indirilmiş olur [24]. Bu sistemler, aynı zamanda uçak tipine ve üreticiye göre farklı konfigürasyonlara sahiptir. Bu sistem, geleneksel bleed air kaynaklı olası kirlenmeleri azaltmak amacıyla geliştirilmiştir [25].

3.2. Hava Değişim Hızı ve Gecikme Süresi :

Uçaklarda Kabin içindeki hava kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden biri, hava değişim hızıdır (ACH – Air Changes per Hour). Ticari yolcu uçaklarında bu değer genellikle saatte 20 ila 30 defa arasında değişir. Bu oran, ofis binaları veya sınıflar gibi diğer kapalı alanlarla karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Tipik bir ofis ortamında ACH değeri genellikle 3-6 arasındadır [26].

Havalandırma sistemlerinde yüksek değişim hızları, ortamda biriken zararlı partiküllerin daha kısa sürede tahliye edilmesini mümkün kılar. Ancak burada önemli olan sadece oran değil, zaman faktörüdür. Bir ortamdaki kirletici seviyesinin belirli bir eşiğin altına düşmesi için geçen süreye “gecikme süresi” (delay time) denir. Uçak gibi yüksek hava akışı olan ortamlarda bu süre 10 dakika civarındayken, bina ortamlarında bu süre 30 dakikayı geçebilir [27].

Gecikme süresi kısa tutulduğunda, bir enfekte bireyin kabinden ayrılmasından sonra gelen ikinci bir grup yolcunun maruz kalma riski ciddi şekilde azaltılabilir. Bununla birlikte, kabin gibi kapalı ve kalabalık alanlarda bulunan kişi sayısının fazla olması, etkin havalandırmaya rağmen enfeksiyon bulaşma riskini tam olarak ortadan kaldırmaz [28].

3.3. HEPA ve MERV Filtrasyon Teknolojileri:

Modern ticari uçaklarda iç hava kalitesinin korunması amacıyla, genellikle HEPA (High Efficiency Particulate Air) sınıfı filtreleme sistemleri tercih edilmektedir. HEPA filtreleri, 0.3 mikron büyüklüğündeki partiküllerin %99.97’sini filtreleyebilme kapasitesine sahiptir. Bu filtreler, bakteriler, mantarlar ve birçok virüs taşıyıcısı olan aerosol partikülleri için oldukça etkilidir [29].

Aşağıda tablo 1’de Filtreleme sisteminin teknik özellikleri verilmiştir.

Özellik	HEPA Filtresi	MERV 13 Filtresi
Filtrasyon Standardı	EN1822 / ISO 29463	ASHRAE 52.2
0.3 µm Partikül Tutma Verimi	> %99.97	≥ %50
0.5–1.0 µm Partikül Tutma Verimi	> %99.99	70–85%
Kullanım Alanı	Uçaklar, Temiz Odalar, Hastaneler	Ofis, AVM, Okul
Basınç Düşüşü (Pa)	Yüksek (150–250)	Orta (50–100)
Enerji Tüketimi	Yüksek	Orta
Mikrobiyal Filtrasyon	Çok Yüksek	Orta
Değişim Sıklığı (Uçak İçin)	500–1000 saat	3–6 ay

Tablo 1. HEPA ve MERV 13 Filtreleme Sistemlerinin Teknik Özelliklerinin Karşılaştırması [56, 57].

Bina havalandırma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan MERV sınıfı filtreler, geniş hava debisi aralığında çalışırken belirli mikron büyüklüğündeki partikülleri etkili biçimde filtreleyebilme kapasitesine sahiptir [30]. Diğer taraftan HEPA filtreler uçaklarda gerekli taze hava miktarını sağlarken, aynı zamanda motor kaynaklı partiküllerin kabine ulaşmasını engelleyen sistemin bir parçasıdır. Bu sistemler düzenli olarak bakımdan geçirilir ve üretici talimatlarına göre değiştirilmesi önerilmektedir.

4.AEROSOL VE DAMLACIKLAR YOLUYLA BULAŞ RİSKİNİN TEKNİK DEĞERLENDİRMESİ

Partikül çapları değişkendir. 5 mikrondan küçük partikül çapına sahip olan aerosoller, ortam havasında uzun süre asılı kalabilen ve solunabilir özellik taşıyan mikroskobik yapılar arasında yer alır. Virionlar (bireysel virüs parçacıkları), enfekte bireylerin öksürmesi, hışırtması, konuşması veya sadece nefes alıp vermesiyle bu aerosoller yoluyla çevreye yayılabilir. Aerosoller, hava akımlarıyla birlikte geniş bir alana taşınabildiği için kapalı alanlardaki bulaş zincirinde kritik rol oynar [33]. Araştırmalar, SARS-CoV-2 gibi virüslerin bu aerosoller içinde canlı kalabildiğini ve partikül çapına göre havada dakikalar hatta saatlerce süzulebileceğini göstermektedir. Özellikle uçak gibi kontrollü ortamlar için, havalandırma sistemleri bu dağılımın yönünü ve konsantrasyonunu belirleyen en önemli faktördür. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile yapılan analizler, enfekte bireylerden çıkan aerosol parçacıklarının, kabin içinde birkaç koltuk ötesine taşınabileceğini ortaya koymaktadır [34].

COVID-19 pandemisi sırasında yapılan çalışmalar, virüsün fomit (yüzey) bulaşmasından çok daha fazla oranda aerosol yoluyla bulaştığını ortaya koymuştur. Bu nedenle uçaklar gibi kapalı sistemlerde, enfekte bireylerin nefes verdiği hava yoluyla çevrelerine virüs taşıma potansiyeli büyüktür. 2020’de gerçekleştirilen Transcom/AMC deneyinde, SARS-CoV-2 aerosollerinin uçak kabininde dakikalar içinde yayılabildiği tespit edilmiştir [36]. Ayrıca, kızamık gibi bazı virüsler 1–2 saat havada kalabilme yeteneğine sahiptir ve bu da klasik sosyal mesafe sınırlarının ötesine geçen bulaş senaryoları yaratır [37].

Koruyucu maske kullanımı, enfekte bireylerden yayılan damlacıkların ve aerosol partiküllerinin çevredeki bireylere ulaşmasını büyük ölçüde engelleyerek bulaşma riskini azaltan temel bireysel önlemlerden biridir. Özellikle N95 veya FFP2/FFP3 sınıfı maskeler, 0.3 mikron boyutundaki partiküllerin %95’ini veya daha fazlasını filtreleyebilir. Cerrahi maskeler ise kaynak kontrolünde etkilidir; yani enfekte bireylerin yayılımını azaltır [38]. Uçaklarda yapılan modelleme ve deneysel çalışmalar, tüm yolcuların maske taktığı senaryolarda aerosol bulaşma riskinin 5 ila 7 kat azaldığını göstermiştir [39]. Transcom 2020 çalışması, maskeli yolcuların bulunduğu uçak kabininde aerosollerin tespit süresinin ciddi şekilde kısaldığını ve maruz kalınan virüs dozunun düştüğünü ortaya koymuştur. Bunun yanında el hijyeni, yüzey dezenfeksiyonu, kabin içi filtrelerin periyodik değişimi ve boarding/deboarding sırasında fiziksel mesafeye dikkat edilmesi de bulaş riskini azaltan faktörlerdir [40].

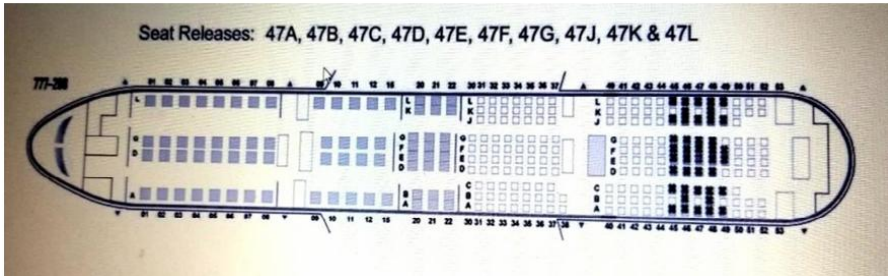
Solunumla geçen enfeksiyonlarda, kişinin enfekte ortamda geçirdiği süre bulaşma ihtimalini doğrudan etkileyen temel değişkenlerden biridir. Uzun uçuşlarda, yolcular aynı havayı uzun süre soluduğundan dolayı kümülatif virüs dozu artar. Bu durum, enfekte birey ile doğrudan temas olmasa bile bulaş ihtimalini yükseltir [41]. 2003 yılında yapılan bir çalışmada, 8 saat süren bir uçuşta, SARS hastası bir bireyin uçağın arka kısmındaki 22 yolcuya virüs bulaştırdığı kaydedilmiştir. Bu, uzun süreli maruziyetin damlacık sınırlarını aşarak aerosol etkisi yarattığını göstermektedir [42].

Uçuş Süresi (saat)	Maruz Kalma Dozu (göreceli birim)	Bulaşma Olasılığı (%)	Aerosol Yayılma Mesafesi (metre)
1	1	2	1
2	1,8	5	1,2
4	3,5	12	1,8
6	5,2	21	2,3
8	7,5	34	2,7
10	9,3	47	3,1

Tablo 2. Uçuş süresi ile aerosol maruziyeti, bulaşma riski ve yayılma mesafesi arasındaki ilişki (temsili veriler) [56, 57].

Farklı uçuş sürelerinde maruz kalınan aerosol dozu, bulaşma olasılığı ve aerosol yayılma mesafesinin nasıl değiştiğini görselleştirmek amacıyla oluşturulmuştur. Veriler ampirik literatürden derlenen tipik örneklerle ve Transcom/ASHRAE/WHO belgelerinde öne çıkan risk modellerine dayanmaktadır. Değerler birebir ölçüm değil, bilimsel referanslara dayalı temsili değerlerdir.

ABD Savunma Bakanlığı ve Transcom tarafından 2020 yılında Boeing ve Airbus uçaklarında yürütülen deneylerdir. Şekil 2. Boeing 777-200 model uçağında gerçekleştirilen Transcom cam boncuk deneylerinde kullanılan salınım koltuklarının yerleşimi[1]. Bu deneylerde, kabin içerisinde cam boncuk (fluoresan marker) aerosolleri belirli noktalardan salınmış ve kabin boyunca dağılımı özel sensörler aracılığıyla ölçülmüştür. Her bir denemede 42 dakikalık periyotta salınan partiküller, çeşitli koltuklarda biriken miktarlarla ilişkilendirilmiştir. Bulgular, kabin içi hava akışının dikey olduğu, yatay dağılımın sınırlı kaldığı ve maske kullanımının bulaşma riskini %77 oranında azalttığını göstermiştir [50]. Buna ek olarak, Harvard Healthy Buildings Programı çerçevesinde yapılan araştırmalarda, uçak kabinlerinin havalandırma sistemlerinin bina içi sistemlere kıyasla daha hızlı hava temizlediği ve virüs konsantrasyonlarını düşük tuttuğu deneysel olarak belgelenmiştir [51].



Şekil 2. Boeing 777-200 model uçağında gerçekleştirilen Transcom cam boncuk deneylerinde kullanılan salınım koltuklarının yerleşimi [1].

Uçak kabinlerinde iç hava kalitesinin (IAQ) doğru biçimde değerlendirilebilmesi için hem statik hem dinamik ölçümleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, mühendislik disiplininin iç hava yönetimi alanındaki uygulamalarının temelini oluşturur. Ölçümleme yalnızca anlık değerleri değil, zaman içinde değişen eğilimleri, ani yükselişleri ve sürekli sınır ihlallerini de takip etmeye imkân tanır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kitap bölümü çalışmasında, uçak kabinlerinde iç hava kalitesinin yolcu sağlığı, konforu ve enfeksiyon riski üzerindeki etkilerini disiplinler arası bir yaklaşımla araştırılmıştır. COVID-19 pandemisi ile birlikte hava kalitesi, sadece konfor değil, aynı zamanda bulaşıcı hastalıkların yayılmasında kritik bir değişken olarak öne çıkmıştır. Bunlar sırasıyla uçak kabinlerinde kullanılan HEPA filtreler ve yüksek hava değişim hızları, partikül yoğunluğunu önemli ölçüde azaltmakta; ancak bu sistemler, özellikle yakın mesafedeki yolcular arasında oluşan aerosol yayılımını tamamen engelleyememektedir. Nitekim yapılan bazı deneysel çalışmalarda (örneğin Transcom projesi), öksürükle oluşan aerosollerin kabin içerisinde 8 metreye kadar yayılabildiği gözlemlenmiştir [1].

- Aerosol dağılımı ve bireysel maruziyetin doğru tahmini, sadece filtreleme verimiyle değil, aynı zamanda HVAC sistem dinamikleri, kabin içi hava akış yönü ve yolcu yerleşim düzeni ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle her uçak tipi ve yolcu düzeni için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri kritik rol oynamaktadır.
- Düşük bağıl nem, uçak içi ortamda yaygın bir durumdur ve bu durum, solunum yollarının mukosilyer temizliğini bozarak hem enfeksiyonlara karşı savunmayı zayıflatmakta hem de mevcut enfeksiyonların şiddetini artırmaktadır [24].

Uçak kabinlerinde CO₂ seviyeleri zaman zaman 1500 ppm değerine yaklaşabilmekte olduğu literatür çalışmalarından anlaşılmaktadır. CO₂ genellikle durum, yorgunluk, dikkat eksikliği ve oksijenlenme bozuklukları gibi fizyolojik etkilerle yolcu konforunu azaltmaktadır.

Bu çalışmada öneri olarak sırasıyla, Hava kalitesi izleme sistemleri, uçak kabinlerine entegre edilerek, CO₂, VOC, RH, PM_{2.5} gibi parametrelerin anlık takibi sağlanmalı ve kritik eşikler aşıldığında kabin ekibi otomatik olarak bilgilendirilebilir.

2. HEPA filtrelerin sızdırmazlık testleri sıklaştırılmalı ve filtreleme etkinliği sadece laboratuvar ortamında değil, yerinde doğrulama sistemleriyle düzenli olarak denetlenmelidir.

3. Kabin içi bağıl nem oranı %30'un üzerine çıkarılmalı; bu amaçla uçak içi HVAC sistemlerine entegre nemlendirici çözümler geliştirilmelidir.

4. Uzun mesafeli uçuşlarda, maske kullanımı zorunlu hale getirilmeli, özellikle öksüren veya semptom gösteren yolcular için koltuk düzenlemeleri dinamik olarak değiştirilmelidir.

5. Yeni nesil uçaklarda, HVAC sistemleri yolcu hareketliliği, oturma planı ve uçuş süresi verilerine göre uyarlanabilir akıllı havalandırma sistemlerine geçiş sağlanmalıdır.

6. Uçak tasarım süreçlerinde CFD de iç hava kalitesi modelleme kullanılarak riskli hava cepheleri önceden belirlenmeli, virüs taşıyan yolcuların çıkış noktalarına etkisi optimize edilmesi için özellikle üniversitelerde doktora çalışmaları yapılmasını önermekteyiz.

6.KAYNAKLAR

- [1]. Silcott, D., Silcott, C., McDaniel, J., Johnson, C., & Lee, J. (2020). TRANSCOM/AMC Commercial Aircraft Cabin Aerosol Dispersion Tests. United States Transportation Command.
<https://www.ustranscom.mil/cmd/docs/TRANSCOM%20Report%20Final.pdf>
- [2]. US Bureau of Transportation Statistics. (2021). Table 1-40M: US Passenger-Kilometers (millions).
<https://www.bts.gov/content/us-passenger-kilometers>
- [3]. Wilson, B. (2020). What You Need to Know About Air Quality During Commercial Flights. TripSavvy. <https://tinyurl.com/y9mzkkh9>
- [4]. American Airlines. (2020). Travel Updates. <https://tinyurl.com/yxckmfvc>
- [5]. Delta Air Lines. (2020). 6 Ways Delta is Supporting Healthy Flying. <https://tinyurl.com/yxtuout2>
- [6]. Air Canada. (2020). Travel News and Updates. <https://www.aircanada.com>
7. Hawaiian Airlines. (2020). Keeping You Safe. <https://tinyurl.com/y5htqdr>
- [8]. Allen, J. (2020). Airplanes Don't Make You Sick. Really. The Washington Post. <https://tinyurl.com/y6vgs7go>
- [9]. Freeman, D. (2020). Letter to the Editor. ASHRAE Journal
- [10]. Allen, J., Spengler, J., Jones, E., & Cedeno-Laurent, J. (2020). Harvard Healthy Buildings Program.
- [11]. Allen, Joseph G., Spengler, John D., Jones, E., & Cedeno-Laurent, J. (2020). Harvard Healthy Buildings Program. Harvard T.H. Chan School of Public Health.
12. Davis, Ayah, Morawska, Lidia, Johnson, Greg R., Ristovski, Zoran D., & Hargreaves, Mark. (2021). Computational fluid dynamics modeling of cough transport in an aircraft cabin bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2021.02.15.431324>
13. Federal Aviation Administration. (n.d.). Introduction to aviation physiology. Civil Aerospace Medical Institute.
https://www.faa.gov/pilots/training/airman_education/media/IntroAviationPhys.pdf
14. San, Tugrul, Polat, Gokhan, & Arslan, Hasan. (2013). Effects of high altitude on sleep and respiratory system and their adaptations. The Scientific World Journal, 2013, Article ID 241569. <https://doi.org/10.1155/2013/241569>

15. Scheuch, Gerhard. (2020). Breathing is enough: For the spread of influenza virus and SARS-CoV-2 by breathing only. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 33(4), 230–234. <https://doi.org/10.1089/jamp.2020.1616>
16. Spengler, John, Vallarino, Joseph, McNeely, Emily, & Estephan, Hala. (2012). In-flight/onboard monitoring: ACER's component for ASHRAE 1262, Part 2. National Air Transportation Center of Excellence for RITE.
17. United States Environmental Protection Agency. (2021). Indoor air quality and carbon dioxide levels. <https://www.epa.gov.tr>
18. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2019). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for acceptable indoor air quality.
- [19]. Fabian, Patricia, McDevitt, James J., DeHaan, Wesley H., Fung, Roshan O. P., Cowling, Benjamin J., Chan, Kwok Hung, Leung, Gabriel M., & Milton, Donald K. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: An observational study. *PLoS ONE*, 3(7), e2691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002691>
- [20]. Chen, Wei, Zhang, Na, Wei, Jiaxing, Yen, Hui-Ling, & Li, Yuguo. (2020). Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. *Building and Environment*, 176, 106859. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>
- [21]. Fabian, Patricia; McDevitt, James J.; DeHaan, William H.; Fung, Raymond O. P.; Cowling, Benjamin J.; Chan, Kwok Hung; Leung, Gabriel M.; Milton, Donald K. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: An observational study. *PLoS ONE*, 3(7), e2691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002691>
- [22]. Chen, Wei; Zhang, Ning; Wei, Jie; Yen, Hui-Ling; Li, Yuguo. (2020). Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. **Building and Environment**, 176, 106859 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>
23. Spengler, John; Vallarino, Joseph; McNeely, Emily; Estephan, Hany. (2012). In-Flight/Onboard Monitoring: ACER's Component for ASHRAE 1262, Part 2. *National Air Transportation Center of Excellence for RITE*.
24. Zee, M., Davis, A.C., Clark, A.D. et al. Computational fluid dynamics modeling of cough transport in an aircraft cabin. *Sci Rep* 11, 23329 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02663-8>

25. Boeing. (2024). Dreamliner Technology: No Bleed Air System.
<https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#air> quality
26. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1 2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.
27. Chen, Qingyan. (2021). Risk of Airborne COVID-19 Virus Transmissions in Airliner Cabins. *ASHRAE Virtual Winter Conference*.
28. Fabian, Patricia; McDevitt, James J.; DeHaan, William H.; Fung, Raymond O. P.; Cowling, Benjamin J.; Chan, Kwok Hung; Leung, Gabriel M.; Milton, Donald K. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: An observational study. *PLoS ONE*, 3(7), e2691.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002691>
29. Grinshpun, Sergey A.; Haruta, Hiroshi; Eninger, Robert M.; Reponen, Tiina; McKay, Robert T.; Lee, Sung S. (2009). Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(10), 593–603.
<https://doi.org/10.1080/15459620903120086>
30. United States Environmental Protection Agency. (2021). Indoor Air Filtration.
<https://www.epa.gov/indoor-air-quality> iaq/air-cleaners-and-air-filters-home
31. Allen, J. (2020). What you need to know about air quality during commercial flights. TripSavvy.
<https://tinyurl.com/y9mzkkh9>
32. Silcott, D., Kinahan, S., Santarpia, J. L., Herrera, V. L., Rivera, D. N., Ratnesar-Shumate, S., & Broadhurst, M. J. (2020). TRANSCOM/AMC commercial aircraft cabin aerosol dispersion tests. United States Transportation Command.
<https://www.ustranscom.mil/cmd/docs/TRANSCOM%20Report%20Final.pdf>
33. Fabian, P., McDevitt, J. J., DeHaan, W. H., Fung, R. O. P., Cowling, B. J., Chan, K. H., Leung, G. M., & Milton, D. K. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: An observational study. PLoS ONE, 3(7), e2691.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002691>
34. Davis, A., Jung, J., Herker, S., Zayas, G., Candiotti, K., & Jayaweera, D. T. (2021). Computational fluid dynamics modeling of cough transport in an aircraft cabin. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2021.02.15.431324>
35. World Health Organization. (n.d.). Airborne disease transmission.
<https://www.who.int>

36. Silcott, D., Kinahan, S., Santarpia, J. L., Herrera, V. L., Rivera, D. N., Ratnesar-Shumate, S., & Broadhurst, M. J. (2020). TRANSCOM/AMC SARS-CoV-2 simulation in aircraft cabin. United States Transportation Command.
<https://www.ustranscom.mil/cmd/docs/TRANSCOM%20Report%20Final.pdf>
37. Centers for Disease Control and Prevention. (n.d.). Measles virus airborne duration studies. <https://www.cdc.gov>
38. Grinshpun, S. A., Haruta, H., Eninger, R. M., Reponen, T., McKay, R. T., & Lee, S. A. (2009). Performance of N95 filtering facepiece respirators and surgical masks during human breathing: Part I—Particle size distribution and comparison of penetration and pressure drop. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(10), 593–603.<https://doi.org/10.1080/15459620903120086>
39. Allen, J., Spengler, J., Jones, E., & Cedeno-Laurent, J. (2020). Airplanes don't make you sick. Really. *The Washington Post*. <https://tinyurl.com/y6vgs7go>
40. United States Environmental Protection Agency. (2021). Effectiveness of face masks and surface disinfection. <https://www.epa.gov>
41. Mangili, A., & Gendreau, M. A. (2005). Transmission of infectious diseases during commercial air travel. *The Lancet Infectious Diseases*, 5*(6), 409–414. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(05\)70114-3](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(05)70114-3)
42. Olsen, S. J., Chang, H. L., Cheung, T. Y. Y., Tang, A. F. Y., Fisk, T. L., Ooi, S. P. L., Kuo, H. W., Jiang, D. D. S., Chen, K. T., Lando, J., Hsu, K. H., Chen, T. J., & Dowell, S. F. (2003). Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft. *The New England Journal of Medicine*, 349*(25), 2416–2422. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa031349>
43. Centers for Disease Control and Prevention. (2020). Guidelines for air travel and infectious disease.
<https://www.cdc.gov/quarantine/air/managing-sick-travelers.html>
44. Chen, Q.-Y. (2021). Risk of airborne COVID-19 virus transmissions in airliner cabins. *ASHRAE Virtual Winter Conference*.*
45. Silcott, D., Kinahan, S., Santarpia, J. L., Herrera, V. L., Rivera, D. N., Ratnesar-Shumate, S., & Broadhurst, M. J. (2020). TRANSCOM/AMC commercial aircraft cabin aerosol dispersion tests. *United States Transportation Command*.*
<https://www.ustranscom.mil/cmd/docs/TRANSCOM%20Report%20Final.pdf>

46. Fabian, P., McDevitt, J. J., DeHaan, W. H., Fung, R. O., Cowling, B. J., Chan, K. H., Leung, G. M., & Milton, D. K. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: An observational study. **PLoS ONE, 3*(7), e2691.*
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002691>
47. Mangili, A., & Gendreau, M. A. (2005). Transmission of infectious diseases during commercial air travel. **The Lancet Infectious Diseases, 5*(6), 409–414.*
[https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(05\)70114-3](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(05)70114-3)
48. Davis, A., Jung, J., Herker, S., Zayas, G., Candiotti, K., & Jayaweera, D. T. (2021). Computational fluid dynamics modeling of cough transport in an aircraft cabin. **bioRxiv.**
<https://doi.org/10.1101/2021.02.15.431324>
49. Allen, J., Spengler, J., Jones, E., & Cedeno-Laurent, J. (2020). Airplanes don't make you sick. Really. **The Washington Post.**
<https://tinyurl.com/y6vgs7go>
50. Silcott, D., Kinahan, S., Santarpia, J. L., Herrera, V. L., Rivera, D. N., Ratnesar-Shumate, S., & Broadhurst, M. J. (2020). TRANSCOM/AMC commercial aircraft cabin aerosol dispersion tests. **United States Transportation Command.**
<https://www.ustranscom.mil/cmd/docs/TRANSCOM%20Report%20Final.pdf>
51. Harvard T.H. Chan School of Public Health. (2020). Risk of SARS-CoV-2 transmission in airplane cabins. <https://www.hsph.harvard.edu/covid-19/airborne-transmission-in-airplanes/>
52. Fabian, P., McDevitt, J. J., DeHaan, W. H., Fung, R. O., Cowling, B. J., Chan, K. H., Leung, G. M., & Milton, D. K. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: An observational study. **PLoS ONE, 3*(7), e2691.*
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002691>
53. Chen, W., Zhang, N., Wei, J., Yen, H. L., & Li, Y. (2020). Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. **Building and Environment, 176*, 106859.*
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>
54. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). **ANSI/ASHRAE Standard 62.1 2019: Ventilation for acceptable indoor air quality*.*
55. Fluke Corporation. (2021). **Fluke 985 and 975 Indoor Air Quality Tools*.*
<https://www.fluke.com>
56. TSI Incorporated. (2021). **IAQ measurement guide*.*
<https://www.tsi.com/products/iaq-instruments/>

57. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2017). *ASHRAE Standard 52.2; EN1822; Fluke Filtration Guide*.
58. World Health Organization. (2010). *WHO indoor air quality guidelines: Selected pollutants*.
- <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>