

## ARDIŞIK BOEING 737-MAX-8 KAZALARININ İNCELENMESİ

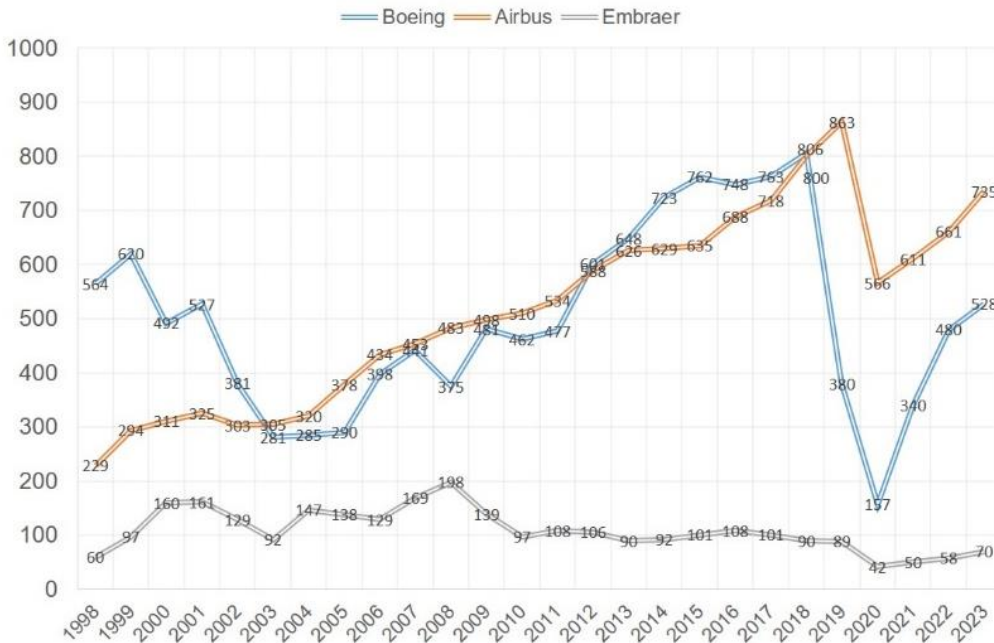
Tamer Saraçyakupoğlu 1<sup>1</sup>  
TUSAŞ, Ankara

### ÖZET

Havacılık tarihindeki kazaların hemen hemen hepsinin birden fazla etkenden dolayı meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bu durum, 29 Ekim 2018'de Endonezya'da ve 10 Mart 2019'da Etiyopya'da toplam 346 kişinin hayatını kaybetmesiyle sonuçlanan ardışık Boeing 737-Max-8 kazalarında da geçerli olmuştur. Bu kazalarda da görüldüğü üzere aleni ve örtük birçok faktör bir araya gelmiş ve sonuçta kazalar yaşanmıştır. Gerçekleştirilen incelemeler sonucunda, Leading Edge Aviation Propulsion (LEAP) adı verilen yeni tip bir motorun Boeing 737-Max-8 uçaklarında kullanılmaya başlanmasının kazalara giden yolu açtığı görülmektedir. Motor fan çapı önceki motorlara göre daha büyük olan LEAP varyantı motorun, kanada monte edilmesi ile motorun alt kısmının yere çok yaklaşması Ya-Ma-Ha (Yabancı Madde Hasarı) riskinin artmasına neden olmuştur. Ya-Ma-Ha'yı önlemek için motor kanatta daha öne ve daha yukarı bir pozisyona yerleştirilmiş ancak motorun yeni lokasyonu, uçağın ufki ve şakulî uçuşta dikey vektör ( $\alpha$ ) pozitif eğiliminin artmasına sebebiyet vermiştir. Söz konusu boylamsal kararsızlık ve tutunamama sorununu çözmek için Boeing firması, Manevra Karakteristiği Güçlendirme Sistemi (MKGS, Maneuvering Characteristics Augmentation System-MCAS) adı verilen yazılım tabanlı bir uygulamayı devreye almıştır. Hücum açısı (Angle-of-Attack-AoA) birçok hava aracı için  $16^{\circ}$ 'yi geçtiğinde perdövites/stall adı verilen havada tutunamama probleminde yol açmaktadır. MCAS, hücum açısı sensörlerinden alınan verilere dayanarak uçağın perdövitesine girmesini önlemek için elevatör vasıtasıyla "burun aşağı" komutu vermektedir. Ancak aynı MCAS sistemi yanlış AoA sinyali aldığı anda ufki ve şakulî uçan uçağı tehlikeli bir şekilde dalışa geçirmektedir. Uçağın MCAS'ten dolayı düştüğünü söylemek en kolaydır ama bu bütün süreci anlatmamaktadır. Bu çalışmada ardışık olarak meydana gelen Boeing 737-Max-8 kazalarına sebebiyet veren faktörler, pilotaj ve uçak mühendisliği perspektifinden ele alınacaktır.

### GİRİŞ

Küresel seviyede ticari havayolu işletmeciliğinde kullanılan uçakların büyük çoğunluğu Şekil 1.'de görüldüğü üzere, ABD menşeli Boeing firması, Avrupa Birliği menşeli Airbus ve Brezilya menşeli Embraer firmaları tarafından üretilmektedir [Centre for aviation, Statista, Chestnotes, 2024].



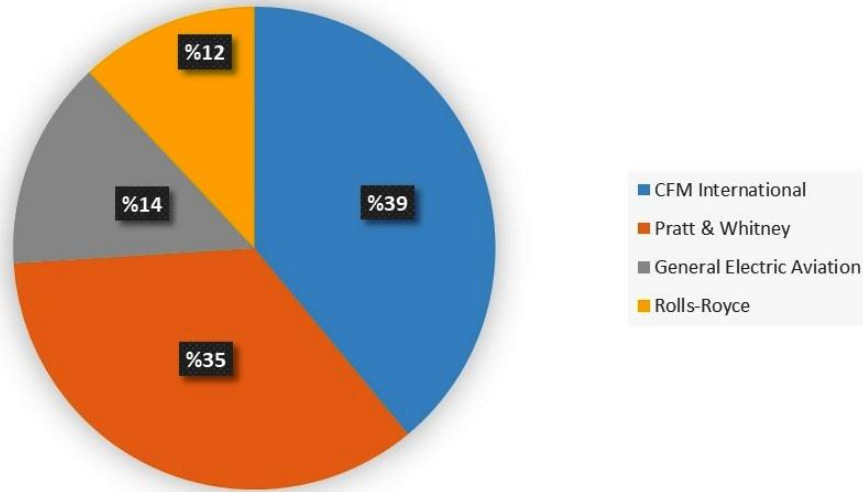
Şekil 1. 1998-2023 Yılları Arasında Ticari Yolcu Uçağı Satışları

<sup>1</sup> Doç. Dr. Tamer Saraçyakupoğlu, TUSAŞ-Akademi, dr.tamer@tamersaracyakupoglu.com.tr

Boeing ve Airbus firmalarının uçak üretimlerinin, en yakın rakipleri olan Embraer firmasının uçak üretimi arasında açıkara bir fark olduğu gözlemlenmektedir. Bu anlamda Boeing ve Airbus firmaları ticari yolcu uçağı üretim sektörünü domine eden hâkim firmalardır. Doğal olarak her iki firma çetin bir rekabet içerisinde dirler. Küresel olarak pandemi etkisinin görüldüğü 2019-2020 yıllarında olduğu gibi satış rakamlarının düştüğü dönemlerde bile Boeing ve Airbus firmaları arasında zorlu bir rekabetin söz konusu olduğu gözlemlenmektedir. 1998-2003 yılları ve 2012-2019 yılları arasında Boeing firmasının satış rakamlarının daha yüksek olmasına rağmen, 2020 yılından 2023 yılına kadar Airbus firması ticari havayolu taşımacılığı sektörüne uçak satma konusunda üstünlüğü ele geçirmiştir. 2024 yılı ilk yarısında da bu durum farklılık göstermemektedir.

Ticari yolcu uçaklarına yönelik motor üretimi faaliyetleri kapsamında ise General Electric ve Snecma ortak kuruluşu olan CFM International firması tarafından üretilen motorların havacılık endüstrisinde yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir. Şekil 2'de yer aldığı üzere, ticari havayolu taşımacılığında kullanılan motorların dağılımına bakıldığında CFM International %39, Pratt & Whitney %35, General Electric Aviation %14, ve Rolls-Royce %12 kompozisyonu gözlemlenmektedir [Kaur, 2022].

### Ticari Yolcu Uçağı Motor Üretimi Pazar Payları



Şekil 2. Ticari Yolcu Uçağı Motor Üretimi Pazar Payları

Uçak üreten firmalar zaman içerisinde kullandıkları motorları ve diğer bileşenleri daha verimli ve daha maliyet-etkin olanları ile değiştirmektedirler. Bu değişiklikler, uçak üreten firmaların rekabet güçlerini korumaları ve artırmaları açısından önem taşımaktadır.

CFM International firması da bu kapsamda, LEAP ailesi motorunu LEAP-1A ve LEAP-1B olarak iki varyant halinde üretmiştir. Yenilikçi birçok teknolojinin yanı sıra kompresör modülünde titanyum hücum kenarlarının yer aldığı karbon fiber fan bıçaklarının (Blade) kullanıldığı CFMLEAP ailesi motorları sadece yakıt tüketiminin daha az olması sebebiyle değil aynı zamanda karbon ve azot oksit emisyonlarının %50 oranında azaltıldığı, yaydığı gürültünün %25 oranında düşürüldüğü başarılı bir motor tipi olarak ticari havayolu sektöründe hızla yaygınlaşmıştır [Štourač,2021].

### AIRBUS VE BOEING FİRMALARININ CFMLEAP MOTOR AİLESİNE GEÇİŞ SÜREÇLERİ VE AVANTAJLARI

Airbus firması, A320-200 uçağının üzerinde bulunan CFM56-5B6 motorunu, CFMLEAP-1A motoru ile değiştirerek A320-Neo uçağını sektöre dahil etmiştir. A320-Neo uçaklarının ilk test uçuşu 19 Mayıs 2015 tarihinde gerçekleştirilmiş ve Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (European Aviation Safety Agency-EASA) ile ABD Havacılık Dairesi (Federal Aviation Administration-FAA) tarafından onaylanan tip sertifikasını 31 Mayıs 2016 tarihinde almıştır [Airbus,2016]. Tablo 1.'de Airbus 320-200 uçaklarında kullanılan CFM56-5B6 ve A320-Neo uçaklarında kullanılan CFMLEAP-1A motor varyantlarının önemli teknik özellikleri yer almaktadır.

**Tablo 1.** Airbus A320-200 ve Airbus A320-Neo Uçaklarında Kullanılan Motorların Teknik Verileri [Kellari, 2014].

Parametreler	Uçak Tipi		Değişim %
	A320-200	A320-Neo	
Uçak Tipi	A320-200	A320-Neo	-
Motor Tipi	CFM56-5B6	CFMLEAP-1A	-
By-Pas Oranı (Bypass Ratio)	5.9	11	86.4
Güç (Thrust) [lbs]	23.500	24.500-32.900	4.3 - 40
Seyrüsefer SFC (Thrust-specific fuel consumption)	0.55	0.47	-14.6
Fan Çapı [m]	1.84	1.98	7.6

CFMLEAP-1A motoru ile donatılmış A320-Neo uçağının ticari havayolu taşımacılığı sektörüne dahil edilmesine benzer şekilde Boeing firması da eski versiyon CFM56-7B motorunun kullanıldığı Boeing 737-800-NG (737-NG) uçağından CFMLEAP-1B motorunun kullanıldığı Boeing 737-Max-8 uçaklarına geçiş yapmıştır. Tablo 2.'de Boeing 737-NG uçaklarında kullanılan CFM56-7B ve Boeing 737-Max-8 uçaklarında kullanılan CFMLEAP-1B motor varyantlarının önemli teknik özellikleri sunulmaktadır.

**Tablo 2.** Boeing 737-800-NG ve Boeing 737-Max-8 Uçaklarında Kullanılan Motorların Teknik Verileri [Kellari, 2014].

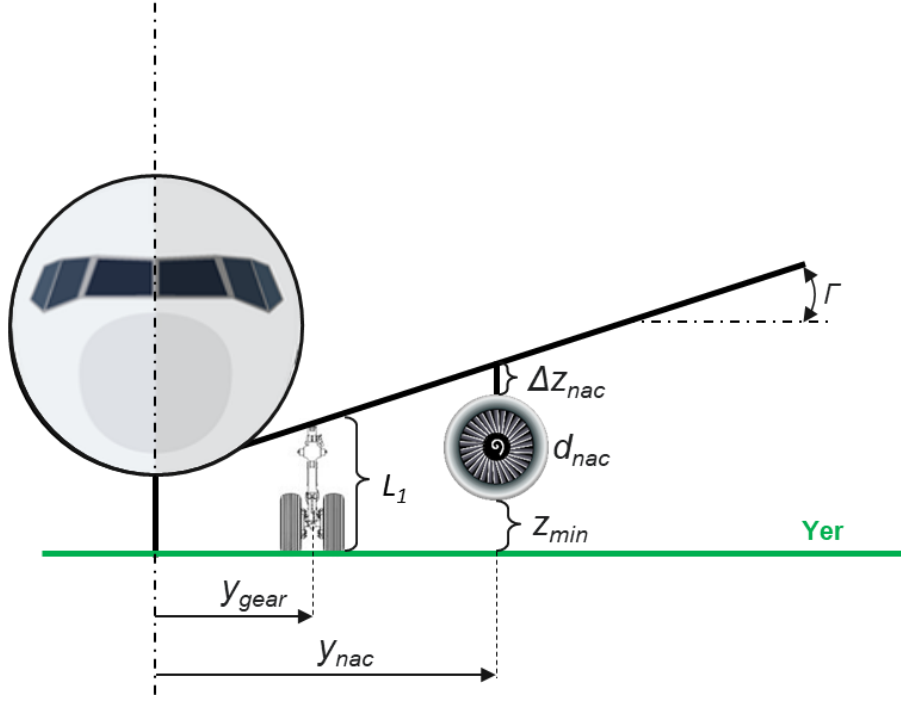
Parametreler	Uçak Tipi		Değişim %
	737-NG	737-Max-8	
Uçak Tipi	737-NG	737-Max-8	-
Motor Tipi	CFM56-7B	CFMLEAP-1B	-
By-Pas Oranı (Bypass Ratio)	5.1	9	76.5
Güç (Thrust) [lbs]	24.000	23.000-28.000	-4.2 –16.7
Seyrüsefer SFC (Thrust-specific fuel consumption)	0.60	0.51	-15.0
Fan Çapı [m]	1.55	1.76	13.6

Boeing tarafından gerçekleştirilen çalışma temelde bir motorun kanata sabitlenmesi amacıyla kullanılan tutucu pylon (Pylon) modifikasyonu olmakla beraber diğer bazı yapısal değişiklikler de yapılmış olup bunlar aşağıda yer almaktadır:

- Boeing 737-Max-8'in burun iniş takımının yerden yüksekliği Boeing 737-NG'den 20.32 cm (8 inç) daha uzundur.
- Boeing 737-Max-8'de yer alan kuyruk konisi, Boeing 737-NG'den yaklaşık 104.14 cm (41 inç) daha uzundur.
- Boeing 737-NG'de 6 adet 7.1 inç LCD ekran bulunmaktadır. Boeing 737-Max-8'de ise 4 adet 15.1 inç LCD bulunmaktadır.
- Boeing 737-NG'de kullanılan blended winglet yerine, Boeing 737-Max-8'de kullanılan Split Scimitar (Ayrık Arap Kılıcı) tip winglet kullanılmaktadır. Yeni tip wingletin %1.8 daha fazla yakıt tasarrufu sağladığı belirlenmiştir.
- Boeing 737 Max-8'de istemsiz burun kaldırma hareketine karşın uçağı perdöviteye girmekten kurtarmaya yarayan MCAS sistemi bulunmaktadır. Boeing 737-NG uçaklarından, Boeing 737-Max-8 uçağına geçiş sürecinde, motor fan çapının %13.6 oranında artmış olması sebebiyle, motorun kanat üzerindeki yerinin değiştirilmesi kararlaştırılmıştır. Daha sonra üzerinde detaylı açıklama yapılacağı üzere, motor tâtatinin artması ve motorun kanat üzerinde ileri ve yukarı doğru yerleştirilmesi kalkış ve tırmanış fazlarında Boeing 737-Max-8 uçağıнын istenmeyen burun kaldırma ( $\alpha+$ ) etkisini artırmıştır.

### UÇAK MOTOR HAZNESİ İLE MİNİMUM YER MESAFESİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Uçak motoru dış çerçevesi, hazne/nazel (Nacelle, engine pod, cowling) tabirleri ile ifade edilebilmektedir. Motor haznesi ile yer arasındaki mesafeyi belirlemek amacıyla kullanılan minimum yer mesafesi ( $z_{min}$ ) özellikle kalkış anında Ya-Ma-Ha riski açısından oldukça yüksek bir öneme sahiptir. Doğal olarak nazelin yere yakın olması özellikle kalkış öncesi koşu (roll), kalkış ve tırmanış safhaları için oldukça kritik bir öneme sahiptir. Şekil 3'de minimum yer mesafesi grafiksel olarak yer almaktadır.



Şekil 3. Minimum Yer Mesafesi ( $z_{min}$ ) [NASA,2009].

Eşitlik (1)'de verildiği üzere, ana iniş takımının bulunduğu istasyonun yerden bağlantı noktasına kadar ihtiyaç duyulan mesafe ve motor nazeli arasındaki bağlantı aşağıda sunulmaktadır.

$$L_1 = z_{min} + d_{nac} - ((y_{nac} - y_{gear}) \tan(\Gamma) - \Delta z_{nac}) \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de;

$L_1$  = Yerden Bağlantı Noktasına Kadar İhtiyaç Duyulan Mesafe (İniş Takımı Tam Yüklü-Compressed)

$\Delta z_{nac}$  = Motor Nazeli ile Kanat Arası Offset

$d_{nac}$  = Motor Nazel Dış Çapı

$y_{nac}$  = Doğrusal Boylam Ekseni ile Motor Arası Mesafe

$y_{gear}$  = Doğrusal Boylam Ekseni ile Ana İniş Takımı Mesafesi

$z_{min}$  = Minimum Yer Mesafesi

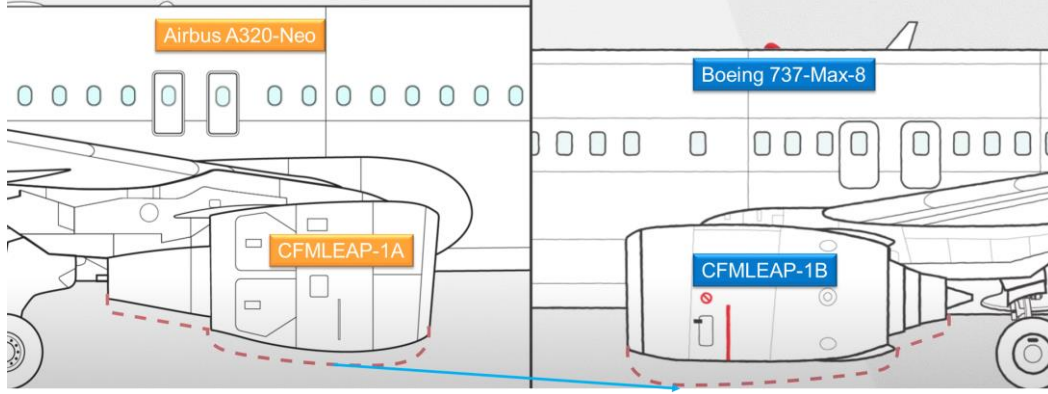
$\Gamma$  = Kanat Dihedral Açısı

olarak ifade edilmektedir. Eşitlik (1) kullanılarak Minimum Yer Mesafesi ( $z_{min}$ ) eşitlik (2)'de verildiği haliyle hesaplanabilmektedir.

$$z_{min} = L_1 - d_{nac} + ((y_{nac} - y_{gear}) \tan(\Gamma) - \Delta z_{nac}) \quad (2)$$

### A320 NEO VE BOEING 737-MAX-8 UÇAK TIPLERİNDE MİNİMUM YER MESAFESİ KİYASLAMASI

Şekil 4'te görüldüğü üzere Airbus firması A320-200 uçağından A320-Neo uçağına yeni motor tipi ile geçerken motorun kanat üzerindeki pylon bağlantısına yönelik dış geometride bir değişiklik yapmamıştır. Ancak Boeing 737-Max-8 uçağında motor kanat üzerinde ileri ve yukarı taşındığı halde hala yere daha yakın olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4. Airbus A320-Neo ile Boeing 737-Max-8 Arasındaki Yer Yüksekliği Farkı [Saraçyakupoğlu, 2020].

Şekil 5'te, motor fan çaplarına bağlı olarak Airbus A320-Neo ve Boeing 737-Max-8 uçaklarına ait  $z_{min}$  değerleri sunulmaktadır. Boeing uçaklarının geleneksel olarak Airbus uçaklarına göre yere daha yakın olması sebebiyle, CFM International firması tarafından üretilen CFMLEAP-1B motorunun fan çapının 176 cm olmasına rağmen, Boeing 737 Max-8 uçağına, üzerinde 198 cm fan çapına sahip A320-Neo uçağından hala daha düşük bir  $z_{min}$  değerine sahip olması dikkat çekicidir.



Uçak Tipi	CFMLEAP-1A Fan Çapı (cm)	Minimum Yer Mesafesi - $z_{min}$ (cm)
Airbus A320 Neo	198	46

Uçak Tipi	CFMLEAP-1B Fan Çapı (cm)	Minimum Yer Mesafesi - $z_{min}$ (cm)
Boeing 737 Max-8	176	43

Şekil 5. Airbus A320-Neo ile Boeing 737-Max8 Arasındaki Yer Yüksekliği Farkı [Saraçyakupoğlu, 2020; Kellari, 2016].

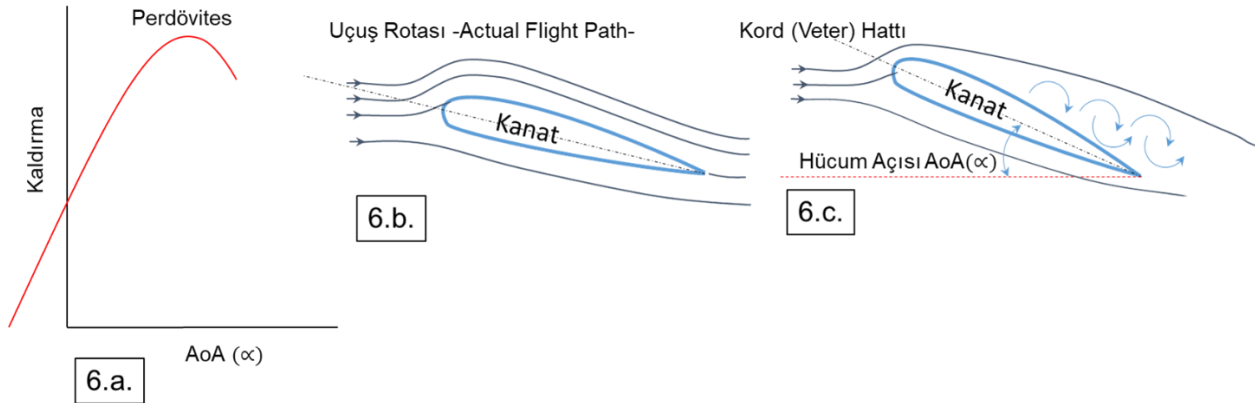
Sonuç itibarıyla, üzerinde MCAS sistemi olan ve  $z_{min}$  değeri 43 cm olan Boeing 737-Max-8 uçağı 08 Mart 2017 tarihinde FAA tarafından uçuşa elverişlilik testlerinden geçerek sörtifiye edilmiştir. Ardından 22 Mayıs 2017 tarihinde birinci Boeing 737-Max-8 uçağı Malezya'ya ait Malindo Air firmasına teslim edilmiştir.

## MOTORUN YER DEĞİŞTİRMESİNDEN SONRA MEYDANA GELEN POZİTİF DİKEY VEKTÖR ( $\alpha$ +) ARTIŞI

İlk teslimatın üzerinden fazla zaman geçmeden, 29 Ekim 2018 tarihinde, Endonezya Lion Air şirketine bağlı PK-LQP çağrı kodlu Boeing 737-Max-8 uçağı kalkıştan yaklaşık 13 dakika sonra Java Denizi'ne düşmüş ve 189 kişi hayatını kaybetmiştir. Aradan yaklaşık beş ay geçtikten sonra bu kez 10 Mart 2019 tarihinde Etiyopya havayollarına bağlı ET-AVJ çağrı kodlu bir Boeing 737-Max-8 uçağı kalkıştan yaklaşık 6 dakika sonra Etiyopya'nın Bishoftu bölgesinde düşmüştür. Uçaktaki 157 kişinin tamamı hayatını kaybetmiştir. Her iki kaza Birleşmiş Milletler'e bağlı olan Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (USHO, International Civil Aviation Organization-ICAO) tarafından havacılık tarihinin en dikkat çekici kazaları olarak değerlendirilmiştir [Sgobba, 2019]. Yapılan incelemelerde bir otomatik perdövites önleme sistemi olan MCAS'in söz konusu kazaların birincil nedeni olduğu belirlenmiştir [Craig, 2023].

### Dikey Vektörde Kararsızlık ve Havada Tutunamama (Perdövites / Stall):

Boeing 737-Max-8 uçaklarında meydana gelen MCAS problemine değinilmeden önce havada tutunamama konusunun açıklanması uygun olacaktır. Her uçağın tasarımına göre değişiklik gösteren bir havada tutunma sürati mevcuttur. Şekil 6.a.'da gösterildiği üzere kanadın oluşturduğu kaldırma kuvveti ile perdövites giriş tepe noktası arasında hücum açısına bağlı bir korelasyon bulunmaktadır. Şekil 6.b.'de düz uçuş sırasında kanadın alt ve üst kısmında hava filelerinin laminer akışı görülmektedir. Diğer taraftan, Şekil 6.c.'de görüldüğü üzere, perdövites ya uçağın süratinin düşmesi ya da kanadın hava akışına göre kritik hücum açısını (Angle of Attack-AoA) aşması durumunda söz konusu olmaktadır.



Şekil 6.a. Hücum Açısı ve Tutunamama Arasındaki Grafikselsel Değişim, 6.b. Düz Uçuş Şartlarında Kanat Üzerinde Hava Filelerinin Dolaşımı, 6.c. Yüksek Hücum Açısında Kanat Üst Yüzeyinde Türbülanslı Akış

Hücum açısının yaklaşık  $16^{\circ}$ - $18^{\circ}$  değerlerine ulaşması durumuna kritik hücum açısı adı verilmekte olup, hava araçları aynı kritik hücum açısı değerinde perdövites girmektedir. Birçok uçak tipinde pilotun müdahalesine gerek kalmadan perdövites girmeyi önleyici sistem bulunmaktadır [Babl, 2020]. Buna rağmen, uçuş emniyetini doğrudan etkileyen bir unsur olması sebebiyle, perdövites çıkış manevrası pilotaj eğitiminin hemen hemen her safhasında öğrenciye teorik olarak derslerde ve pratik olarak havada öğretilmektedir. FAA tarafından perdövites kurtulma manevrası sırasında yapılması gereken acil durum prosedürü Tablo 3.'te yer almaktadır.

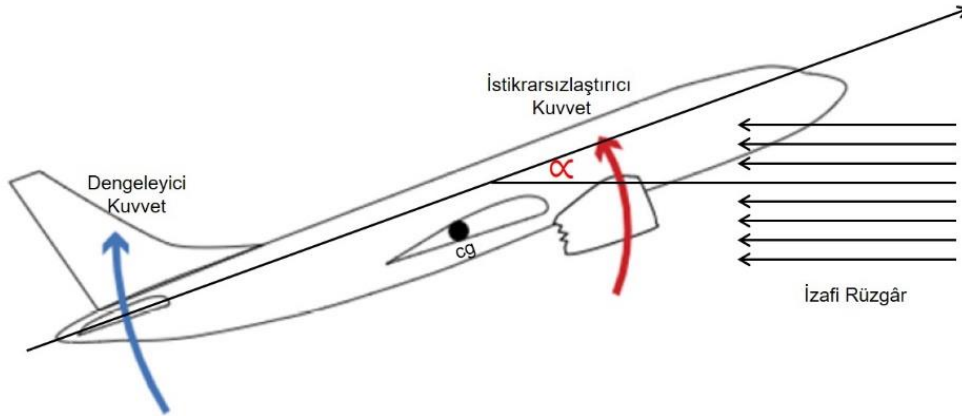
Tablo 3. Tutunamama / Perdövitesten Kurtulma Usulleri [FAA, 2009].

Tutunamama / Perdövitesten Kurtulma Usulleri	
Durum	Komut
1. Kanat düzenleyici ya da otopilot	1. Devreden çıkarınız.
2.a. Burun aşağı verme b. Burun açısını ayarlama	2.a. Tutunamama emareleri ortadan kalkıncaya kadar devam ediniz. b. İhtiyaç duyulduğu kadar yapınız.
3. Yatış açısı	3. Ufkî ve şâkulî uçuşa geçiniz.
4. Güç / Takat	4. İhtiyaç duyulduğu kadar gaz açınız.
5. Hız frenleri / bozucular	5. Kapalı duruma alınız.
6. Uçuş rotası	6. İhtiyaç duyulan rotaya dönünüz.

Perdövitesten kurtulmak için en kritik hareket tarzı hemen burun aşağı vererek irtifanın sürat dönüşümünü sağlamaktır. Sürat sayesinde uçuş kararlılığını yeniden kazanmak mümkün olabilecektir.

### PERDÖVİTESİ ÖNLEMEK İÇİN BOEING TARAFINDAN GELİŞTİRİLEN YÖNTEM

CFMLEAP-1B motorlarının Boeing 737-Max-8 uçaklarına monte edilmesi ile ortaya çıkan yere yakınlık sorununun çözümlenmesi için motorlarını kanat üzerinde ileri ve yukarı monte edilmesi uçaklarda istenmeyen dikey vektörde artış, yani tırmanış problemini de beraberinde getirmiştir [Spielman, 2020]. Diğer bir ifade ile pilot hiç müdahil olmadığı halde Boeing 737-Max-8 kritik hücum açısını geçecek şekilde boyutsal kararsızlık yatkınlığı göstermektedir. Daha önceden bahsedildiği üzere, Boeing firması bahse konu tehlikeli tırmanma sorununu çözmek için 737-Max-8 uçaklarına özgü MCAS yazılımsal yönetiminin hayata geçmesini sağlamıştır. MCAS, hücum açısı sensöründen kritik değere ulaşıldığı verisini aldığı anda perdövitesten kurtulmak için, Tablo 3.'te açıklanan adımlara uygun olarak Şekil 7.'de görüldüğü üzere, elevatör vasıtasıyla dengeleyici kuvvet uygulayarak uçağın burnunu aşağı vermektedir. Bu sayede perdövitesten kurtulmak amaçlanmıştır.



Şekil 7. Motor Pozisyon Değişikliğinden Kaynaklanan İstikrarsızlaştırıcı Kuvvet Karşılığında ve MCAS Vasıtasıyla Dengeleyici Kuvvet Uygulanması

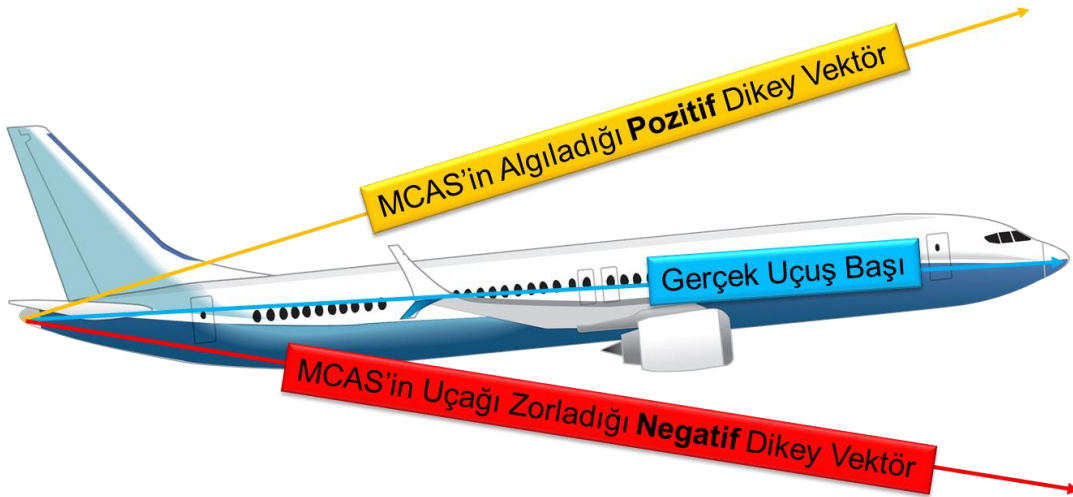
Şekil 8'de görüldüğü üzere, geleneksel olarak Boeing 737 uçaklarında kaptan ve yardımcı pilot taraflarında birer adet olmak üzere toplam iki adet hücum açısı sensörü bulunmaktadır.



Şekil 8. Boeing 737-Max-8 AoA Sensörleri Yerleşimi [Wendel, 2019]

MCAS sistemi bu sensörlerden birisinin kritik hücum açısı değerini geçmesi durumunda otomatik olarak devreye girmekte ve uçağı dalış pozisyonuna geçirmektedir. Bu problemin farkında olan Boeing mühendisleri hücum açısı sensörlerinin hata verdiği durumda yedek algılama sisteminin devreye girdiği bir tedbir geliştirmişlerdir. Ancak Boeing yöneticileri bu çözümün maliyetinin çok yüksek olmasını ve çok fazla pilotaj eğitimi gerektireceğini gerekçe göstererek söz konusu çözümü uygulamaya almamışlardır [Palmer, 2020].

Şekil 9'da görüldüğü üzere, Endonezya ve Etiyopya'da meydana gelen her iki kazanın Uçuş Veri Kaydedicisi (UVK, Flight Data Recorder-FDR) incelendiğinde, MCAS'ın aldığı kritik hücum açısı sinyalinden hemen sonra, uçağı dalış komutu verdiği gözlemlenmektedir. Oysa her iki kazada da hücum açısı sensörü yanlış veri üretmiş ve düz uçuştaki uçağı tırmanışta göstermiştir [KNKT, 2019; ECAA, 2019].



Şekil 9. Hatalı AOA Sensör Verisine Bağlı Olarak MCAS'ın Düz Uçuştaki Boeing 737-Max-8 Uçağını Dalışa Geçirmesi [Mersha, 2019]

İlave olarak, MCAS için pilotlara sadece 1 saatlik tablet üzerinden eğitim verilmesi nedeniyle pilotlar yaşadıkları problemin ne olduğunu anlayamamışlardır. Oysa araştırmalar göstermektedir ki, büyük modifikasyonlardan sonra pilotların simülatörler ile eğitilmesi kazaların önlenmesi için zaruridir [Bergstra,2020].



Sensörlerin hatalı veri üretmesi istenmeyen ama olası bir durumdur [Sturm, 2018]. Airbus bu sorunu çözmek için uçağın kaptan tarafına iki adet hücum açısı sensörü ve yardımcı pilot tarafına ise bir adet hücum açısı sensörü yerleştirmektedir. Bu sensör yerleştirme işlemi üçlü güvenilirlik (Triple Redundancy) olarak isimlendirilmektedir. Uçuş emniyeti açısından Airbus A320 uçağına ait Uçuş Mürettebatı Operasyonel El Kitabı'nda (Flight Crew Operational Manual-FCOM) "Yüksek hücum açısı koruması diğer korumaların hepsinden daha önemlidir." ifadesi yer almaktadır [Airbus, 2018]. Üçlü hücum açısı sensörü ile her an iki veri bir diğer veri ile karşılaştırılmakta ve en güvenilir veriye göre hareket edilmektedir. Bu sayede Airbus firması tarafından kullanılan hücum açısı sensör mimarisi ve algoritmasının uçuş emniyetini yükselttiği gözlemlenmektedir.

Boeing 737-Max-8 uçağının uçuş ve yer testleri süreçlerinde ilgili test birimleri istenmeyen burun kaldırma anomalisini ilgili birimlere ilemişlerdir. Ancak Atanmış Mühendislik Temsilcileri (AMT, Designated Engineering Representative-DER) olarak isimlendirilen ve FAA adına Boeing içerisinde görev yapan personel tarafından söz konusu anomaliler FAA'ye iletilmemiştir [Borfitz, 2020]. Burada DER personelinin maaş ve diğer özlük haklarının Boeing firması tarafından karşılanmasının etkili olduğu değerlendirilmektedir [FAA, 2017]. Çin havacılık otoritesi (Civil Aviation Administration of China-CAAC), COMAC tarafından üretilen ARJ21 uçağının üretim sürecinde DER benzeri bir uygulama olan Aday Atanmış Mühendislik Temsilcileri (AAMT, Candidate Designated Engineering Representatives-CDER) personeli sistemini uygulamıştır. Ancak söz konusu personelden sadece bazı dokümanların hazırlanmasını talep etmiş, böylelikle uçuş emniyetini doğrudan etkileyen süreçlere dâhil olmalarının önüne geçmiştir. CAAC, uçuşa elverişlilik süreçlerinde kendi kadrolu personelini doğrudan görevlendirmiştir [Yang, 2011]. Böylelikle personelin maaş gibi özlük hakları ile yerine getirmeleri gereken denetleme görevlerinin bir çıkar çatışmasına yola açmasının önüne geçmişlerdir.

## SONUÇ

Ardışık olarak meydana gelen ve toplam 346 kişinin hayatını kaybetmesine neden olan Boeing 737-Max-8 kazalarının incelenmesi sonucunda aşağıda yer alan hatalar zincirinin gerçekleştiği gözlemlenmektedir.

Boeing 737-Max-8 uçağının ufkî ve şakulî uçuşta iken tırmanma eğiliminin düzeltilmeye çalışılmasının sadece elevatör üzerinden bir yazılımla yapılmasının uygun olmadığı gözlemlenmektedir. CFMLEAP-1B motoru uyarlaması öncesinde, uçağın iniş takımları ile ana iniş takımı boylarının uzatılarak yerden yükseltilmesi ve Airbus A320-Neo geometrisine yakın bir geometriye getirilmesinin uygun olduğu değerlendirilmektedir.

İki hücum açısından birinin kritik değeri geçtiğinde MCAS devreye girmekte ve uçağı dikey vektörde negatif hareket yaptırmaktadır. Ancak uçak düz uçuşta iken alınan yanlış bir hücum açısı sinyali uçağın MCAS sistemi tarafından dalışa geçmesine neden olmaktadır. Oysa Airbus firmasının uyguladığı gibi üçlü güvenilirlik tabanlı bir sistem mimarisinin uçuş emniyeti sağlanması açısından daha etkili olacağı değerlendirilmektedir.

Boeing bünyesinde FAA adına görev yapan, DER personeli tarafından FAA'ye Boeing 737-Max-8'in uçuşa elverişlilik testi sürecinde ciddi bir sorun ile karşılaşıldığına dair bir rapor sunulmamıştır. DER personelinin maaş ve diğer özlük haklarının Boeing tarafından sağlanıyor olmasının bir çıkar çatışmasına neden olduğu değerlendirilmektedir. (Söz konusu DER sistemi kazalardan sonra değiştirilmiştir.)

MCAS ile ilgili olarak pilotlara sadece 1 saat tablet üzerinden eğitim verilmiştir. Oysa uçuş emniyetini etkileyen modifikasyonlardan sonra en azından detaylı simülasyon eğitimlerinin verilmesi gerekmektedir.

Sonuç itibarıyla ICAO tarafından havacılık tarihinin en dikkat çekici kazaları olarak belirlenen Boeing 737-Max-8 kazaları organizasyonel olarak birçok birimin içerisinde yer aldığı kazalar olarak karşımıza çıkmıştır. Söz konusu kazalara benzer olayların bir daha yaşanmaması için hava araçlarındaki yenilikçi sistemlerin titiz testlerden geçirilmesi ve maliyet-etkin yaklaşımdan ziyade maliyeti ne olursa olsun uçuş emniyeti odaklı çözümlerin hayat geçirilmesi gerekmektedir.

## Kaynaklar

- Airbus, 2016. A320neo with CFM LEAP-1A engines receives joint EASA and FAA Airworthiness Type Certification, Retrieved July, 4, 2024, <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2016-05-a320neo-with-cfm-leap-1a-engines-receives-joint-easa-and-faa>,
- Airbus. 2018. A318/A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual. Toulouse.
- Babl, M.L.D., Engelbrecht, J.A.A. (2020). Automatic Deep Stall Recovery using Optimal Trajectory Planning, IFAC-PapersOnLine, Volume 53 (2), 15508-15515, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2377>.
- Bergstra, J.A., Burgess, M., 2020. Candidate Software Process Flaws for the Boeing 737 Max MCAS Algorithm and Risks for a Proposed Upgrade. Cornell University Publications. Computer and Science, pp 9.
- Borfitz, M., 2020. What FAA Delegation Does—How And Why?, Retrieved January, 12, 2024 <https://static1.squarespace.com/static/624f3eabb91c684bb901f88e/t/62f3e5deba294c775359305c/1660151263105/FAAMA+Boeing+MAX737+A+SLOW+TRUTH.pdf>
- Centreforaviation Website. Global air travel growth faces limitation from slow aircraft deliveries, Retrieved January, 12, 2024, <https://centreforaviation.com/analysis/reports/global-air-travel-growth-faces-limitation-from-slow-aircraft-deliveries-669289>
- Chestnotes Website. Boeing Commercial Airplane Deliveries, Retrieved January, 12, 2024, <https://cheshnotes.com/boeing-commercial-airplane-deliveries/>
- Ethiopian Civil Aviation Authority (ECAA)., 2019. Aircraft Accident Investigation Bureau Interim Report. Interim Investigation Report. AI-01/16. Ministry of Transport. Ethiopia.
- Craig, P. 2023. Historical Research and the case for a Fifth Component of SMS, International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, Volume 10 (3), <https://doi.org/10.58940/2374-6793.1820>
- Federal Aviation Administration (FAA)., 2009. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge. Washington D.C. (USA): FAA, pp. 4-22.
- Federal Aviation Administration (FAA)., 2017. Designated Engineering Representative (DER) Handbook. Report No: 8110. 37 F. Federal Aviation Administration. Washington D.C.
- Kaur, P.S.2022. Study and comparison of different types of powered aircrafts for the future commercial aviation, Universitat Politècnica de Catalunya, Final Degree Project, Barcelona, Spain
- Kellari, D.2014. What's next for the airliner? Historical Analysis and Future Predictions of Aircraft Architecture and Performance, Massachusetts Institute of Technology, Master of Science Thesis, Boston, USA
- NASA.2009. Engine Concept Study for an Advanced Single-Aisle Transport, NASA/TM-2009-215784, USA.
- National Transportation Safety Committee (KNKT)., 2019. Aircraft Accident Investigation Report. Final Report. KNKT.18.10.35.04.Komite Nasional Keselamatan Transportasi. Indonesia.
- Mersha, B. W., Ma, H. (2022). Data-driven model for accommodation of faulty angle of attack sensor measurements in fixed winged aircraft, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 111, 104799, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104799>
- Palmer, C. 2020. The Boeing 737 Max Saga: Automating Failure, Engineering, Volume 6 (1), pp:2-3, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.11.002>
- Saraçyakupoğlu, T., 2020. Havacılıkta Organizasyonel Kazalar: B-737 Max Uçak Kazalarının Mühendislik Perspektifinden İncelenmesi. Mühendis ve Makine, Cilt. 61(701), s. 241-261, doi: 10.46399/muhendismakina.741842
- Sgobba, T., 2019. B-737 MAX and the Crach of the Regulatory System. Journal of Safety Engineering. 6(4), s. 299-303.
- Spielman, Z., Le Blanc, K., 2021. Boeing 737 MAX: Expectation of Human Capability in Highly Automated Systems. In: Zallio, M. (eds) Advances in Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems. AHFE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1210. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51758-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51758-8_9)
- Statista Website. Worldwide number of Airbus aircraft deliveries from 2002 to 2021, Retrieved January, 12, 2024, <https://www.statista.com/statistics/264493/airbus-worldwide-aircraft-deliveries/>
- Štourač, F. 2021. Current Trends in the Airline Industry. BRNO University of Technology. Bachelor's Thesis, Brno, Czech Republic
- Sturm, H., Dumstorff, G., Busche, P., Westermann, D., Lang, W., 2012. Boundary Layer Separation and Reattachment Detection on Airfoils by Thermal Flow Sensors. Sensors. 12. 14292-306. 10.3390/s121114292.
- Wendel, W. B. (2019). Technological Solutions to Human Error and How They Can Kill You: Understanding the Boeing 737-Max Products Liability Litigation, Journal of Air Law and Commerce. 84,3, 1-43.
- Yang, K., Cunxi, L., 2011. Comparison on the Ways of Airworthiness Management of Civil Aircraft Design Organization. Procedia Engineering, Vol., pp. 17.