

# EGEMEN

Tek motorlu bir SİHA turbofanı için üç-kanal yedekli (TMR) tam-yetki dijital motor kontrolü (FADEC) simülasyonu — kendini doğrulayan bir aviyonik test tezgâhı.

sürüm v29 · 2026-07 · tek dosya HTML · 50 ms deterministik çekirdek · 33/33 öz-test · TR/EN

Demir Akın · Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Koç Üniversitesi · Kale Jet Motorları stajyeri  
Emre Karausta ile (plant fiziği · sensör veri modelleme · 2003 uç-durum testi · UX) · Southampton Üniversitesi

canlı sim: [egemen-fadec.vercel.app](#) · vaka: [demir-akin-portfolio.vercel.app/#/egemen](#)

# İçindekiler

01 Yönetici özeti	4
02 Mimari ve temel disiplinler	5
2.1 Tek veri sözleşmesi	5
2.2 Determinizm ve tekrar oynatma	5
2.3 PACER - gerçek zaman temposu	5
2.4 Test dikişleri	5
03 Motor modeli ve yakıt sistemi	5
3.1 Spool'lar ve sıcaklıklar	5
3.2 Yakıt ve bingo	5
04 Kontrol yasası	6
4.1 İleri besleme + PI, anti-windup	6
4.2 Min-max limit seçici	6
4.3 Autothrottle	6
05 Yedeklilik ve FDIR	7
5.1 Kanallar, instance'lar, oylama	7
5.2 Gürültü blip'leri, debounce ve izolasyon latch'i	7
5.3 İki kalan: miscompare monitörü	7
5.4 OBM - analitik redundans	7
5.5 Reversiyoner kontrol, lider seçimi, overspeed	7
5.6 Degrade merdiveni, dürüstçe latch'li	7
06 Start sekansı	9
07 Otonom misyon (FAB)	9
08 Gözlemlenebilirlik	10
8.1 16-bit fault word	10
8.2 Mürettebat uyarısı ve raporlar	10
09 Kokpit rehberi	11
10 Doğrulama ve test disiplini	12
11 Denetimli bir evrim (v9 - v29)	12
12 Dürüst sınırlar	13

---

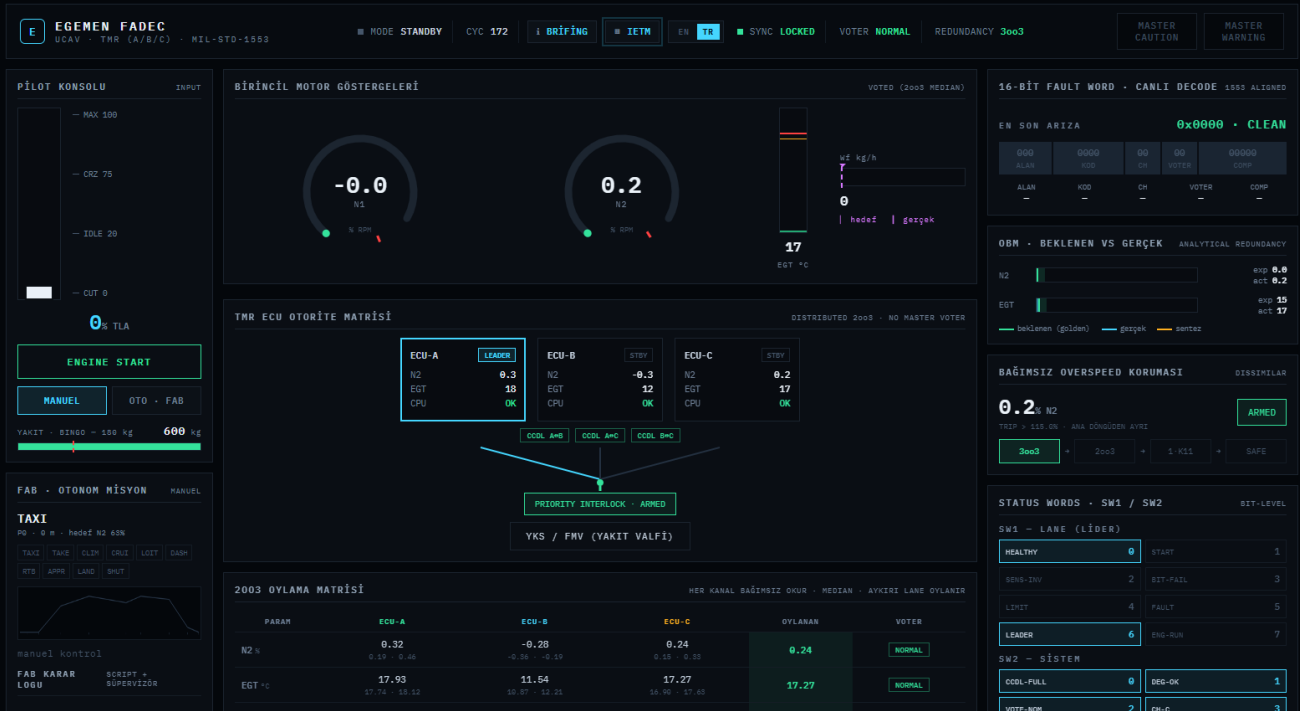
13 Künye ve bağlantılar . . . . .	13
-----------------------------------	----

## Yönetici özeti

EGEMEN, tek motorlu bir SİHA turbofanı için tam-yetki dijital motor kontrolünün (FADEC) tarayıcıda canlı çalışan bir simülasyonudur. Bir animasyon değildir. Deterministik 50 ms sabit-adımlı bir çekirdek; gerçek plant fiziğini, bingo mantıklı bir yakıt sistemini, üç-kanal duyumlama ile 2003 median oylamayı, autothrottle'lı min-max limit-seçici kontrol yasasını, analitik redundanslı arıza tespiti/izolasyonu/telifisini (FDIR), start-sekansını durum makinesini ve araç-seviyesi otonom görev süpervizörünü çalıştırır. Üstünde bir bakım ve gözlemlenebilirlik katmanı (16-bit fault word, kara kutu, interaktif kılavuz, uçuş raporları) yer alır.

Projenin ayırt edici özelliği test disiplini: sayfa, kendi üstünde koşturduğu 33 gömülü doğrulama testi taşıyor; tüm rastgelelik tek bir ana tohumdan türetilir, böylece her senaryo bit-birebir tekrar oynatılabilir; ve davranışın değişmemesi gereken her yerde, sürümler arası 2.400 çevrimlik yörüngeler bit bit karşılaştırılır — fizik, olaylar ve kara kutu. Proje tüzüğündeki hedef: bir arıza enjekte edildiğinde, sistemin tepkisinin doğruluğu ölçülebilir olmalı.

Özellik	Değer
Bicim	tek HTML dosyası, build adımı yok, harici bağımlılık yok, çevrimdışı çalışır
Çekirdek	50 ms sabit adım (20 Hz), deterministik, ana-tohumlu ayrı RNG akışları
Yedeklilik	3 kanal (A/B/C) x parametre başına 2 sensör instance; 2003 median; CCDL üstünde dağıtık voter
Yakıt	600 kg tank, BINGO 180 kg, Wf integrali, sızıntı enjeksiyonu, bingo->RTB + kalkış kapısı
Doğrulama	33 öz-test + ayırım kontrolü; determinizm hash 0xCFAD6CC2; sürüm-eşdeğerlik kanıtları
Diller	her yerde TR / EN, i18n öz-testiyle korunur (117/117)
Durum	v29 (2026-07); yayındaki demo projeyi izler



Şekil 1 - Soğuk panel, motor kapalı: oylanmış göstergeler dinlenmede, fault word TEMİZ, overspeed merdiveni 3003, uçak gücünde A kanalı lider seçilmiş – seçim bir damla yakıt akmadan bile çalışır (v25).

## Mimari ve temel disiplinler

### 2.1 Tek veri sözleşmesi

Merkezî fikir gösteriş değil, disiplindir: arayüz backend'i hiç tanımaz. Her çevrimde backend dünyayı bir adım ilerletir (realStep, her 50 ms) ve tek bir FADECState sözleşmesi yazar; render katmanı yalnızca o sözleşmeyi çizer. Render katmanını at, geriye deterministik, test edilebilir bir kontrol çekirdeği kalır — ilkesel olarak C firmware'e taşınabilir. Arayüz veri uyduramaz: ekrandaki, uçuş grafiğindeki ve .xlsx çıktısındaki her sayı aynı üreticiden gelir.

### 2.2 Determinizm ve tekrar oynatma

Tüm rastgelelik tek bir ana tohumdan, alt sistem başına ayrı akışla türer — sensör gürültüsü, blip'ler, arıza ajanı her biri kendi üreticiden çeker. Yeni bir özellik eklemek başka bir özelliğin gürültüsünü asla kaydıramaz; sürümler arası yörünge karşılaştırmasını mümkün kılan tam da budur. Determinizm öz-kontrolü referans bir koşuyu hash'ler; hash (0xCFAD6CC2) v23-v29 boyunca sabit kaldı. Bu rapordaki her arıza tatbikatı dahil, her senaryo tohumundan bit-birebir tekrar oynar.

### 2.3 PACER - gerçek zaman temposu

Tarayıcılar gizli sekmeleri yavaşlatır. PACER katmanı (v24) kaçan gerçek zamanı sınırlı telafi partileriyle (tick başına en çok 40 çevrim) kapatır, böylece bir misyon arka plan sekmesinde takvimini korur; görünürde davranış tam olarak tick başına bir çevrim kalır — kendi assertion'ıyla muhafızlı. Her şey çevrim-indeksli olduğundan tempo determinizmi ya da tekrar oynatmayı etkileyemez.

### 2.4 Test dikişleri

v17'de öğrenilip kural haline getirilen bir ders: kontrol matematiği ham çekirdek adımına karşı, kullanıcı yolları (paneller, start, güç-açma) sarmalanmış adıma karşı test edilir. Yanlış dikişi yoklayan bir test, kullanıcının gördüğü yol bozukken bile geçebilir — bu kural o arıza modunu yapısal olarak imkânsız kılar.

## Motor modeli ve yakıt sistemi

### 3.1 Spool'lar ve sıcaklıklar

Motor dinamiği, çevrim-güvertesi doğruluğundan çok inandırıcı davranış için ayarlanmış, kasıtlı basit topaklı birinci-derece modellerdir: yakıt-spool gecikmeleri  $\tau_{FMV}=0.25$  s,  $\tau_{N2}=1.3$  s,  $\tau_{N1}=3.5$  s; N1 aerodinamik olarak N2'yi izler ( $N1 = (N2-18) \times 1.15$ ), bu yüzden gaz atınca N2 önce, N1 ataletle sonra oturur. EGT iki-zaman-sabitli termal modeldir — hızlı yanma ( $\tau=1.5$  s) ile yavaş metal soak ( $\tau=60$  s) %85/%15 harmanlı — böylece sabit gazda bile sıcaklık hafifçe sürüklenir ve EGT limitleme dürüstçe test edilebilir.

### 3.2 Yakıt ve bingo

v28'den beri uçak, pilot konsolunda canlı göstergesi olan 600 kg'lık bir tank taşır. Yakıt Wf'nin integrali olarak yanar; iticiye geri-besleme yoktur (kasıtlı bir basitleştirme — plant sıfır yakıtta flameout'a karşı korumalıdır). BINGO eşiği (180 kg) üç bağımsız davranışı sürer: bir gösterge çizgisi, diğer her tetikle aynı 3-çevrim teyit desenini kullanan bir süpervizör BINGO-RTB tetiği ve bir kalkış kapısı — yakıt bingoda veya altındayken misyon başlatılamaz, NO-GO gerekçesi ekranda gösterilir. İkmal yalnız yeni uçuşta olur; bir bakım reset'i tankı sessizce doldurmaz.

Sabit	Değer	Sabit	Değer
$\tau_{FMV}$ / $\tau_{N2}$ / $\tau_{N1}$	0.25 / 1.3 / 3.5 s	WF_MAX / WF_MIN	2600 / 120 kg/h
N2_IDLE / N2_MAX	60 / 112 %	EGT limit bandı	900-950 C
N2 kısma bandı	108-112 %	Tank / BINGO	600 / 180 kg
EGT termal harman	85/15 hızlı/soak	Overspeed trip	> 115 % N2, latch'li

# Kontrol yasası

## 4.1 İleri besleme + PI, anti-windup

Yakıt komutu Wf, bir denge (ileri besleme) terimi ile bir PI trim'in (KP=22, KI=9) toplamıdır. İntegratör yalnız komut doymamışken integre eder — klasik anti-windup; böylece bir limitten çıkış, birikmiş integral yüzünden gecikmeden, anında olur.

## 4.2 Min-max limit seçici

Trim'in üstünde limitler yarışı: accel limiti, N2 limiti (108-112% arası lineer kısma) ve EGT limiti (900-950 C arası lineer kısma). Altta decel tabanı (denge yakıtının %55'i) ve WF\_MIN flameout-emniyet tabanı (120 kg/h) bulunur. O an hangi limit bağlıyorsa o kazanır ve kazanan limit her an arayüzde okunabilir. Bu tek bir PID değil — çok-limitli bir emniyet mimarisidir: koruma motoru asla flameout yakıtının altına indiremez ve her fizik sınırın kendi muhafızı vardır.

## 4.3 Autothrottle

Otonom uçuşta (v26) hedef N2 artık bacaklar arasında ışınlanmaz: sonlu bir kol hızıyla kayar — yukarı 7, aşağı 4, acilde 12 %N2/s — böylece kalkış 63'ten 100%'e yaklaşık 5,3 sn'de tırmanır ve shutdown gerçekçi bir throttle-chop olur. İrtifa da atlamak yerine 350 m/s ile rampalar. Devreye giriş bumpless'tir: kol o anki konumdan yürümeye başlar. Süpervizörün kararları gerektiği yerde anlık kalır (ACİL); yalnız fiziksel uygulandığı hız-sınırlıdır.



Şekil 2 - Manuel rölantri: N2 %60'ta tutuluyor, tüm kanallar sağlıklı, oylama NORMAL, OBM residual'ları sıfıra yapışık, yakıt 600 kg'da dolu.

## Yedeklilik ve FDIR

### 5.1 Kanallar, instance'lar, oylama

Üç kanalın (A/B/C) her biri her kritik parametreyi — N2, EGT, N1 — iki bağımsız sensör instance'ıyla, kendi küçük kalibrasyon offset'ile (epsilon'un çok altında) ve bağımsız gürültüyle okur. Parametre başına median-of-3 oylanır; median'dan epsilon'dan fazla sapan lane (N2: 2.5, EGT: 18, N1: 2.5) oydan çıkarılır. Merkezî bir voter yoktur — oylama kanallara dağıtılmıştır ve kanallar arası veri hattı (CCDL) üstünde yürür, böylece voter'ın kendisi de yedeklidir. Arızalar HARD (aralık-üstü, aralık-altı, sinyal-yok — sensör pill'i kırmızıya döner) ve SOFT (sapma, spike, gürültü, sürüklenme) olarak sınıflanır.

### 5.2 Gürültü blip'leri, debounce ve izolasyon latch'i

Gerçek dünya gürültülüdür; tezgâh bunu modeller: nadir seed'li tek-çevrimlik gürültü sıçramaları (F-BLIP, parametre başına çevrim başına ~0.002 olasılık, ~1.3 epsilon büyüklük) sistemin bir yerinde kabaca her 8 saniyede bir lane'leri sarsar. Bu yüzden kanal izolasyonu 3 ardışık teyitli çevrim ister (ISO\_DEBOUNCE) — blip kendiliğinden toparlanır, gerçekten sürüklenen kanal ise bakım reset'ine kadar oydan latch'lenir. Kayda değer iki bilinçli tasarım kararı: blip yine de kara kutuya dürüst tek-satırlık iz bırakır (forensik, kozmetikten önce gelir) ve sürekli arızalı tek bir instance tüm kanalını düşürebilir — arıza atfı, gerçek mimarideki gibi kanal seviyesinde kalır.

### 5.3 İki kalan: miscompare monitörü

Yedeklilik iki kanala düştüğünde çoğunluk oylaması artık dürüst değildir — iki voter'la suç atfedilemez. İkinci katman bir miscompare monitörü kalanları izler ( $|laneX - laneY| > 2 \text{ epsilon}$ ) ve annunciate eder, yalnız tespit. TMR'nin gerçek sınırı budur ve tezgâh aksini iddia etmeyi reddeder.

### 5.4 OBM - analitik redundans

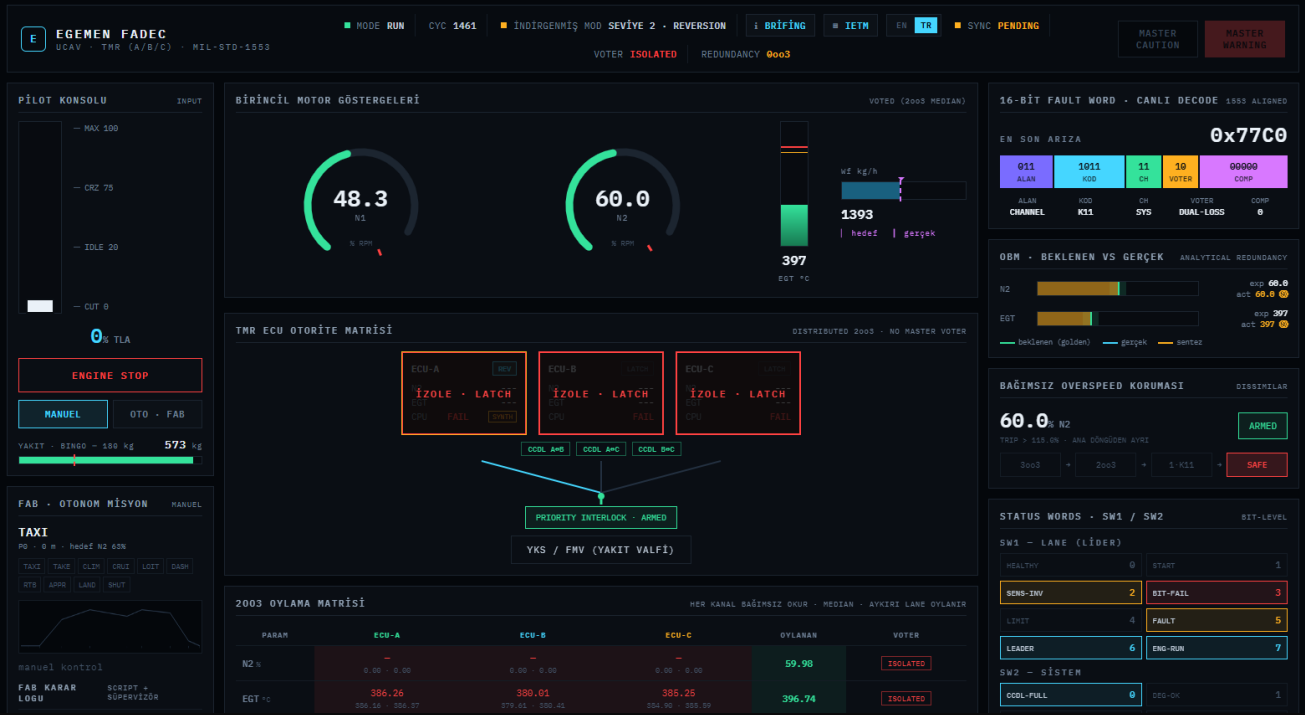
Paralel bir on-board model her çevrim beklenen N2 ve EGT üretir. Oylanan değer residual banttın (N2 +/-6, EGT +/-60) çıkarsa bir ortak-mod (common-mode) flag'i düşer — oylamanın yapısal olarak göremeyeceği arıza sınıfı, çünkü üç kanal da aynı yanlış değerde hemfikiridir. Flag mürettebat annunciator'ına ve kara kutuya yalnız RUN fazında ve standart 3-çevrim teyidinden sonra ulaşır (v22), böylece temiz bir motor start'ı bakım loguna artık sahte ortak-mod izi bırakmaz. Sağlıklı kanal sayısı bire düştüğünde OBM N2/EGT'yi sentezler ve kontrol model üzerinden sürer.

### 5.5 Reversiyoner kontrol, lider seçimi, overspeed

Kontrol yetkisi sensör sağlığıyla değil, CPU canlılığıyla kapalıdır: sensörlerini kaybetmiş ama hâlâ hesaplayan bir lane, OBM-sentez değerler üzerinden yakıt komutlamaya devam eder — SYNTH rozetleriyle annunciate edilen REVERSIYONER mod. Lider seçimi önce tam-sağlıklı kanalı, yoksa CPU'su canlı herhangi birini tercih eder; 0,3 sn'lik tutma chatter'ı önler ve devretme bumpless'tir. v25'ten beri seçim motor kapalıyken de çalışır — gerçek ECU'lar uçak gücünde tahkim yapar ve bir kullanıcı testi tezgâhın bunu yapmadığını yakaladı. Tüm bunlardan tamamen ayrı, dissimilar bir overspeed koruması ham N2 %115'in üstünde latch'li yakıt kesimi yapar: ana yasa bozulduğunda en çok gereken koruma, ona bağlı olmamalıdır.

### 5.6 Degrade merdiveni, dürüstçe latch'li

Sistem yedekliliği bir merdiven iner: 3oo3, 2oo3, tek-kanal (K11), SAFE. İNDİRGENMİŞ mod chip'i yalnız teyitli degradasyonda latch'lenir (3 ardışık çevrim, yalnız RUN fazı) — v15'te ilk denenen naif max-hold her kalkışı kalıcı %85 derate'e donduruyordu; tezgâhın kendi testlerinin yakaladığı ve sürüm raporunda belgelenen bir bug. Geçici olaylar iz bırakmaz; gerçek degradasyon bakım reset'ine kadar görünür kalır.



Şekil 3 - Tam sensör kaybı tatbikatı (manuel mod): üç kanal da İZOLE+LATCH, yedeklilik 0003, fault word 0x77C0 = K11 SYS DUAL-LOSS, MASTER WARNING yanık, overspeed merdiveni SAFE'te – ve motor hâlâ hedefini saf model-tabanlı (REV+SYNTH) kontrolle tutuyor.

## Start sekansı

Start, eşik-uydurma değil gerçek bir durum makinesidir: OFF - CRANK (kuru çevirme, yakıt yok; N2 >= 18'de ateşleme) - LIGHT-OFF - ACCEL (starter %50'de kesilir) - RUN (rölanti %58, kontrol yasası devralır). İki abort yolu modellenmiştir: HUNG (rölanti üstüne 2 sn'den fazla tırmanamama) ve HOT (start EGT'si 720 C üstü).

v17'de belgelenen ince bir bug hikâyesinin parçasıdır: motor kapalıyken kurulan arıza enjeksiyonları, start anındaki oto-reset tarafından sessizce siliniyordu, dolayısıyla enjektörün "ARMED - SONRAKİ START'TA" sözü bir yalandı. Düzeltme (güç kenarında sakla-geri-yaz) kendi assertion'ı ve bit-birebir tekrar oynatma kanıtıyla geldi — ve bug sınıfı (yanlış dikiş testi) kalıcı bir proje kuralı oldu.

## Otonom misyon (FAB)

Uçuş Bilgisayarı — kasıtlı FADEC'in dışında — sağlık okur ve 10 bacaklı bir misyon script'i boyunca hedef N2 üretir (TAXI, TAKEOFF, CLIMB, CRUISE, LOITER, DASH, RTB, APPROACH, LAND, SHUTDOWN; yaklaşık 241 sn duvar zamanı). Karar önceliği net ve mutlak: ACİL > RTB > DERATE > SCRIPT — uçuş planı motorun o anki durumunu asla ezemez.

Tetikler her yerde kullanılan aynı 3-çevrim teyidiyle gürültüye bağışiktır (v19: 20 koşuluk seed'li bir sonda sahte RTB latch'lerini 2/20'den 0/20'ye indirdi, tespit süresi 137. çevrimde değişmedi); derate histeresizle temizlenir; ACİL bilinçli olarak teyitsiz kalır — anlaktır ve bir assertion'la muhafızlanır, böylece yanlışlıkla debounce kazanamaz. MISSION NO-GO kapısı, motor zaten tek sağlıklı kanala düşmüşse veya yakıt bingoyrsa engage'i doğrudan reddeder — ve gerekçesini ekranda gösterir. Uçuş sırasında yakıt BINGO'yu geçince RTB latch'lenir. v29'dan beri misyon paneli gerçek bir geçen-süre saati ve uçağın anlık konumunu gösteren bir irtifa profili taşır; RTB latch'lenince bir REPLAN hattı kalan rotayı mevcut noktadan amber çizer. Her karar, bacak ve gerekçesiyle denetlenebilir bir logda durur.



Şekil 4 - Otonom CLIMB bacağı (P3, 8.000 m, hedef N2 %96): realizm-modu arıza ajanı A kanalına mal olmuş (İZOLE LATCH), liderlik B'ye bumpless geçmiş, süpervizör DERATE 88 + İNDİRGENMİŞ MOD SEVİYE 1 tutuyor – autothrottle ise kol üzerinden tırmanmayı sürdürüyor (TLA %70). Sol altta: BINGO çizgili yakıt göstergesi (v28) ve canlı konumlu misyon profili (v29).

## Gözlemlenebilirlik

### 8.1 16-bit fault word

Arızalar bit-paketli bir kelimedede taşınır — [ALAN:3 | KOD:4 | CH:2 | VOTER:2 | COMP:5] — 1553-hızalı çerçevelenmeyle. Canlı bir çözücü en son kelimeyi alanlarına ayırıp gösterir; aynı format (dedup ile) PFR/CMC bakım loguna, yani kara kutuya latch'lenir. Tek bir paketli kelime hatayı, kanalı, voter kararını ve bileşeni tek frame'de taşır — sonradan eklenmiş değil, tasarlanmış gözlemlenebilirlik.

Kod	Anlamı
K02	kanal izole (lane oydan çıktı; geçici bir blip'in dürüst izi de budur)
K03	lider devretme
K05	CCDL bağlantı kaybı
K07	degrade / ortak-mod (OBM residual banttan çıktı; yalnız RUN + teyitli)
K10	iki kanalda beraberlik-bozma (tie-break)
K11	tek-kanal / çift-kayıp (v17'den beri 3-çevrim teyidi ister)

### 8.2 Mürettebat uyarısı ve raporlar

Master Caution nedenlerini sayar ve neden bazında acknowledge edilebilir (v22): lambaya tıkla, söner; yeni bir neden yeniden yakar. SW1/SW2 durum kelimeleri lane ve sistem durumunu bit seviyesinde açar. IETM — interaktif elektronik teknik kılavuz — herhangi bir göstergelyi tıklayınca o anki duruma dayalı canlı bir "neden" ile açıklar. Uçuş verisi .xlsx'e aktarılır (özet, zaman serisi, arızalar ve parametre başına arıza-darbe sütunları, hepsi uygulama-içi grafiği de çizen tek üreticiden); grafik, en yakın örnekteki tam değerleri okuyan bir kenetli imleç taşır.

The screenshot displays the FADEC simulation interface. On the left, the 'ARIZA ENJEKTÖRÜ - FDIA' (Fault Injection) panel is active, showing a table of injected faults. The 'N2' sensor is selected, with a 'SO4 spike - SOFT' type and a 'Zorla: Overspeed' condition. Below this, a grid of 'SENARYOLAR - TEK TIK' (Fault Scenarios) is visible, including 'Nominal', 'Çift izolasyon', 'Tam kayıp', 'Tek-kanal', and 'OBM gökğüşü'. On the right, the 'PFR / CMC - BAKIM LOGU (KARA KUTU)' (PFR/CMC Maintenance Log) is shown, displaying a list of fault events with their corresponding codes and descriptions, such as '0x0202 SENSOR - S-SIGNAL - CH=A - NORMAL - COMP=2' and '0x6402 CHANNEL - K02 ISOLATED - CH=A - ISOLATED - COMP=2'. The bottom of the interface shows the 'EGEMEN V13 - TEST TEZGAHI + UÇUŞ RAPORU' (EGEMEN V13 - TEST BENCH + FLIGHT REPORT) section, with buttons for 'SELF-TEST', 'UÇUŞ RAPORU', and 'TEKRAR OYNAT'.

MİNİAR: Arayüz tek bir FADECState veri sözleşmesini okur; render katmanı backend'den tamamen bağımsızdır. Backend her 50 ms'de bir cycle döner, sonucu FADECState'e yazar — arayüz yalnızca onu çizer. Backend = plant model (MFSpool, bağımsız N3/N2, EGT 2-zaman termal) + min-max limit seçici kontrol yasası + 2003 oylama/sağlık + OBM analitik redundans + FDIA. Tüm arıza tespiti, oylama ve semiz gerçek: PFR kara kutusu backend'in ürettiği 16-bit fault word'leri latch'ler.

EKİP KÜNYESİ • BUILD CREW

KISAYOL: 1-9,0 senaryo - S start/stop - R rapor - T self-test - L dil - Esc kapat

EGEMEN v9 - versiyon 10 - 50 Hz

Şekil 5 - Arıza enjektörü (sensör/kanal/tip/büyükölçüm artı tek-tık senaryolar) ve kara kutu: üç K02 kanal izolasyonu bir K11 SYS DUAL-LOSS kaydına dönüşüyor — Şekil 3'ün forensik izi.

## Kokpit rehberi

Arayüz bir cam-kokpit (EICAS/ECAM) sayfasıdır: gaz kolu ve yakıt göstergeli pilot konsolu, oylanmış ana göstergeler, TMR yetki matrisi, 2003 oylama matrisi, lane başına sensör pill'leri, fault-word çözücüsü, OBM residual çubukları, overspeed monitörü, durum kelimeleri, Master Caution, arıza enjektörü, profil ve karar loglu otonom-misyon paneli ve PFR/CMC logu. Her renk bir durum kodudur.

Kontrol	Etki
1-9, 0 tuşları	tek-tık arıza senaryoları (Nominal, Yarı-kör, Çift izolasyon, Lider devretme, Tam kayıp, Açık-döngü, Tek-kanal)
S / R / T / L / Esc	start-stop / uçuş raporu / öz-test / dil / kapat - her kısayol tıklamayla aynı kod yolunu sürer, tekrar kayı
IETM modu	herhangi bir göstergeye tıkla: tanımı + canlı neden-analizi
Önerilen tatbikat	motoru çalıştır, bir kanala N2 sürüklenmesi enjekte et, 3-çevrim izolasyonu izle, kara kutuda K02 kaydını ol

The screenshot displays a cockpit test interface with several status indicators and control buttons. The indicators include:

- Tam kayıp** (Full Loss): N2 üç kanalı + OBM sentez + SAFE
- Tek-kanal** (Single Channel): Aşağıdaki + C - K11
- OBM yığılma** (OBM Accumulation): 0x11B-28-00-00-00-00
- Açık-çevrim** (Open Loop): N2 kayıp + OBM çöküşü
- Common-mode** (Common-mode): 3 kanalı + OBM yığılma
- CCOL Nes** (CCOL Nes): 0x0-0000-000

The interface also features a control panel with buttons for **SELF-TEST**, **UÇUŞ RAPORU**, **.xlsx**, **HTML RAPOR**, and **TEKRAR OYNAT**. The **AGENT YOĞUNLUĞU KURTARMA** dropdown is set to **orta** and **açık**. The **DETERMINİZM** dropdown is set to **OK 0xCFAD6CC2**. The **KAPSAM** dropdown is set to **0x11B-28-00-00-00-00**.

The interface also displays a **MİMARİ** section with the following text:

MİMARİ: Arayüz tek bir FADECState veri sözleşmesini okur; vander katmanı backend'den tamamen bağımsızdır. Backend her 50 ms'de bir cycle ilerletir, sonucu FADECState'e yazar - arayüz yalnızca onu çizer. Backend = plant modeli (KFs-pool, bağımsız N1/N2, EGT 2-zaman terminal) + min-max limit seçici kontrol yasası + 2003 oylama/maçlık + OBM analitik redundans + FDIA. Tüm arıza tespiti, oylama ve sentez gerçek; PFR kara kutusu backend'in ürettiği 16-bit fault word'leri latoh'ler.

KISAYOL: 1-9,0 senaryo - S start/stop - R rapor - T self-test - L dil - Esc kapat

The interface also displays a **EKİP KÜNYESİ** section with the following information:

**DEMİR AKIN**  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği - 3. sınıf  
KOÇ ÜNİVERSİTESİ

ODAK: FADEC - kontrol yasası - 2003 redundans  
ALAN: Jet motoru kontrol sistemleri - gömülü  
STAJ: Kale Jet Motorları

**EMRE KARAUSTA**  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği - 2. sınıf  
UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON

ODAK: Plant fiziği - sensör verisi modelleme  
KATKI: 2003 edge-case testi - UX optimizasyonu  
STAJ: Kale Jet Motorları

The interface also displays a **SEED 0x4506** and **EGEMEN v13 - TEST TEZGAHI + UÇUŞ RAPORU** header.

Şekil 6 - Test tezgâhi şeridi: ÖZ-TEST, uçuş raporu (.xlsx / HTML), TEKRAR, ajan yoğunluğu – ve OK 0xCFAD6CC2 okuyan determinizm rozeti. Altında: mimari özeti, klavye haritası ve künye.

## Doğrulama ve test disiplini

Mekanizma	Neyi kanıtlar
33-assertion öz-test	oylama, latch, süpervizör, autothrottle, yakıt, misyon saati - her biri testin gerçekten kalabildiğini
Deterministik tekrar	aynı tohum, aynı koşu; determinizm hash'i sürümler arası sabit (0xCFAD6CC2, v23-v29)
Eşdeğerlik kanıtları	davranış donuk kalmalıysa sürümler arası 2.400 çevrimlik yörüngeler bit bit karşılaştırılır - fizik, o
Hedefli sondalar	20 seed'li süpervizör koşusu: sahte RTB 2/20 -> 0/20, tespit 137. çevrimde değişmedi
Otonom arıza ajanı	denetim modu her senaryoyu PASS/FAIL'e sürer; realizm modu yalnız otonom uçuşta seed'li MTBF arızası e
Davranış rehberi	yazılı bir bug-vs-tasarım rehberi: gözlemcinin ne beklemesi gerektiği (blip izleri, K02 kayıtları, REV
Süreç	her sürüm yazılı spec ve raporlu yeni bir dosya; beklenen test değerleri testi geçirmek için asla düze

## Denetimli bir evrim (v9 - v29)

Sür.	Kilometre taşı
v12	bağımsız denetim temeli; bulgular yol haritası olur
v13	deterministik çekirdek, bit-birebir tekrar, uçuş oto-reset
v14-15	debounce'lu izolasyon latch'i; teyitli degrade tutuşu (naif sürüm kalkışları %85'te donduruyordu - yakalandı ve belg
v16	dürüst annunciator'lar; assertion-kapsam kuralı
v17	yerde kurulan enjeksiyonlar start oto-reset'ini atlatır; K11 debounce; test-dikiş kuralı doğru
v19-20	gürültüye bağışık süpervizör (0/20 sahte RTB); MISSION NO-GO; misyon temposu; ajan MTBF
v21-22	arıza-darbe analitiği; ajan kurtarma toggle'ı; K07 start kapısı; acknowledge'lı Master Caution
v23-24	render kapısı (öz-test 3,1 -> 1,26 s), 375 px mobil, klavye, erişilebilirlik; PACER; grafik imleci
v25	motor kapalıyken lider seçimi (kullanıcı bulgusu)
v26-27	FAB autothrottle (sonlu kol, irtifa rampaları, bumpless, soğuk-start fixi); bağlantı hijyeni
v28	yakıt sistemi: 600 kg tank, BINGO 180 kg, sızıntı enjeksiyonu, bingo->RTB, kalkış kapısı, misyon profili
v29	gerçek misyon saati; RTB latch'inde REPLAN hattı; süreklilik muhafız assertion'ı

## Dürüst sınırlar

Güvenilirlik kısmen neyin modellenmediğini söylemekten gelir:

- › Aerodinamik ve termodinamik kasıtlı basitleştirilmiş topaklı birinci-derece modeller - gerçek bir çevrim güvertesi değil. N1, N2'nin cebirsel fonksiyonu; EGT iki-gecikmeli sezgisel.
- › Sabitler illüstratif ve elle ayarlı, gerçek bir motordan türetilmedi.
- › Yakıt miktarı iticiye geri-beslenmez ve sıfır yakıt motoru söndürmez - korumalı, bilinçli bir basitleştirme.
- › MIL-STD-1553 stilize/hızlı, fiili bir bus implementasyonu değil; buradaki hiçbir şey sertifikalı değil.
- › Gösterim amaçlı bir tarayıcı simülasyonu: uçuş kodu değil, hard-real-time değil.
- › Tek motor, tek fault-word formatı, tek sabit ana tohum.

## Künye ve bağlantılar

Demir Akın - FADEC, kontrol yasası, 2003 yedeklilik - Koç Üniversitesi EEE, Kale Jet Motorları stajyeri  
Emre Karausta - plant fiziği, sensör veri modelleme, 2003 uç-durum testi, UX - Southampton Üniversitesi EEE

Canlı simülatör: [egemen-fadec.vercel.app](https://egemen-fadec.vercel.app)

Vaka çalışması: [demir-akin-portfolio.vercel.app/#/egemen](https://demir-akin-portfolio.vercel.app/#/egemen)

İletişim: [demirakin.tr@gmail.com](mailto:demirakin.tr@gmail.com)

Bu rapor v29'u yalnızca projenin kendi olgularıyla (sürüm raporları, spec'ler ve davranış rehberi) anlatır. Şekiller çalışan simülatörün ekran görüntüleridir. Standart uyumu iddia edilmez.