



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Uydu ekipman tasarımında yeni bir hibrit hata türü etkileri ve kritiklik analizi (HTEKA) yaklaşımı

*A new hybrid failure modes, effects and criticality analysis (FMECA) approach to be used in satellite equipment design*

*Yazar(lar) (Author(s)): Nazım YAMAN<sup>1</sup>, Mustafa BURUNKAYA<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2488-5395*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-3971-0590*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yaman N. ve Burunkaya M., “Uydu ekipman tasarımında yeni bir hibrit hata türü etkileri ve kritiklik analizi (HTEKA) yaklaşımı”, *Politeknik Dergisi*, 24(2): 733-743, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.851661

# Uydu Ekipman Tasarımında Yeni Bir Hibrit Hata Türü Etkileri ve Kritiklik Analizi (HTEKA) Yaklaşımı

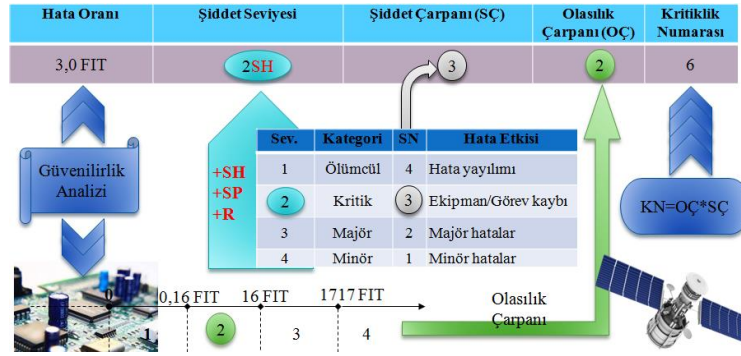
## A New Hybrid Failure Modes, Effects And Criticality Analysis (FMECA) Approach To Be Used In Satellite Equipment Design

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Tasarımın hem fonksiyonel hem de donanımsal özelliklerini taşıyan hibrit bir yaklaşım önerilmiştir. / A new hybrid approach that has the functional and hardware features of the design is proposed.
- ❖ Komponent hata oranına dayanan hata türü kritikliği belirleyebilme kabiliyeti kazandırılmıştır. / The ability to determine the criticality of failure mode based on component failure rate is gained.
- ❖ Kart arayüzleri ile hata türü ilişkilendirilerek hata tespit kabiliyeti artırılmıştır. / The failure detection capability is enhanced by correlating the failure mode thanks to the card interfaces.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, uzay aracı ekipman geliştirme projelerine yönelik yeni bir HTEKA yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen hibrit HTEKA, uydu Güç Kontrol Birimi(GKB) tasarımına uygulanmıştır. / In this study, a new FMECA approach is proposed to support the design of spacecraft equipment. The proposed hybrid FMECA is implemented in the satellite Power Control Unit(PCU).



Şekil. Uydu Ekipmanı Hibrit HTEKA /Figure. Hybrid FMECA for Satellite Equipment

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı GKB üzerinden örnek bir çalışma yaparak, gerekli yöntem ve teknikleri ile yeni bir hibrit HTEKA yaklaşımı ortaya koymaktır. / The aim of this study is to present a new hybrid FMECA approach by performing a case study on the PCU, with required methods and techniques.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Komponent hata oranları MIL-HDBK-217FN2 modeline göre PTC WQS 11.0 programı ile hesaplanmıştır. / Component failure rates are calculated according to MIL-HDBK-217FN2 model using PTC WQS 11.0 program.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada yeni bir yaklaşım olan hibrit HTEKA verilmiştir. / This study gives the hybrid FMECA which is a new approach.

### Bulgular (Findings)

Uzay ortam şartlarına dayanıklı uzay aracı ekipmanı geliştirme projelerinde kullanılabilecek yeni bir hibrit HTEKA yaklaşımı bulunmuştur. / A new hybrid FMECA approach applicable for space project is obtained to develop equipment that has high reliability in space environment conditions.

### Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma kapsamında çözümlüğü ayarlanabilen, öznelikten arındırılmış, fonksiyonel, donanımsal ve arayüz özelliklerine sahip bir hibrit HTEKA önerilmiş ve örnek bir uygulama ile başarılı sonuçlar elde edildiği kanıtlanmıştır. Within the scope of this study, free from subjectivity FMECA, which has functional, hardware and interface features with adjustable resolution, is proposed and its accomplishment is proven by a case study.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Uydu Ekipman Tasarımında Yeni Bir Hibrit Hata Türü Etkileri ve Kritiklik Analizi (HTEKA) Yaklaşımı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Nazım YAMAN<sup>1</sup>, Mustafa BURUNKAYA<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Türk Havacılık ve Uzay Sanayi / Uzay Sistemleri / Ankara / Türkiye

<sup>2</sup> Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.01.2021 ; Kabul/Accepted : 29.01.2021)

## ÖZ

Uzay donanım geliştirme projelerinde, zorlu çevre koşulları, radyasyon etkileri ve bakım yapılabilme zorlukları güvenilirliği ilk sıraya taşımaktadır. Lakin düşük güvenilirlikli ekipmanlar görev ömrünü tamamlayamadan arızalanıp uydunun kaybına sebep olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için geliştirme fazında güvenilirlik tahmini, parça stres azaltma, en kötü durum, Hata Türü Etkileri ve Kritiklik Analizi (HTEKA) gibi analizler Avrupa Uzay Standardizasyon İşbirliği kapsamında çıkartılan rehber dokümanlara göre yapılmaktadır. Rehber dokümanı ECSS-Q-ST-30-02C olan HTEKA, olası hataların belirlenip değerlendirildiği en kapsamlı güvenilirlik analizidir. Bu çalışmanın amacı yeni bir yaklaşım olan hibrit HTEKA sürecini ortaya koymak, görev kritik ekipman olan Uydu Güç Kontrol Birimi (GKB) örneği üzerinde sonuçlarını göstermektir. GKB güneş panellerinden aldığı enerjiyi koşullandırıp pil şarj/deşarj işlemlerini gerçekleştirerek uydu ekipmanlarına güç sağlamaktadır. HTEKA'da hata türleri detaylıca belirlenmez, gerçekleşme olasılığı hassas hesaplanmazsa uydu görevi kaybedilir. Bunu sağlamak için ekipmanın elektronik kartları donanımsal bloklara ayrılmış ve hata türleri bu donanımsal blokların fonksiyonları üzerinden üretilmiştir. Güvenilirlik analizinden gelen hata oranları, önce elektronik kartlara ardından küçük donanımsal bloklara dağıtılarak hata türlerinin gerçekleşme olasılıkları daha hassas hesaplanmıştır. Sonuç olarak GKB'nin bir elektronik kartı üzerinden hibrit HTEKA yapılarak hata türleri incelenmiş ve kritikliği değerlendirilmiştir. Böylelikle olası tüm hata türleri incelenip, kritiklikleri doğru tespit edilerek ekipman hatasından dolayı uydunun kaybedilme ihtimali en aza indirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Hata türü etkileri ve kritiklik analizi, uydu güç kontrol birimi, güvenilirlik analizi, ECSS-Q-ST-30-02C standardı, hibrit HTEKA yaklaşımı.

## A New Hybrid Failure Modes, Effects And Criticality Analysis (FMECA) Approach To Be Used In Satellite Equipment Design

### ABSTRACT

In space hardware development projects, reliability is at the forefront because of environmental conditions, radiation effects and maintenance difficulty. However, low reliability equipment fails and causes satellite loss before completing service life. To eliminate this problem, analyses such as reliability prediction, derating, worst case, Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA), at development phase are conducted according to European Space Standardization Cooperation guidance documents. FMECA guided in ECSS-Q-ST-30-02C is the most comprehensive reliability analyses in which potential failures are identified and evaluated. The aim of this study is to introduce a new hybrid FMECA approach by presenting a case study on Power Control Unit (PCU) which is mission critical satellite equipment. PCU performs battery charge/discharge processes and provides power to satellite equipment by conditioning energy from solar panels. If failure modes in FMECA aren't determined in detail and probability of occurrence isn't calculated precisely, satellite mission can be lost. Hence, equipment's electronic boards are divided into hardware blocks and their functions determine failure modes. Failure rates taken from reliability prediction analysis are distributed to electronic boards and small hardware blocks respectively, thus failure modes' probabilities could be calculated more precisely. Consequently failure modes are analyzed; criticalities are evaluated by performing hybrid FMECA for PCU electronic boards. Hereby, all possible failure modes are examined and their criticality is correctly determined, and possibility of satellite loss result from equipment failure is minimized.

**Keywords:** Failure modes effects and criticality analysis, satellite power control unit, reliability analysis, ECSS-Q-ST-30-02C standard, hybrid FMECA approach.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

HTEKA bir fonksiyonun, birimin veya sistemin olası hata türlerini tanımlayarak alt seviyeden üst seviyelere doğru hatanın nedenlerinin, tespit yönteminin, etkilerinin

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : [bmustafa@gazi.edu.tr](mailto:bmustafa@gazi.edu.tr)

incelendiği ve hatanın minimize edildiği modern bir mühendislik metodudur. Risk değerlendirmesi, üretim süreçleri, elektronik/mekanik ürün geliştirme gibi birçok kullanım alanı olmakla beraber endüstride havacılık, uzay, tıp, gemi, askeri ve ticari birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan analiz

türleri sistem, süreç ve tasarım analizleridir [1]. Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) için belirlenen bir hata türü, hatanın son etkisinin şiddet seviyesine göre kategorize edilip değerlendirilirken, HTEKA' da hata türünün oluşma olasılıkları da ele alınır. M.A. Fidan, U. Gürgül, Z.E. Akın (2020) geleneksel HTEA ve HTEKA'nın metodunu elektronik devre tasarımında kullanılmasına yönelik bir uygulamayı risk değerlendirmesine bağlı kalarak göstermişlerdir [2]. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışma uzay donanım geliştirme projelerine uygulanabilir öznel değerlendirmeleri ortadan kaldıran yeni bir tasarım hibrit HTEKA sunmaktadır. Ayrıca örnek bir uygulama üzerinden işleyiş süreci anlatılarak tasarıma etkilerinin nasıl yansıtıldığı gösterilmiştir.

HTEA veya HTEKA' da, tanımlanan bir hata türü diğerlerinden bağımsız olarak incelenir. Diğer bir deyişle hata kombinasyonları ele alınmaz. Geleneksel analizde, ekipman fonksiyonları veya elektronik parçaların hata türleri ele alınarak ekipman seviyesi etkilere ulaşılır. Aynı hiyerarşi sistem seviyesi analizde de geçerli olduğundan, ekipman seviyesi analizler sistem seviyesi analizlere girdi sağlar.

Literatürde iki farklı tasarım HTEKA yaklaşımı bulunmaktadır; fonksiyonel yaklaşım ve donanımsal yaklaşım. Fonksiyonel yaklaşımda ekipman fonksiyonlarına bağlı hata türleri tanımlanır. Bu yaklaşım erken tasarım aşamasında tasarımın mimarisi henüz net olmadığı durumlarda tercih edilir. Yazılım kaynaklı hatalar sadece fonksiyonel yaklaşımla incelenebilir ve donanım hatalarına etkisi Yazılım-Donanım Etkileşim Analizi'nde ele alınır [3]. Donanımsal yaklaşımda ise analiz elektronik parça seviyesinden başlatılır ve hatanın etkileri üst seviyelere doğru incelenir. Her parçanın hata türü dağılımı ve oluşma yüzdeleri donanımsal yaklaşımda kullanılmak üzere bazı standartlarda tanımlanmıştır [3-5]. Detaylı ve maliyetli bir yaklaşımdır ve ekipman fonksiyonlarının geri planda kalmasına sebep olmaktadır.

Uydu ekipman tasarımında meydana gelebilecek potansiyel arızaların tespit edilerek önlemlerinin erken tasarım aşamasında alınması hayati önem taşımaktadır. Her arıza ihtimaline karşı koruma devreleri veya yedek devreler eklemek ise maliyeti artırmaktadır. Bu açıdan tanımlanan hata türünün gerçekleşme olasılığı dolayısıyla HTEKA yapma ihtiyacı uydu ekipman tasarımında ön plana çıkmaktadır. Uygulama alanına göre HTEA veya HTEKA çeşitli standartlara göre yapılmakla beraber uzay ekipman geliştirme projelerinde genellikle ECSS-Q-ST-30-02C standardı referans alınır. Uzay teknolojisinde ekipman güvenilirliğinin öneminin farkındalığı gün geçtikçe artmasına rağmen halen bu alanda sınırlı çalışma bulunmaktadır [6]. Kaynaklarda özellikle ekipman HTEKA'da kritikliğin hata oranı ile ilişkilendirilmesi konusunda belirsizlikler bulunmaktadır. Ayrıca fonksiyonel yaklaşımda analiz çözünürlüğü düşük kaldığından bazı hata türlerinin gözden kaçmasına sebep olmaktadır. Donanımsal yaklaşımda ise uygulanan komponent bazlı HTEKA [7]

çok yüksek çözünürlükte kaldığından analizin okunabilirliği azalmakta, fonksiyonel ilişkisi kopmakta ve sarf edilen zaman artmaktadır. Bu problemin çözümü için önerilen hibrit HTEKA yaklaşımında, ekipmanın elektronik kartları fonksiyonel olarak bütünlük teşkil eden en küçük gruplara bölünerek hata türleri belirlenmiştir. Elektronik kart arayüz sinyalleri üzerinden belirlenen arızanın etkisi ekipman seviyesine çıkarılarak hata türü değerlendirilmiştir. Hatanın kritikliği ise ayrılan fonksiyonel alt grupların arıza oranı kullanılarak belirlenmiş böylece geleneksel yaklaşımın getirdiği nitel değerlendirme belirsizliği ortadan kaldırılmıştır.

## 2. GELENEKSEL HTEKA' NIN GELİŞİM ÖZETİ VE EKSİK YÖNLERİ (HISTORY and MISSING POINTS of TRADITIONAL FMECA)

HTEA, 1949 yılında, ABD Savunma Bakanlığı Silahlı Kuvvetlerinin MIL-P-1629A'yı yayınlaması ile resmîyet kazanmıştır. Grumman Aircraft Corporation, birincil uçuş kontrol sistemini geliştirirken "hata türü ve etki analizi" adlı yöntemi güvenilirlik ve emniyet mühendislik disiplinlerinin ihtiyaçları doğrultusunda kullanmıştır. 1960' ların ortasında, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) HTEA' yı resmî olarak Apollo programı için kullanmış ve süreç haline dönüştürüp yayınlamıştır. HTEA hakkındaki akademik tartışmalar 1960'da başlamış ve HTEA'nin nasıl yürütüleceğini tam olarak anlatan makale, 1964' te New York Bilimler Akademisi'nde Coutinho tarafından yayınlanmıştır [8]. 1974' te MIL-P-1629A revize edilerek askeri sistem ve ekipmanlar için HTEA ve HTEKA süreçlerinin tanımlandığı MIL-STD-1629 [9] standardı yayınlanmıştır. Daha sonra güncellenen bu standarttaki yöntemler eski olmasına rağmen başka bir standartın içerisinde halen geçerliliğini korumaktadır [5]. Diğer taraftan 1967' de ise otomotiv sektörü için ilk sivil HTEKA süreçleri yayınlanmaya başlamıştır. Daha önce Otomotiv Mühendisleri Birliği olarak bilinen SAE International organizasyonunun 1996' da yayınladığı SAE-ARP4761 standardı sivil ve askeri havacılık platformlarında güvenilirlik ve emniyet değerlendirilmesi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uzay uygulamalarında kullanılan standartların bir karşılaştırması daha önceki çalışmalarda incelenmiştir [10]. Uzay uygulamalarında tercih edilen bazı standartlar Çizelge 1' de verilmiştir.

**Çizelge 1** Başlıca Hata Türü Etkileri Analizi Standartları (Major Failure Mode Effect Analysis Standards)

No	Standart
1	ECSS-Q-ST-30-02C Failure modes, effects and criticality analysis (FMECA), 2009, [3].
2	MIL-STD-1629 Procedures for performing a failure mode effects and criticality, 1986, [9]. (İki kez revize edildi ve 1998' de kaldırıldı, yerine MIL-HDBK-338B [5] bölüm 7.8 FMEA kısmının kullanımı önerildi.)

3	SAE J1739, Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design, 2009.
4	JPL. PD-AD-1307, Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA), NASA, 2010.
5	IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA), 2018.

3. ECSS-Q-ST-30-02C de tanımlanan metot daha çok ekipmandan başlayıp sistem seviyesine giden analiz için uygulanabilir.
4. Elektriksel arayüzlerle analizin doğrudan bağlantısı kurulamamaktadır.
5. Hata türlerin belirlenmesi daha çok geçmiş tecrübelerle dayanmakta olduğundan nesnel değildir.

Çizelge 1’ de görüldüğü gibi çeşitli HTEKA standartları olmasına rağmen, 2001’ de uzay endüstrisinde kullanılmak üzere ECSS-Q-ST-02A standardı yayınlanmış ve en son 2009’da güncellenerek en çok tercih edilen standart haline gelmiştir. Choudhary K., Kumar N., Monisha S., Sidharthan P. (2020) bu standardı temel alarak güvenilirlik merkezli tasarım çerçevesinde uzay uygulamasını içeren bir kontrol devresi tasarımını ele alıp güvenilirlik değerlendirmesi ve HTEKA çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir [11]. Ekipman ve sistem tasarımda bu analizlerin önemi gün geçtikçe artmasına rağmen halen bazı eksik noktalar bulunmaktadır. Bahsedilen geleneksel HTEKA’nın süreci ve zayıf noktaları aşağıda belirtilmiştir.

Geleneksel bir HTEKA’da aşağıdaki adımlar takip edilir [3]:

1. Ürünün açıklanması (fonksiyonel analiz veya güvenilirlik blok diyagramı kullanılabilir),
2. Olası tüm hata türlerinin belirlenmesi,
3. Hata türlerinin değerlendirilmesi ve şiddet kategorilerinin nitel olarak atanması,
4. Hata tespit yönteminin belirlenmesi,
5. Hata türünün etkilerinin azaltılması için önlemlerin tayin edilerek hataya yönelik tedbirlerin alınması.

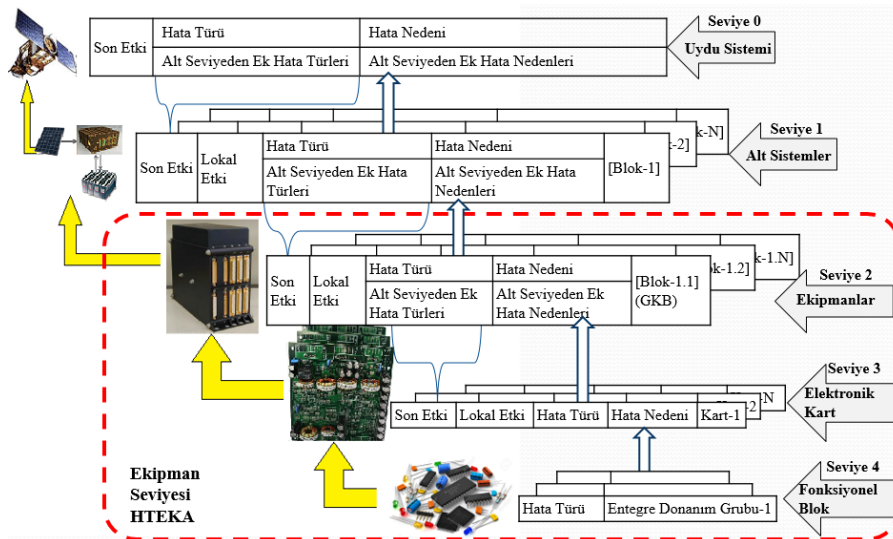
Yukarıda işleyiş adımları verilen geleneksel metodun zayıf noktaları aşağıdaki maddeler ile özetlenebilir:

1. Analizin çözünürlüğü ayarlanamamaktadır,
2. Hata etkisinin şiddeti öznel değerlendirmeye tabidir,

### 3. ÖNERİLEN HİBRİT HTEKA METODU (METHOD OF HYBRID FMECA)

Tasarımın bir parçası olan HTEKA için önerilen hibrit yaklaşım sayesinde elektronik parça seviyesinde meydana gelecek bir hatanın sonuçları sistem seviyesinde takip edilebilmektedir. Seçilen entegre donanım grubunun detay seviyesine göre analiz çözünürlüğü ayarlanabilmekte olup, bu gruplara atanan fonksiyonlar ve çizilen fonksiyonel blok diyagram sayesinde analiz öznelikten kurtarılmıştır. Ayrıca hatanın gerçekleşme oranına göre belirlenen değerlendirme ile şiddet seviyesi atama işlemi daha nesnel yapılabilmektedir. Böylece geleneksel yaklaşımda karşılaşılan öznelik ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca elektriksel arayüzler, fonksiyonel blok diyagramların giriş ve çıkışları ile eşleştirildiğinden hata türü bağlantısı kurulabilmiş böylece hata türünün etkileri ekipman seviyesine kolayca taşınabilmiş ve hata türü tespit yönteminin etkin şekilde atanabilmesi sağlanmıştır.

Hibrit yaklaşımda alt seviyedeki son etki bir üst seviyenin hata türü, alt seviyenin hata türü ise üst seviyedeki hatanın nedeni olarak tanımlanarak sistem hiyerarşisi kurulmuştur. Analizin hangi seviyeden başlayarak hata türlerinin tanımlanacağı ve hangi seviyeye kadar götürülerek hata etkilerinin inceleneceği başlangıçta belirlenmelidir. Bu çalışmada komponent grubu için tanımlanan hata türünün son etkisi, ekipman seviyesi olacak şekilde kurgulanmıştır. GKB’nin HTEKA sürecinde kullanılacak ilgili hiyerarşi yaklaşımı



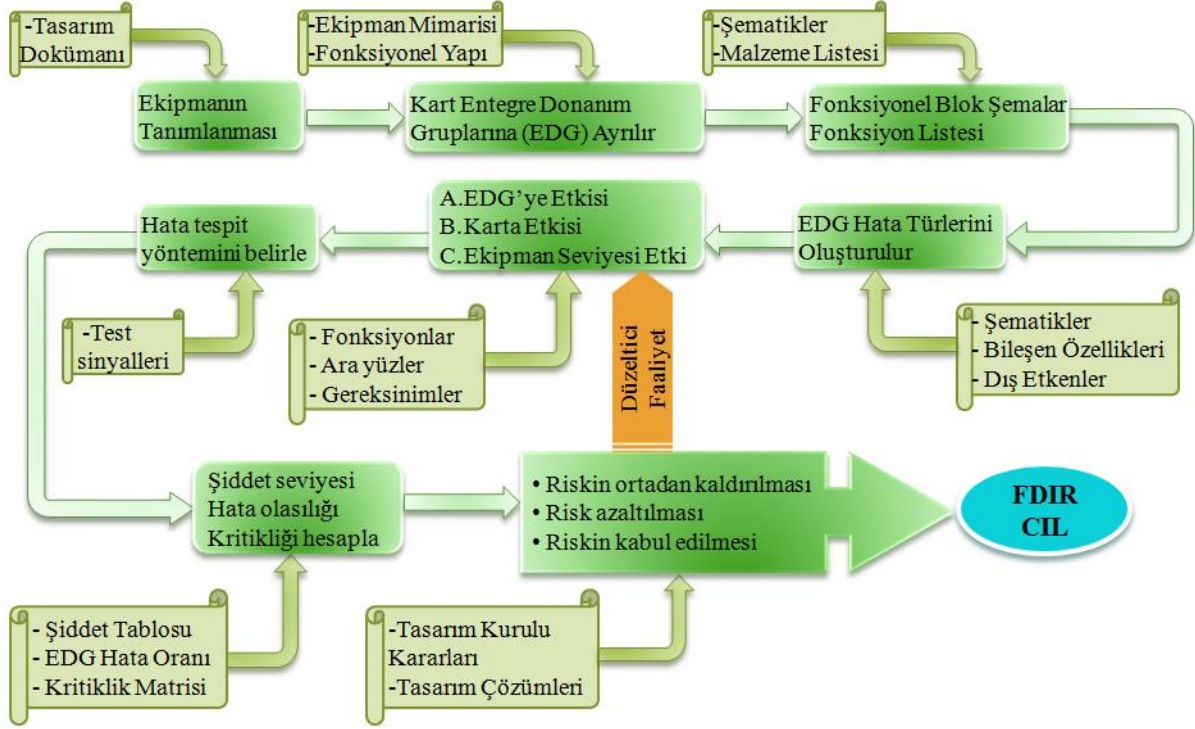
Şekil 1. Başlıca Ekipman seviyesi hibrit HTEKA süreci (Hybrid FMECA process at equipment level)

Şekil 1' de gösterilmiştir.

Tasarım iyileştirmelerinin yanı sıra bu analiznin çıktıları uydu sistemlerinde hata tespit, izolasyon ve kurtarma (FDIR: failure detection isolation and recovery) prosedürünün ve kritik elemanlar listesinin (CIL: critical items list) oluşturulmasına en önemli girdileri sağlamaktadırlar. Şekil 2' de ekipman seviyesi hibrit HTEKA sürecinin adımları gösterilmiştir.

- ii. Güç Düzenleme
- iii. Enerji Depolama
- iv. Güç Dağıtım

GKB güneş panellerinden alınan enerjiyi uydunun diğer alt birimlerine sabit gerilim veya sabit akımda aktarabilmek için düzenli bir bara oluşturur. Buna bağlı olarak yüklerin enerji ihtiyacı güneş panelinden sağlanan enerjiden fazla ise pilin şarj edilmesi, düşük ise pilin



Şekil 2. Ekipman seviyesi hibrit HTEKA süreci (Hybrid FMECA process at equipment level)

#### 4. HİBRİT HTEKA' NIN GKB ÜZERİNDE BİR UYGULAMASI (A CASE STUDY IN THE APPLICATION OF HYBRID FMECA TO PCU)

Bu bölümde önerilen hibrit yaklaşımı Bölüm 3' te verilen esaslar takip edilerek uydu GKB ekipmanı üzerine uygulanarak başarılı olduğu gösterilmiştir.

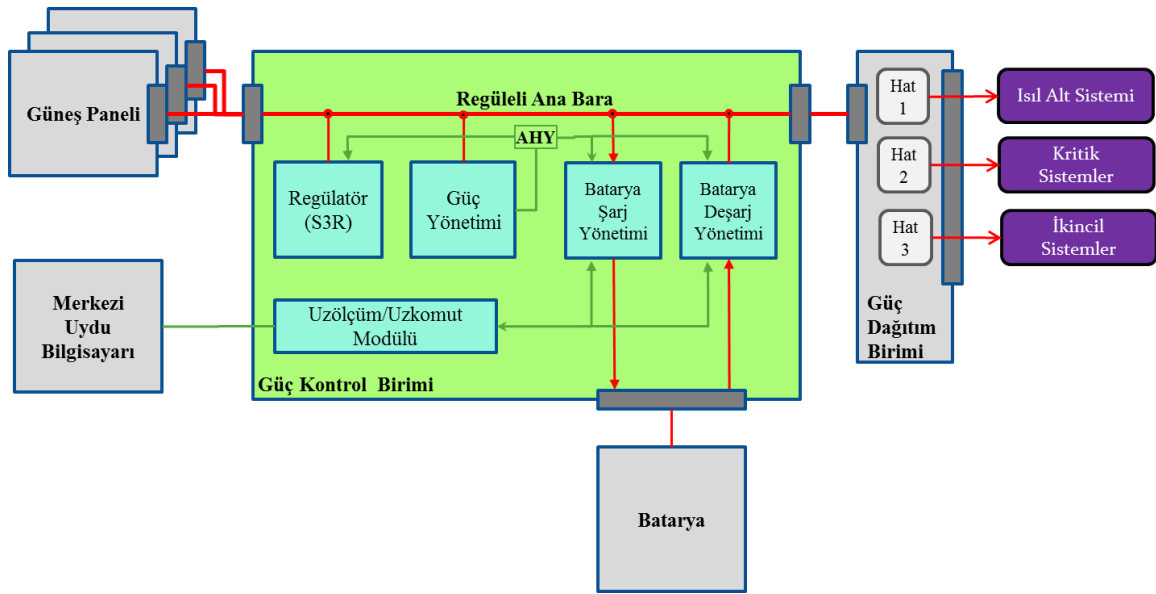
##### 4.1 Uydu Güç Kontrol Birimi (Satellite Power Control Unit)

Şekil 3' te uydu güç alt sistemi ve GKB'nin blok diyagramı verilmiştir. Sistem verimliliği ve güvenilirliği artırma amaçlı uzayda kullanılan elektrik güç sistemleri mimarileri ile ilgili çalışmalar Literatürde benzer topolojilerle kurulmuş GKB yapıları mevcuttur [12,13]. Güç kontrol biriminin Güneş Panelleri, Batarya ve Güç Dağıtım Birimi ile elektriksel arayüzü, Merkezi Uydu Bilgisayarı ile haberleşme arayüzü bulunmaktadır. Uydunun Güç Alt Sistemi aşağıdaki 4 ana işlemi yerine getirir:

- i. Güç Üretimi

deşarj edilmesi GKB tarafından sağlanır. Uydunun en kritik alt sistemlerinden biri olan GKB güç düzenleme işlevini yerine getirmektedir ve hatası durumunda uydunun kesin kaybına sebep olabileceğinden kritik ekipman olarak sınıflandırılır.

Şekil 3' te GKB'yi oluşturulan elektronik kartlar ve bağlantıları gösterilmiştir. Kartlar, aralarında fonksiyonel ilişki, donanım entegre gruplarına ayrılarak incelenmiştir. Erken tasarım aşamasında bu donanımsal gruplamaya göre fonksiyonel bloklar oluşturulup yapılacak tasarım ve çizilen elektronik şematikler bu kurguya göre geliştirilmiştir. Donanım gruplarının fonksiyonları üzerinden hata türleri belirlenerek ekipman seviyesinde etkisi incelenmiştir. İlk etki kart seviyesi son etki ise ekipman seviyesi olacak şekilde Şekil 1' de gösterilen hiyerarşiye uygun hata türleri incelenip değerlendirilmiştir. Son olarak beş kart birleştirilerek ekipman seviyesi hibrit HTEKA' ya ulaşılmıştır.



Şekil 3. Uydu Güç Alt Sistemi (Satellite Power Control Unit)

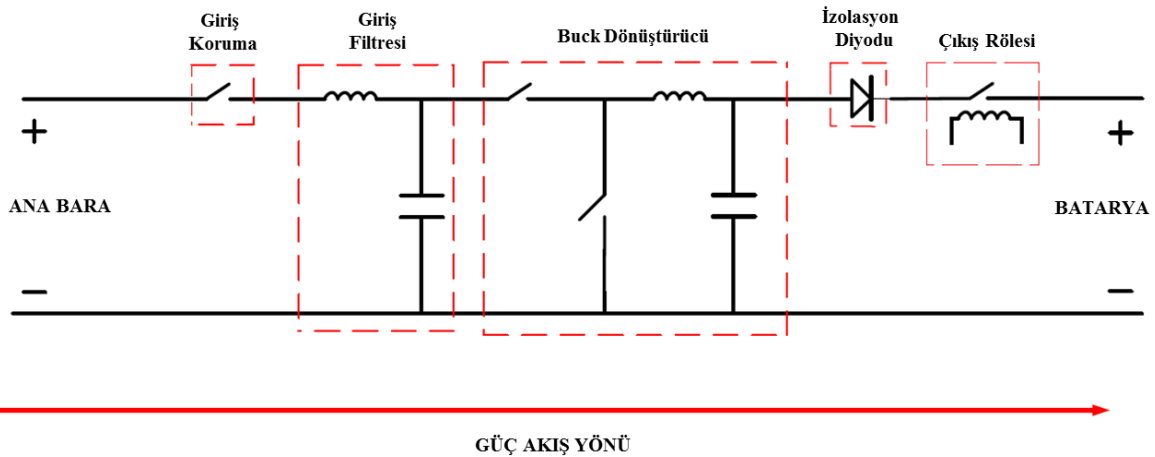
GKB güneş panellerinden alınan enerjiyi uydunun diğer alt birimlerine sabit gerilim veya sabit akımda aktarabilmek için düzenli bir bara oluşturur. Buna bağlı olarak yüklerin enerji ihtiyacı güneş panelinden sağlanan enerjiden fazla ise pilin şarj edilmesi, düşük ise pilin deşarj edilmesi GKB tarafından sağlanır. Uydunun en kritik alt sistemlerinden biri olan GKB güç düzenleme işlevini yerine getirmektedir ve hatası durumunda uydunun kesin kaybına sebep olabileceğinden kritik ekipman olarak sınıflandırılır.

Şekil 3' te GKB'yi oluşturulan elektronik kartlar ve bağlantıları gösterilmiştir. Kartlar, aralarında fonksiyonel ilişki, donanım entegre gruplarına ayrılarak incelenmiştir. Erken tasarım aşamasında bu donanımsal gruplamaya göre fonksiyonel bloklar oluşturulup yapılacak tasarım ve çizilen elektronik şematikler bu kurguya göre geliştirilmiştir. Donanım gruplarının fonksiyonları üzerinden hata türleri belirlenerek ekipman

seviyesinde etkisi incelenmiştir. İlk etki kart seviyesi son etki ise ekipman seviyesi olacak şekilde Şekil 1' de gösterilen hiyerarşiye uygun hata türleri incelenip değerlendirilmiştir. Son olarak beş kart birleştirerek ekipman seviyesi hibrit HTEKA' ya ulaşılmıştır.

#### 4.2 Batarya Şarj Yönetimi Kartı (Battery Charge Regulator (BCR) Board)

Batarya Şarj Yönetimi (BŞY) kartı üzerinde oluşan bazı hata türleri örnek olarak bu çalışmada verilmiştir. BŞY, adından da anlaşıldığı üzere, güneşten elde edilen enerjinin ihtiyaçtan fazla olduğu evrede bataryanın şarj edilmesini sağlayan birimdir. Güç yönetim biriminden sağlanan Ana Hata Yükseltici (AHY) sinyaline göre sabit akım veya sabit gerilim kipinde çalışarak ana baranın belirli bir gerilimde tutulmasını (düzenli bara) sağlar. Şarj sonu gerilime ulaşıncaya kadar sabit akımda, şarj sonunda ise sabit gerilimde pil şarjı gerçekleşmektedir. BŞY kartının devre şeması, çalışma topolojisini



Şekil 4. BŞY devre şeması (Electronic circuit schematic of BCR)

gösterecek şekilde indirgenmiş ve Şekil 4' te gösterilmiştir. İlgili fonksiyonları yerine getiren komponentleri temsil eden donanım entegre gruplar kırmızı hatlarla ayrılmıştır.

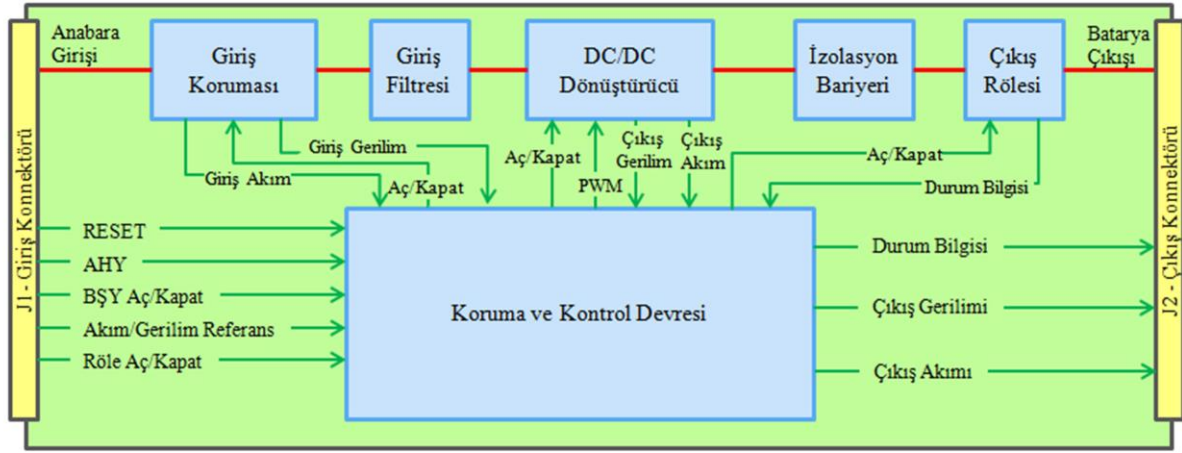
#### 4.3 BŞY Fonksiyonel Blok Diyagramı (Functional Block Diagram of BCR)

BŞY Devre Şemasında ayrılmış donanım entegre grupları arasındaki fonksiyonel yapıyı göstermek amacıyla Şekil 5' te verilen BŞY Fonksiyonel Blok Diyagramı çizilmiş ve arayüz bağlantıları ile eşleştirilmiştir. Bu sayede her bir entegre donanım grubunu komponent bazlı HTEKA' da olduğu gibi incelemek mümkün kılınmıştır. Kartların blok diyagram girişi ve çıkışlarının konektör arayüzleri ile aynı alınması,

kart seviyesindeki etkinin ekipman seviyesine taşınmasında kolaylık ve nesnellik sağlamıştır. Hibrit HTEKA' da yazılacak bölgesel etki kartın çıkış konektöründe gösterilen sinyal ile ilişkilendirilmelidir.

#### 4.4 BŞY Fonksiyonel Listenin Oluşturulması (Generating Functional List of BCR)

Şekil 5 fonksiyonel blok diyagramda belirtilen her bir entegre donanım grubunun fonksiyonel işlevleri aşağıdaki çizelgede tanımlanmıştır. Donanım gruplarına bu fonksiyon listesinde belirlenen hata türleri atanarak Hibrit HTEKA' da değerlendirilmiştir. Çizelge 2' de altı fonksiyonel gruba ayrılan BŞY kartı için türetilen örnek hata türleri verilmiştir.



Şekil 5. BŞY fonksiyonel blok diyagram (Functional block diagram of BCR)

Çizelge 2. BŞY Fonksiyon Listesi (Function List of BCR)

Blok	Fonksiyonel İşlevleri	Hata Türü
Giriş Koruma Devresi	Ana bara ile DC/DC dönüştürücü arasındaki kısa devreyi engellemek.	Giriş Koruması Kaybı
Giriş Filtresi Devresi	DC/DC dönüştürücü tarafından çekilen darbeli akımdan dolayı ana bara kararsızlığını engellemek.	Kısa Devre Hatası
DC/DC Dönüştürücü Devresi	Ana baradan çekilen gücün batarya için uygun akım ve gerilim değerine dönüştürmek.	Filtre Hatası
İzolasyon Bariyeri Devresi	Bataryadan DC/DC dönüştürücüye tersine akışı engellemek.	İzolasyonun delinmesi
Çıkış Rölesi Devresi	Batarya ile pil şarj yönetimi kartı arasındaki elektriksel bağlantıyı ayırmak.	Anahtarlama Hatası
Koruma ve Kontrol Devresi	i. Bataryanın uygun akım ve uygun gerilim değerinde şarj edilmesini sağlamak.	PWM sinyali hatası
	ii. Aşırı akım aşırı gerilim gibi bozucu etkilere karşı BŞY'yi korumak.	Giriş Korumasının Devreden Çıkarılması
	iii. Uydu bilgisayarı tarafından gönderilen komutların BŞY tarafından alınmasını ve işletilmesini sağlamak.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ AHY Hatası</li> <li>▪ RESET Hatası</li> <li>▪ Referans Hatası</li> <li>▪ Çıkış Gerilim Hatası</li> <li>▪ Çıkış Akım Hatası</li> <li>▪ Aç/Kapat Hatası</li> </ul>
	iv. BŞY'nin çalışma bilgilerinin uydu bilgisayarına gönderilmesini sağlamak,	Durum Bilgisi Hatası



Kartlar arası ilişkinin daha kolay kurulup, son etkilerin detay yazılmasını sağlayacak olan BŞY arayüz sinyal listesi Çizelge 3' te verilmiştir. Bu sayede bu sinyallerin kaybının ekipman seviyesindeki etkisi kolaylıkla incelenebilmiştir.

**Çizelge 3.** Arayüz Sinyal Listesi (Interface Signal List)

Sinyaller	İşlevleri
Akım/Gerilim Referansı	Uydu Bilgisayarından gönderilen şarj Akım/Gerilim Referans bilgilerine göre bataryanın şarj sınırlarını belirleyen sinyaldir.
Ana Hata Yükseltici (AHY)	GKB Güç Yönetimi kartında üretilen ve GKB'de bulunan güç kartlarının senkronizasyonunu sağlayan sinyaldir.
RESET	BŞY'nin koruma devrelerinin yanlışlıkla devre dışı kalması durumunda koruma devresini tekrar devreye alan sinyaldir.
BŞY Aç/Kapat	BŞY'de bulunan DC/DC dönüştürücü grubunun devreye alınması ve devreden çıkartılmasını sağlayan sinyaldir.
Röle Aç/Kapat	BŞY ile batarya arasındaki elektriksel bağlantının devreye alınması ve devreden çıkartılması için kullanılan sinyaldir.
Durum Bilgisi Çıkış Gerilimi Çıkış Akımı	Merkezi uydu bilgisayarına gönderilmek üzere oluşturulmuş ölçüm sinyalleridir.

#### 4.5 Kritiklik Analizi (Criticality Analysis)

Hata türünün kritikliği son etkiye bakılarak belirlenir. Farklı bloklarda tanımlanan hata türleri aynı etkilere sebep olabilirler. Çoğunlukla üst seviyeye çıktıkça, son etki de ortaklanacaktır. Bu son etkinin kritikliğinin belirlenmesi için iki girdiye ihtiyaç duyulur;

- I. Şiddet Seviyesi
- II. Gerçekleşme Olasılığı

Gerçekleşme olasılığına ulaşmak için entegre gruplarının hata oranları hesaplanmalıdır. Uzay uygulamalarında elektronik komponentlerin hata oranlarına ( $\lambda$ ) erişmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir [14]:

- El kitapları verileri kullanılan yöntemler(MIL-HDBK-217, FIDES, Telcordia, PRISM vb),
- Komponent üreticisi verileri,
- Saha verileri elde edilen hata oranları,
- Hızlandırılmış ömür testlerinden elde edilen hata oranları,

Hata oranlarının elde edilmesinde askeri ve uzay ekipman geliştirme projelerinde yaygın olarak kullanılan MIL-HDBK-217FN2 [15] el kitabı tercih edilmiştir. Bu el kitabı eski tarihli olduğundan bu yöntemle hesaplanan hata oranlarının kötümser olduğuna dair literatürde bazı araştırmalar bulunmaktadır [16]. Bu sorunun üstesinden gelip daha doğru sonuçlara ulaşabilmek için Amerikan

Ulusal Standartlar Enstitüsü'nün yayınladığı ANSI/VITA 51.1'deki düzeltmeler dikkate alınmıştır [17]. Ayrıca sabit hata oranına dayalı gerçekleşme olasılığını hesaplayabilmek için üstel dağılım kullanılmıştır [5].

#### 4.5.1. Şiddet Seviyesi (Severity Level)

İncelenen her hata türüne, şiddet seviyesi atanmalıdır. Şiddet seviyesinin atanması için çeşitli standartlarda birbirine yakın metotlar bulunmaktadır [5, 7, 9]. Uzay sistem tasarımında şiddet kategorisi için derecelendirme çizelgeleri sunulmakla birlikte [3], bu çizelgeler ekipman seviyesi için uygulanabilir değildir. İlgili çizelge bizim çalışmamızda ekipman seviyesine göre uyumlandırılmış ve Çizelge 4' te verilmiştir.

**Çizelge 4.** Şiddet seviyelerine atanan katsayılar (Coefficients assigned to severity levels)

Şiddet Seviyesi	Şiddet Kategorisi	Şiddet Çarpanı	Hata Etkisi
1	Ölümcül	4	Hata yayılımı, yedeğine veya başka ekipmanlara zarar verebilecek hatalar.
2	Kritik	3	Ekipman kaybı veya görev kaybına neden olan hatalar.
3	Majör	2	Ekipmanda majör performans kaybına neden olan hatalar.
4	Minör	1	Ekipmanda minör performans kaybına neden olan veya ihmal edilebilir hatalar.

Uydu ekipman geliştirme projelerinde bakım zorluğundan dolayı tekil nokta hatası ve yedeklilik oldukça önemlidir. Sistemin kaybına ve performans azalmasına neden olabilecek hataların dikkatlice incelenmesi için hibrit HTEKA kullanılmıştır. Analizde emniyet riski içeren hatalar emniyet analizinde kullanılmak üzere işaretlenmiştir. Eğer aşağıdaki tanımlara uygun değerlendirme bulunuyorsa şiddet seviyesi numarasının sonuna SH, R veya SP ekleri getirilmelidir [18].

- SH : Emniyet ile ilişkili tehlike mevcut
- R : Yedeklilik mevcut
- SP : Tekil nokta hatası mevcut

#### 4.5.2. Gerçekleşme Hata Oranı (Occurrence Failure Rate)

Komponentin hata oranına veya mühendislik değerlendirmesine dayalı, literatürde nicel ve nitel yaklaşım olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır [5, 9]. Nitel yaklaşım için projeye özel değerlendirme çizelgeleri uygulanarak komponent hata oranından bağımsız gerçekleşme olasılığı atanan çalışmalar

bulunmaktadır [19]. Nicel yaklaşımda ise kritiklik, denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanır [20]:

$$C_m = \alpha \beta \lambda t \quad (1)$$

- $C_m$  : Hata türünün kritikliği  
 $\beta$  : Koşullu hata etki olasılığı  
 $\alpha$  : Hata türü yüzdesi  
 $\lambda$  : Komponentin hata oranı  
 $t$  : Çalışma yüzdesi

$$C_{r_i} = \sum_{n_i=1}^{k_i} C_{m_{n_i}} \quad (2)$$

- $C_{r_i}$  : i. şiddet seviyesindeki kritiklik derecesi  
 $k_i$  : i. şiddet seviyesindeki komponent sayısı  
 $C_{m_{n_i}}$  : i. Şiddet seviyesindeki hata türünün kritikliği

Bu denklemler uyarlanıp hibrit HTEKA ile uyumlu hale getirilmiştir. Hata türünün gerçekleşmesi durumunda, hata etkisinin nasıl sonuçlanacağını gösteren koşullu olasılığı hesaba katmak için Çizelge 5' te verilen kriterlere göre belirlenen  $\beta$  parametresi kullanılmıştır.

**Çizelge 5.** Koşullu hata etki olasılığı derecelendirme çizelgesi (Conditional rating scale of failure effect probability)

Hata Etkisi	$\beta$ çarpanı
Kesin kayıp	1.00
Olası kayıp	$0,1 < \beta < 1$
Düşük ihtimalle kayıp	$0 < \beta < 0,1$
Etki yok	0

Hata türü yüzdesi entegre donanım grubu için atanan hata türlerinin o gruptaki fonksiyonel dağılım yüzdesidir. Bundan dolayı bu değer bir adet hata türü atanmış ise %100 alınır. Hata türü dağılımı oluşturulurken gruptaki komponentlerin [4] numaralı kaynakta belirtilen hata türü dağılım oranları göz önünde bulundurulmuştur.

Uzay uygulaması olduğu için hata oranları ECSS-Q-HB-30-08 standardında tarif edilen yöntem kullanılarak PTC WQS yazılımı ile hesaplanmıştır. Örnek olarak bir hata türünün gerçekleşme olasılığı oranının hesaplanması Çizelge 6' da gösterilmiş, diğer hata türlerinin gerçekleşme olasılığı sonuçları ise Bölüm 4.5.5' te Çizelge 8' de verilmiştir.

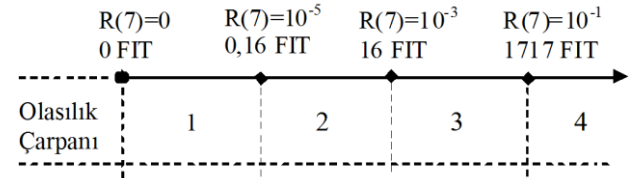
#### 4.5.3. Olasılık Çarpanı (Probability Factor)

Kritiklik hesaplayabilmek için ihtiyaç duyulan olasılık çarpanı ile gerçekleşme hata oranı arasında doğrudan ilişkisi kurularak önerilen hibrit HTEKA'ya özgü, hata oranına bağlı nicel bir değerlendirme sağlanmıştır. Bu amaçla ECSS-Q-ST-30-02C' de 1, 2, 3, 4 kritiklik numaralarına karşılık gelen  $0, 10^{-5}, 10^{-3}, 10^{-1}$  olasılıkların FIT birimine dönüştürülmek üzere uyarlanması gerekmektedir. Elektronik komponentlerin hata oranı kuvvet eğrisinde verilen faydalı ömür bölgesinde bulunduğu için sabit kabul edilerek üstel dağılım ile arızalanma olasılıkları hesaplanabilir [21]. GKB'nin kullanılacağı uydunun görev ömrü 7 yıl (61362 saat) olarak tanımlanmış ve üstel dağılım denklem (3)' te tersine hesaplama yapılarak olasılık dağılımı belirleme tablosu oluşturulmuştur (Şekil 6). Bu tablo kullanılarak her hata türüne bir olasılık çarpanı atanmıştır.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \text{ ve } F(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

$R(t)$  :Görev ömrü süresinde güvenilirlik fonksiyonu,

$F(t)$  :Görev ömrüne bağlı arızalanma olasılığı



**Şekil 6.** Olasılık Çarpanı Belirleme Tablosu (Determination chart for probability factor)

#### 4.5.4 Kritiklik Belirleme (Determining Criticality)

Hata türünün kritikliği, hataya karşı alınacak tedbirlerin önceliklendirilmesinde ve getiri götürü hesaplarında önemli yer tutar. Kritik olarak belirlenen öğelerin kritik parça listesine eklenmesi ve izlenerek gerekli tedbirlerin alınması esastır [22]. Kritiklik Numarası denklem (4) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KN \text{ (Kritiklik Numarası)} = \text{Şiddet Çarpanı} \times \text{Olasılık Çarpanı} \quad (4)$$

Çizelge 7' de verilen kritiklik matrisi hata türünün kritikliğinin belirlenip kabul edilebilir seviyeye getirilip getirilemediğinin kontrolü için kullanılmıştır. Çizelgede şiddet kategorisi ölümcül ve kritiklik numarası 6 ve üstü hesaplanan tüm hata türleri kritik olarak değerlendirilmiştir. Denklem (4) ile hesaplanan kritiklik numaraları ve bu kritikliğe uygun önlemler dikkate alınarak, GKB'nin hata türleri bu kritiklik matrisinde değerlendirilmiş sonuçlar Bölüm 4.5.5' te verilmiştir.

**Çizelge 6.** BŞY devre şeması (Electronic circuit schematic of BCR)

Blok	Hata Türü	Entegre Donanım Grubu Devre Elemanları	Şiddet	Hata Türü Yüzdesi	Hata Oranı	$\beta$	Çalışma Yüzdesi	Gerçekleşme Hata Oranı
Giriş Koruma	Giriş Koruması Kaybı	Giriş Koruma pasif ve yarı iletken komponentleri	2	%100	10 FIT	0,5	%100	5 FIT

\*FIT(failure in time):  $10^9$  saatte bir hata oranı olarak ifade edilir.

Çizelge 7. Kritiklik Matrisi (Criticality Matrix)

	Şiddet Çarpanı	Olasılık Çarpanı			
		1	2	3	4
Ölümcül	4	4	8	12	16
Kritik	3	3	6	9	12
Majör	2	2	4	6	8
Minör	1	1	2	3	4

#### 4.5.5. GKB Hibrit HTEKA Sonuçları (Hybrid FMECA Results of PCU)

Önerilen hibrit HTEKA yaklaşımı kullanılarak GKB'nin hata türü analizini gerçekleştirmek için yukarıda bahsedilen yöntem ve aşamalar uygulanmış ve sonuçlar Çizelge 8' de verilmiştir. Hata türü etkileri ve kritiklik analizi detaylı uzun bir analiz olduğundan dolayı hata türleri minimize edilerek sınırlı kısmı verilebilmiştir.

Çizelge 8. GKB HTEKA Sonuçları (FMECA Results of PCU)

Blok	Hata Türü	Hata Sebebi	Hata Etkileri A:Entegre Donanım Grubu Etki B: Elektronik Kart Seviyesi Etki C: Ekipman Seviyesi Etki	Hata Tespit Yöntemi	Telafi Edici Önlem	G. Hata Oranı	Şiddet Seviye	Şiddet Çarp.	Olasılık Çarp.	Kritiklik No
Giriş Koruma	Giriş Koruması Kaybı	Giriş Akımı hatası, Komponent Hatası (Açık devre Mosfet), Güç katında aşırı ısınma	A. Giriş Koruması Aç/Kapat komutunu çalıştıramaz. B. BŞY RESET komutunu işletemez ana bara korumasız kalır. C. GKB iç hatalara karşı korumasız çalışır.	Giriş Akımı Ölçülemez.	Yedek BŞY devreye alınır.	5,0	3 R	2	2	4
Giriş Filtresi	Filtre Hatası	Komponent Hatası	A. Filtreleme fonksiyonu kaybedilir. B. Filtre kesim frekansının kayması. C. Ana baradan darbeli akım çekilir, ekipman çalışmaya devam eder.	Giriş akımı ölçülerek tespit edilir.	-	2,4	4	1	2	2
DC/DC	Kısa Devre Hatası	Yarı iletken kısa devre hatası	A. Dönüştürme fonksiyonu kaybı. B. BŞY kartı kalıcı hasar. C. GKB'nin ana barası kısa devre olur, ekipman kaybedilir.	Girişten kısa devre akımı ölçülerek tespit edilir.	Giriş koruma devresinin BŞY - Ana Bara bağlantısını keser.	25	2 R	3	3	9
İzolasyon Bariyeri	İzolasyon un delinmesi	Komponent hatası Üretim Hatası	A. İzolasyon bariyeri kaybedilir. B. Bataryadan DC/DC dönüştürücüye doğru güç akışı olur, Durum Bilgisi Sinyali kaybedilir. C. Şarj işlemi yapılmadığı durumda batarya istemsiz boşaltılır. Ekipman Durum Bilgisi okunamaz.	Çıkış Akımı ölçülerek tespit edilir.	Şarj işlemi yapılmadığında Batarya - BŞY bağlantısı çıkış rölesi ile kesilip tersine güç akışı engellenir.	3,0	2S H	3	2	6
Çıkış Rölesi	Anahtarlar ma Hatası	Komponent hatası	A. Aç/Kapa komutu işletilemediğinden anahtarlar ma kaybedilir. B. BŞY ile bataryanın elektriksel bağlantısı kesilir. C. GKB şarj işlevi kaybı.	Çıkış Rölesinin bağlantı durum bilgisine bakılarak tespit edilir.	Yedek BŞY'ye geçilmesi gerekmektedir.	3,6	2 R	3	2	6

Çizelge 8.(Devam) GKB HTEKA Sonuçları (FMECA Results of PCU)

Blok	Hata Türü	Hata Sebebi	Hata Etkileri A:Entegre Donanım Grubu Etki B: Elektronik Kart Seviyesi Etki C: Ekipman Seviyesi Etki	Hata Tespit Yöntemi	Telafi Edici Önlem	G. Hata Oran	Şiddet Seviye	Şiddet Çarp.	Olasılık Çarp.	Kritiklik No
Koruma ve Kontrol Bloğu	PWM sinyali hatası	Komponent hatası Radyasyon	A. Akım/Gerilim Referans hatası, B. Batarya uygun akım ve uygun gerilim değerinde şarj edilemez. C. GKB performans kaybı.	Çıkış akım ve çıkış gerilim bilgilerine bakılarak tespit edilir.	Yedek BŞY'ye geçilmesi gerekmektedir.	10,1	3 R	2	2	4
	Giriş Koruma Hatası	Geçici Ölçme Hatası	A. Aç/Kapat Sinyalinin takılması. B. Giriş akımının gerçekleşenden çok daha büyük ölçülmesi durumunda giriş koruma tarafından elektriksel bağlantı kesilir. C. Şarj işlevi gerçekleştirilemez.	Gizli hata	Devre resetlenerek hata telafi edilir.	6,4	4	1	2	2
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Uydu ekipman tasarımında düzeltici ve önleyici faaliyetlerin belirlenmesinde en önemli araç olan HTEKA, hatanın ortadan kaldırılmasını, etkisinin azaltılmasını veya kontrol altına alınmasını sağlayarak, projenin erken aşamasında tasarımı yönlendirmek için kullanılır. Bu açıdan ekipman kalitesine, maliyetine ve proje takvimine katkısı büyüktür. Bu yüzden ekipman geliştirme projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzay projelerinde kullanılmak üzere ECSS-Q-ST-30-02C' de bir yöntem ve hata türü kritikliğinin değerlendirilmesi için bir süreç tanımlamıştır. Ancak bu süreç ekipman seviyesinden çok sistem ve alt sistem seviyesi analizlere uygulanabilir. Bu çalışmada söz konusu ihtiyaca yönelik hibrit HTEKA olarak adlandırılan yeni bir analiz yaklaşım metodu önerilmiştir. Analizin GKB üzerinde uygulaması yapılarak Çizelge 2' de limitli bir kısmı belirtilen hata türleri için gerçekleştirilmiş ve sonuçları Bölüm 4.5.5' te verilmiştir. Son etkilerin kritikliği hesaplanarak bunlar hibrit HTEKA çizelgesinde verilmiş ve bu girdiler göz önünde bulundurularak ekipman tasarımı şekillendirilmiştir.

Bu çalışmada üç ana tema üzerinde durularak iyileştirmeler yapılmıştır. Birincisi, hata türünün doğru belirlenerek daha nesnel belirleme yapılabilmesidir. Hata türlerini belirlemek için ekipmanı fonksiyonel elektronik kartlar, kartları da en küçük ortak fonksiyonel gruba ayırıp, donanım grupları arasında ilişkinin kurularak, kartlar arası arayüzler üzerinden hatanın etkisinin incelenmesini sağlanmıştır. İkincisi, şiddet seviyesi fonksiyonel kritiklere göre belirlendiğinden daha nesnel belirlenebilmesi sağlanmıştır. Üçüncüsü ise gerçekleşme olasılığına sayısal derecelendirme katılarak daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda gerçekleşme olasılığı hata oranına bağlı olduğundan bu değer de

doğru elde edilmesi için ANSI/VITA 51.1 kullanımı önerilmiştir.

Kalitatif değerlendirme açısından GKB kartlardan bazılarında iç yedeklilik, bazılarında ise kart seviyesinde yedeklilik kurulması sağlanarak tekil nokta hatasına karşı önlemler alınmıştır. Öngörülen hatalar tasarımın erken aşamasında engellenerek daha güvenilir bir ekipman tasarlanması sağlanmıştır. Bunlara ek olarak hata türü sayısı artırılarak hibrit HTEKA'nın çözünürlüğünü artırmak da mümkündür. HTEKA sonuçları aynı zamanda kritik elemanlar listesinin belirlenmesinde ve hata tespiti, izolasyon ve kurtarma sürecine de önemli girdi oluşturmaktadır.

İleriki çalışmalarda hibrit HTEKA ihtiyaçlara uyarlanarak askeri ve ticari ekipman geliştirme süreci için de kullanılabilir. Ayrıca yedeklilik göz önünde bulunmaksızın ekipman seviyesi hiçbir etkisi bulunmayan hataların ekipmanın sayısal güvenilirlik değerine etkisi olmadığından ekipmanın iki hata arası ortalama süre (MTBF: Mean time between failure) hesaplanırken bu hatalardan kaynaklanan hata oranları kapsam dışı bırakılabilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Nazım YAMAN:** İçeriğin bütün bölümlerinde arka plan teorisini toplamak için katıldı ve katkıda bulundu. Analizleri gerçekleştirdi, devre tasarım önlemleri

geliştirdi ve sonuçları yorumladı. Makaleyi yazdı, metin ve şekilleri revize etti.

**Mustafa BURUNKAYA:** İçeriğin gerekli bölümlerinde arka plan teorisini toplamak için yeterince katıldı ve katkıda bulundu. Sonuçları analiz etti ve yorumladı. Makaleyi yazdı, metin ve şekilleri revize etti.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Carslon C.S., "Understanding and Applying the Fundamentals of FMEAs", *2014 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Colorado, 12-110, (2015).
- [2] Fidan M. A., Gürgül U., Akin Z. E., "FMEA - FMECA the Application of Analysis on Electronic Circuit", *2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, Antalya, Turkey, 17-22, (2020).
- [3] ECSS-Q-ST-30-02C, "Space Product Assurance-Failure mode effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)", (2009).
- [4] FMD-2016, "Reliability Analysis Center (RAC)-Failure Mode Mechanism Distribution", (2016).
- [5] MIL-HDBK-338B (Notice-2), "Military Handbook-Electronic Reliability Design Handbook", (2012).
- [6] Santos A., Infante V., Bamsey M., Schubert D., "A case study in the application of failure analysis techniques to Antarctic Systems: EDEN ISS", *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, Edinburgh, 1-7, (2016).
- [7] SAE-ARP4761, "Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment", (1996).
- [8] Chen Y., Ye C., Liu B., Kang R. "Status of FMECA Research and Engineering Application", *2012 Prognostics & System Health Management Conference*, Beijing, 1-9, (2012).
- [9] MIL-STD-1629 "Military Standard-Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis", (1980).
- [10] Li L., Wan C., Lin Y., "Compare of the Reliability Standards Used for Space Electronic Products in ECSS and CAST", *8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, Chengdu, 1340-1344, (2009).
- [11] Choudhary K., Kumar N., Monisha S., Sidharthan P., "Integration of DfR in Design of Control Circuit of Space Transmitter," *2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Palm Springs, CA, USA, 1-6, (2020).
- [12] Xuan Z., Qing K., Wentao Y., Jie X., Feng L., Xiangan Y., "Power Assessment Indices of Solar Arrays under MPPT and DET methods for Spacecraft," *2019 European Space Power Conference (ESPC)*, Juan-les-Pins, France, 1-4 (2019).
- [13] Gabriele A., Centonze V., Lobifaro D., Attanasio C., Maiullari G., Costa A., "A Power Control and Distribution Unit for Small Satellite Platforms," *2019 European Space Power Conference (ESPC)*, Juan-les-Pins, France, 1-7, (2019).
- [14] ECSS-Q-HB-30-08A, "Space Product Assurance-Component reliability data sources and their use", (2011).
- [15] MIL-HDBK-217F Notice 2, "Military Handbook-Reliability Prediction of Electronic Equipment", (1991).
- [16] de Francesco E., de Francesco R., Petritoli E., "Obsolescence of the MIL-HDBK-217: A critical review.", *2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, Padua, 282-286, (2017).
- [17] ANSI/VITA 51.1, Reliability Predictions MIL-HDBK-217 Subsidiary Specification, (2013).
- [18] ECSS-Q-ST-40-02C, "Space Product Assurance-Hazard analysis", (2008).
- [19] Neagoe B.S., Deaky B., Martinescu I., "Failure Mode and Effects Analysis of a new telemonitoring system," *9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, Bilbao, 1-4, (2012).
- [20] Choudhary K., Sidharthan P., "Failure mode effects and criticality analysis (FMECA) of Electronic Power Conditioner (EPC)", *5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Noida, 343-346, (2016).
- [21] Birolini A., "Reliability Engineering: Theory and Practice", Eight Edition, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, (2017).
- [22] ECSS-Q-ST-10-04C, "Space Product Assurance-Critical item control", (2008).