
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KÜÇÜK UYDULARDA GÜVENİLİRLİK TAHMİN STANDARTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI: MIL-HDBK-217F VE FIDES 2009 UYGULAMALARI

Yaren ÖZKALE BAYRAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yaren ÖZKALE BAYRAM

23/12/2024

KÜÇÜK UYDULARDA GÜVENİLİRLİK TAHMİN STANDARTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI: MIL-HDBK-217F VE FIDES 2009 UYGULAMALARI

(Yüksek Lisans Tezi)

Yaren ÖZKALE BAYRAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

ÖZET

Küçük uydular, düşük maliyet ve kısa üretim süresi gibi avantajlarıyla hızla gelişmekte olan bir alandır; ancak RAfta HAzır Ticari (RAHAT) bileşenlerin uzay ortamında maruz kaldığı zorlu koşullar, güvenilirlik analizinin önemini artırmaktadır. MIL-HDBK-217F, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilen ve uzun süredir endüstri standardı olarak kabul gören bir güvenilirlik tahmin yöntemidir. MIL-HDBK-217F, bileşen bazında hata oranlarını çeşitli çevresel faktörlere göre analiz eder; ancak küçük uydulardaki RAHAT bileşenleri için sınırlı bir tahmin doğruluğuna sahiptir. Zaman/Süre Eşdeğer Standardında Hata Kılavuzu (Failure In Time/Duration Equivalent Standard - FIDES Guide) 2009 ise daha modern bir Avrupa standardı olup, RAHAT bileşenlerin zorlu ortam koşullarında karşılaşabileceği risklere yönelik daha kapsamlı bir analiz yaklaşımı sunar. FIDES, özellikle bileşenlerin kullanım profiline göre hata tahmini yapabilmesi açısından farklılık gösterir. Bu çalışmada, her iki standardın küçük uydu uygulamaları için sağladığı hata tahminleri ve analitik yöntemler karşılaştırılarak küçük uydularda güvenilirlik analizi için hangisinin daha uygun olduğuna dair öneriler sunulmuştur. Çalışmada, güvenilirlik tahminleri Windchill Kalite Çözümleri (Windchill Quality Solutions -WQS) yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, küçük uydu görevlerinde her iki standardın da sağladığı faydaları ve eksiklikleri ortaya koymakta ve RAHAT bileşenlerin uzun ömürlü ve güvenilir çalışabilmesi için hangi yöntemin daha etkili olduğunu değerlendirmektedir.

Bilim Kodu : 93411
Anahtar Kelimeler : Uydu sistemleri, küçük uydular, güvenilirlik, güvenilirlik tahmin analizi, FIDES 2009, MIL-HDBK-217F
Sayfa Adedi : 77
Danışman : Prof. Dr. Nursel AKÇAM

COMPARISON OF RELIABILITY PREDICTION STANDARDS IN SMALL SATELLITES: MIL-HDBK-217F AND FIDES 2009 APPLICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Yaren ÖZKALE BAYRAM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

ABSTRACT

Small satellites are a rapidly developing field due to advantages such as low cost and short production time; however, the challenging conditions of the space environment increase the importance of reliability analysis for COTS (Commercial Off The Shelf) components. MIL-HDBK-217F, developed by the U.S. Department of Defense, is a reliability prediction method that has long been accepted as an industry standard. It analyzes failure rates of components based on various environmental factors; however, it has limited prediction accuracy for COTS components in small satellites. The Failure In Time/Duration Equivalent Standard (FIDES) Guide 2009, on the other hand, is a more modern European standard that offers a comprehensive analytical approach to assessing the risks that COTS components may face in harsh environmental conditions. FIDES differs particularly in its ability to estimate failure rates based on component usage profiles. This study compares the failure predictions and analytical methods provided by each standard for small satellite applications, presenting recommendations on which standard is more suitable for reliability analysis in small satellites. Reliability predictions were analyzed using the Windchill Quality Solutions (WQS) software. The results reveal the benefits and limitations of both standards in small satellite missions and evaluate which method is more effective in ensuring the long-term reliability and durability of COTS components.

Science Code : 93411
Key Words : Satellite systems, small satellites, reliability, reliability Prediction analysis, FIDES 2009, MIL-HDBK-217F
Page Number : 77
Supervisor : Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleşmesinde desteklerini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Nursel AKÇAM'a, fikirleri ve yardımları ile destek olan başta Samet KIVANÇ olmak üzere TUSAŞ Uzay Sistemleri Genel Müdür Yardımcılığı Emniyet ve Güvenilirlik Ekibine teşekkürü borç bilirim. Tez yazma sürecimde maddi ve manevi her türlü destekte bulunan sevgili eşim Çağdaş BAYRAM'a ve eğitim-öğretim hayatımın temellerini oluşturan annem ve babam başta olmak üzere ÖZKALE ailesine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. UYDU SİSTEMLERİ 7

2.1. Uydu Yörüngeleri 7

2.2. Uydu Sistemlerinde Model Yaklaşımı 9

2.3. Büyüklüklerine Göre Uydu Sistemlerinin Sınıflandırılması 10

3. GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİ 13

3.1. Güvenilirlik Mühendisliği Metodolojisi 13

3.2. Uzay Sistemleri Güvenilirlik Mühendisliği Analizleri 16

3.2.1. Hata türü ve etkileri kritiklik analizi (HTEKA) 16

3.2.2. Parça stres azaltma (PSA) 18

3.2.3. En kötü durum analizi 18

3.2.4. Arıza tespit, izolasyon ve kurtarma (ATİK) analizi 18

3.2.5. Güvenilirlik tahmin analizi 19

4. ÖRNEK DEVRE ÜZERİNDEN GÜVENİLİRLİK TAHMİN ANALİZİ 31

4.1. Örnek Devre 31

4.2. Örnek Devrenin FIDES 2009 ile Güvenilirlik Hesaplaması 33

4.3. Örnek Devre Üzerinden FIDES 2009 ile Gerçekleştirilmiş Analiz Sonuçları 41

Sayfa

4.3.1. Dirençler FIDES sonuçları 41
4.3.2. Kondansatörler FIDES sonuçları 45
4.3.3. Schottky diyotlar FIDES sonuçları 47
4.3.4. Zener diyot FIDES sonucu 49
4.3.5. NPN transistör FIDES sonucu 49
4.3.6. P-MOSFET FIDES sonucu 50
4.4. Örnek Devrenin MIL-HDBK-217F ile Güvenilirlik Hesaplaması 51
4.5. Örnek Devre Üzerinden MIL-HDBK-217F ile Gerçekleştirilmiş Analiz Sonuçları 51
4.5.1. Dirençler MIL-HDBK-217F sonuçları 51
4.5.2. Kondansatörler MIL-HDBK-217F sonuçları 55
4.5.3. Schottky diyotlar MIL-HDBK-217F sonuçları 56
4.5.4. Zener diyot MIL-HDBK-217F sonucu 57
4.5.5. NPN transistör MIL-HDBK-217F sonucu 58
4.5.6. P-MOSFET MIL-HDBK-217F sonucu 59
5. SONUÇLARIN KIYASLANMASI VE TARTIŞMA 61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 73
ÖZGEÇMİŞ 77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Uzay sistemlerinde kullanılması önerilen güvenilirlik tahmin standartları/el kitapları 23

Çizelge 3.2. TI firması CSD18511KCS test sonuçları 26

Çizelge 4.1. YGK devresindeki EEE bileşenler 32

Çizelge 4.2. $\Pi Yerleşim$ değeri ataması 34

Çizelge 4.3. Pos değeri atama kriterleri 34

Çizelge 4.4. Pos değeri ataması 35

Çizelge 4.5. Pmarks değeri ataması 36

Çizelge 4.6. *Önerilen_ağırlık* hesaplaması 36

Çizelge 4.7. *Memnuniyet_Puanı* değerinin belirlenmesi 36

Çizelge 4.8. $QA_{Üretici}$ değerinin belirlenmesi 38

Çizelge 4.9. $RA_{Bileşen}$ değerinin belirlenmesi 39

Çizelge 4.10. Örnek kontrol listesi 40

Çizelge 4.11. $\Pi Süreç$ değerinin belirlenmesi 40

Çizelge 4.12. Pasif bileşenler için $QA_{Bileşen}$ değerinin belirlenmesi 41

Çizelge 4.13. Kondansatör tür belirlemesi 45

Çizelge 4.14. CV seviyesi belirlenmesi 46

Çizelge 4.15. Ayrık yarı iletkenler için $QA_{Bileşen}$ değerinin belirlenmesi 48

Çizelge 5.1. Bileşenler sonuç kıyaslama 67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Uydu kesimi alt sistemleri 7
Şekil 3.1. Küvet eğrisi 20
Şekil 3.2. FIDES güvenilirlik yaklaşım diyagramı 28
Şekil 4.1. Örnek YGK devresinin şeması 32
Şekil 4.2. R1 direnci FIDES WQS girdileri 42
Şekil 4.3. R2 direnci FIDES WQS girdileri 43
Şekil 4.4. R3 direnci FIDES WQS girdileri 43
Şekil 4.5. R4 direnci FIDES WQS girdileri 44
Şekil 4.6. R5 direnci FIDES WQS girdileri 45
Şekil 4.7. C1 kondansatörü FIDES WQS girdileri 46
Şekil 4.8. C2 kondansatörü FIDES WQS girdileri 47
Şekil 4.9. D2 ve D3 bileşenleri FIDES WQS girdileri 48
Şekil 4.10. D1 bileşeni FIDES WQS girdileri 49
Şekil 4.11. Q1 bileşeni FIDES WQS girdileri 50
Şekil 4.12. F1 bileşeni FIDES WQS girdileri 51
Şekil 4.13. R1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 52
Şekil 4.14. R2 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 52
Şekil 4.15. R3 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 53
Şekil 4.16. R4 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 54
Şekil 4.17. R5 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 54
Şekil 4.18. C1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 55
Şekil 4.19. C2 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 56
Şekil 4.20. D2 ve D3 bileşenleri MIL-HDBK-217F WQS girdileri 57
Şekil 4.21. D1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 58
Şekil 4.22. Q1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 58

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.23. F1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri 59

Şekil 5.1. FIDES örnek devre bileşenleri hata oranları genel görüntüsü 61

Şekil 5.2. FIDES toplam sonuç 62

Şekil 5.3. MIL-HDBK-217F örnek devre bileşenleri genel görüntüsü 63

Şekil 5.4. MIL-HDBK-217F toplam sonuç 63

Şekil 5.5. Zamana bağlı güvenilirlik değişim grafiği 64

Şekil 5.6. FIDES *Süreç_Puanı* 3,0 iken hata oranları genel görüntüsü 65

Şekil 5.7. FIDES *Süreç_Puanı* 3,0 iken toplam sonuç 66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
FIT	Failure In Time

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ADY	Alçak Dünya Yörüngesi
ATİK	Arıza Tespit, İzolasyon ve Kurtarma
COTS	Commercial Off The Shelf
DEY	Dünya Eş-zamanlı Yörünge
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EEE	Elektriksel, Elektronik ve Elektromekanik
EKDA	En Kötü Durum Analizi
ESA	European Space Agency
FIDES	Failure In Time/Duration Equivalent Standard
GSY	Güneş Senkron Yörünge
HTEA	Hata Türü ve Etkileri Analizi
HTEKA	Hata Türü ve Etkileri Kritiklik Analizi
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ODY	Orta Dünya Yörüngesi
PSA	Parça Stres Azaltma
RAHAT	Rafta Hazır Ticari
WQS	Windchill Quality Solutions
YGK	Yüksek Güç Komut

1. GİRİŞ

İnsanlık, varoluşundan beri, içerisinde bulunduğumuz dönemde teknolojik gelişme ivmesinin en yüksek olduğu dönemi yaşamaktadır. Gelişen teknolojilerin ortak özellikleri ise daha kompakt ve çevre dostu olmasıdır. Bu duruma, güneş enerjisi kullanımı, yeşil yakıt tüketiminin yaygınlaştırılması, küçülen bilgisayarlar gibi örnekler verilebilir. Uydu teknolojilerinde de benzer şekilde çevre dostu ve küçülmeye yönelik yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Küçük uyduların (small satellites, mikro uydular, küp uydular, nano uydular) geçmişi, ilk uydu kavramı ile eş zamanlı başlamıştır [1]. Ancak Rusya ve Amerika'nın uzay çağındaki yarışı, uzay araçlarındaki ivmeli gelişmeye sebep olmuştur. Bu gelişim sırasında ilk uydu olan ve aynı zamanda da küçük uydular kategorisine giren Sputnik 1 (82 kg) 4 Ekim 1957'de fırlatılarak uzayda insan eli ile yapılmış ilk nesne olarak yerini aldı. Ay'a insanlı görevler yapılmasına kadar süren bu yarış ile küçük uydular yerini hızlı bir şekilde insanlı görevlerde kullanılmak üzere devasa uzay araçlarına bıraktı. Uyduların haberleşme ve televizyon yayıncılığı için kullanılmaya başlanması ve uydulardan işlevsel beklentilerin artması da uydu boyutlarındaki artışa sebep oldu [1]. Mikro işlemciler, internet, güneş pilleri gibi teknolojide meydana gelen gelişmeler ile küçük uyduların tasarımı tekrar gündeme gelmeye başlamış ve şu an günümüzde popülerliğini devam ettirmektedir. Dünya genelinde 1990'lardan beri küçük uydular tekrar gündem olsa da bu uyduların ticari olarak kullanılmaya başlanması SpaceX firmasının Falcon 9 fırlatıcısında ikincil yükleri kabul etmesiyle ivmeli bir artış göstermiştir [1]. Ülkemiz küçük uydu sektörüne son zamanlarda aktif bir şekilde dahil olmaya başlamış ve bu durum, bu alandaki akademik çalışmaların gerekliliğini de doğurmuştur.

Uydular; yeryüzünde kullanılan sistemlerden, tamir edilemiyor olması ve çevre koşullarının çok daha zorlayıcı olması ile ayrışmaktadır. Bu durum uydulardaki güvenilirlik kavramını önemli kılmaktadır. Güvenilirlik, bir sistemin veya bileşenin belirli koşullarda ve sürede kendisinden beklenen görevi/performansı başarılı bir şekilde yerine getirebilme olasılığı olarak tanımlanır. Uzay sistemlerinde uygulanan güvenilirlik yaklaşımlarının belirlenmesinde geçmişte yaşanmış olan talihsiz olaylar önemli bir rol oynamıştır. 1986 yılında 7 kişilik mürettebatın hayatını kaybetmesiyle sonuçlanan Challenger ve 2003 yılında yine 7 kişilik mürettebatın hayatına mal olan Columbia kazaları bu olayların başlıca örneklerindendir [2].

Bu gibi kazalardan ve havacılıkta kullanılan güvenilirlik ve emniyet standartlarından da faydalanarak uzay standartları oluşturulmuş ve uzay araçları tasarımlarında kullanıma alınmıştır. Bu standartlar arasında Amerika menşeili NASA (National Aeronautics and Space Administration) ve Avrupa menşeili ESA (European Space Agency) standartları önemli bir rol almaktadır. Ülke bazlı olarak kullanılan farklı standartlar olmakla birlikte ülkemizde geliştirilen uydu projelerinde çoğunlukla bu iki kuruluşun standartları takip edilmektedir.

Bu standartlarda güvenilirlik disiplini kapsamında beklenen başlıca analizler ve aktiviteler benzerlik göstermekle beraber aşağıda Avrupa Uzay Ajansı standardı olan "ECSS-Q-ST-30C Dependability" [3] standardı bu analizleri başlıca şu şekilde sıralanır:

- Parça Stres (Derating) Analizi (sadece ekipman seviyesi uygulanabilirdir.),
- En Kötü Durum Analizi (sadece ekipman seviyesi uygulanabilirdir.),
- Güvenilirlik Tahmin Analizi,
- Arıza Tespit İzolasyon ve Kurtarma Analizi
- Hata Türü ve Etkileri Kritiklik Analizi.

Uyduda karşılaşılabilecek olası hatalara göre istatistiksel bir değer elde edilen Güvenilirlik Tahmin Analizi için uygulanabilir standartlar mevcuttur. Ancak, bu tezde değinileceği gibi bu standartlara göre yapılan hesaplama sonuçları ile uyduların kullanımında elde edilen veriler örtüşmemektedir [4]. Yukarıda listelenen analizler geleneksel uydulardaki gibi küçük uydularda kullanılabilir olsa da, küçük uydulardaki RAHAT (Rafta Hazır Ticari/Commercial Off The Shelf -COTS) ürün kullanımının tercih edilmesinin bu analizlerden özellikle güvenilirlik tahmin analizinin uygulamasında getirdiği bazı kısıtlar vardır.

RAHAT ürünler; bir ürünün geliştirme ve markete sürülme aşamasını takiben geri dönüşler doğrultusunda gerekli güncellemelerin yapılıp ticari satışa hazır hale gelmiş ve paketlenmiş (rafta hazır) yazılım veya donanım ürünleridir. Küçük uydu kategorilerinde tedarik ve geliştirme zamanından kazanç sağlayarak maliyet etkin çözümler elde etmek amacıyla RAHAT ürünlerin kullanımı tercih edilir. Eski tarihli çalışmalardan olan Demko ve Grumman'ın çalışmasında [5], RAHAT ürün kullanımlarının güvenilirlik üzerindeki olumsuz etkilerinden kaçınabilmek adına üretici seçimine dikkat edilmesi, kalifikasyon ve

güvenilirlik testlerinin uygulanması ve yukarıda listelenen güvenilirlik analizlerinin gerçekleştirilmesi yönünde önerilerde bulunmuştur. Bu çalışmada ayrıca MIL-HDBK-217F standardının RAHAT elektronik bileşenler üzerindeki uygulamasının kötümser bir yaklaşım sergileyerek daha düşük sayısal güvenilirlik sonuçları vereceğinden bahsetmiştir.

Güvenilirlik tahmin analizi bileşen seviyesinden sistem seviyesine doğru yapılan bir analizdir. Analizler alt sistem seviyesinden sistem seviyesine taşınırken matematiksel olarak çarpma yoluyla bir araya getirilir. Bu işlem gerçekleştirilirken yazılımsal ve yapısal bazı hataların ihmal edilebilir olduğu değerlendirilir. Yapılan bazı çalışmalarda da değinildiği gibi [3,5] göz önünde bulundurulmayan bu hatalar sistem seviyesinde beklenmedik hatalar ile karşılaşılmasına sebep olur.

Yukarıda listelenen; sayısal güvenilirlik değerinin doğruluğundaki şüphe, küçük uyduların ömrünün görece daha kısa olması ve küçük uydulardaki test süreçlerinin yüzeysel geçmesi gibi sebeplerden dolayı küçük uydulardaki güvenilirlik değeri, geleneksel uydulara göre azalma eğiliminde olup bu durumlar da uydulardaki erken kayıplara (infant mortality) sebep olur.

Sayısal güvenilirlik değerinin hesaplanmasına yönelik birçok yöntem/standart vardır. Bu standartlar başlıca; MIL-HDBK-217F, FIDES (Failure In Time/Duration Equivalent Standard), Telcordia SR-332, IEC 61508, ve diğerleridir. Bu standartlardan MIL-HDBK-217F; çoğu sistemde kullanılması tercih edilen askeri bir güvenilirlik tahmin standardı olup RAHAT bileşenler için bir çözüm sunmamakla birlikte 1995 yılından beri hiç revizyon atlamamıştır. Telcordia SR-332 standardı ise haberleşme sektöründe kullanılması tercih edilen ve genel bileşenler için yaklaşım sunan bir standarttır. IEC 61508 standardı güvenlik kritik sistemler için kullanılan bir standarttır. Telcordia SR-322 ve IEC 61508 standartları genel bileşenler için bir yaklaşım sunuyor olup, RAHAT bileşenler için ise özel bir yaklaşım sunmazlar. FIDES ise uygulama alanı uzayı da kapsayacak şekilde geniş bir yelpaze sunar. FIDES'in öncelikli amacı RAHAT ürünleri de değerlendiren bir güvenilirlik tahmini sunmaktır [6].

Tüm bu bilgiler ışığında, küçük uydularda yaygın olarak kullanılan RAHAT bileşenler için FIDES hesaplamasının en uygun hesaplama olacağı kanısına varılabilir. Bu durumun başlıca sebebi; diğer hesaplama standartlarında göz önünde bulundurulmayan ve güvenilirlik

değerinin saha verileri ile uyuşmamasına sebep olan yöntem hatası olabilecek kimyasal, mekanik, ısıl, radyasyon gibi etkenlerin göz ardı ediliyor olmasıdır. Bu durumda ise bir başka konu olan "Hatalar Mekaniği", (Physics of Failure - PoF), önemi bir rol oynamaya başlar. Hatalar Mekaniği; Elektriksel, Elektronik ve Elektromekanik (EEE) bileşenlerin belirli çevre koşulları içerisindeki davranışlarını doğrultusunda yaklaşık bir hata tahmin etmeyi sağlayan algoritmalar sunan bilimsel bir disiplindir [7]. Bunu yaparken de yukarıda listelenen kimyasal, mekanik, ısıl ve radyasyondan kaynaklanabilecek hataları da göz önünde bulundurur.

FIDES standardı Hatalar Mekaniği yaklaşımını baz alarak EEE bileşenler için diğer standartlardan farklı bir yaklaşım öne sunar. Bu yaklaşım doğrultusunda RAHAT bileşenler için daha gerçekçi sonuçlar elde edilebileceği çıkarımı yapılabilir.

Bu çalışma; örnek bir devre kartında bulunan elektronik bileşenlerin güvenilirlik değerinin FIDES 2009 ve MIL-HDBK-217F ile hesaplanıp sonuçlarının kıyaslanmasını içerir. Bu kıyaslama yapılırken bileşenlerin mevcut test verileri ile elde edilen sonucun kıyaslanması ile hangi yaklaşımın daha gerçekçi sonuçlar verdiğinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu değerlendirmelerin sonucunda küçük uydularda güvenilirlik tahmin analizi gerçekleştirilirken hangi standardın kullanılmasının daha gerçekçi sonuçlar verebileceğinin yanı sıra bu standartların sunduğu güvenilirlik değerindeki iyileştirici faaliyetlerin çeşitliliğini kapsayacaktır.

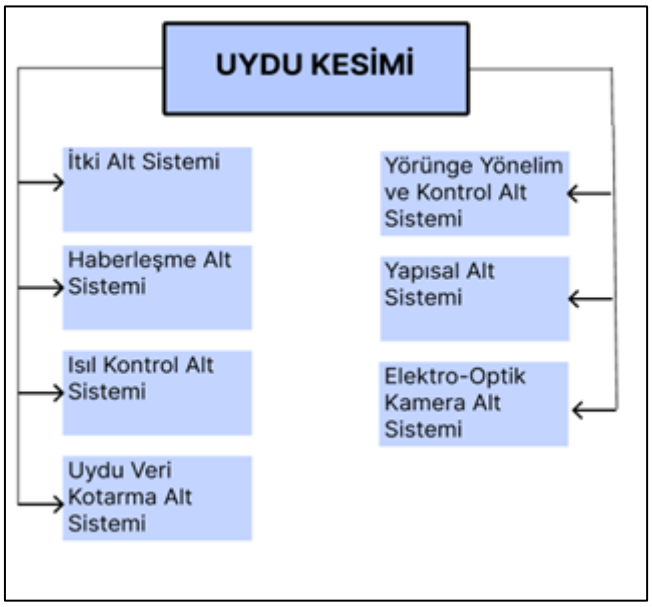
Tezin ikinci bölümünde; uydu sistemleri, uyduların yörüngeleri, uydu sistemlerinin geliştirme faaliyetlerinde model yaklaşımı, uyduların boyutlarına göre sınıflandırılması gibi konular ele alınmıştır. Bu başlıklar kapsamında, bu tezin konusu olan küçük uydular ve uydu konsepti hakkında bilgi verilmesi ve küçük uyduların tanımlanmasını hedeflenmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde ise güvenilirlik mühendisliği felsefesinden, matematiksel modellemelerinden ve uzay sistemlerinde uygulanan güvenilirlik analizlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca bu tezin konusu olan FIDES 2009 ve MIL-HDBK-217F standartlarındaki yaklaşımlar ve matematiksel modellemeler de bu bölümdeki "3.2.5 Güvenilirlik tahmin analizi" alt başlığında detaylandırılmıştır.

Tezin son bölümünde ise, örnek bir devre üzerinden her iki standart da kullanılarak güvenilirlik tahmin analizleri gerçekleştirilmiş ve her bir bileşen özelinde bu analizlerin sonuçları paylaşılmıştır.

2. UYDU SİSTEMLERİ

Uydu sistemleri yer kesimi ve uzay kesimi olmak üzere iki kesimden oluşur. Uzay/uydu kesimi, tamir edilemiyor olması ve radyasyon, ısıl ve mekanik açılardan zorlu çevre koşullarına da maruz kalmasından kaynaklı yer sistemlerine kıyasla daha yüksek güvenilirlik değerlerine sahip olması gereken bir kesimdir. Şekil 2.1'de uydu kesimi alt sistemleri görülmektedir.



Şekil 2.1. Uydu kesimi alt sistemleri

Bu alt sistemler; farklı görevleri yerine getirmekten sorumludur. Uydunun ana görevine bağlı olarak görev yükü olan alt sistem değişmekle birlikte, şekilde gösterilen uydu kesimi örneğinin görev yükü Elektro-optik Kamera Alt sistemidir. Diğer alt sistemler, görüntü çekiminin sağlanması ve indirilmesine yardımcı olmak amacıyla görev alır.

2.1. Uydu Yörüngeleri

Uydular için yörünge tanımı, Dünya'nın etrafında dönerek izlediği yol olarak yapılabilir. Uydular bu yolda, Dünya'nın yer çekimi kuvveti ve düzeltici manevra faaliyetleri sayesinde dengede kalırlar. Uydu yörüngeleri Avrupa Uzay Ajansı'nın internet sitesinde [8] aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

Alçak Dünya Yörüngesi (ADY)

Yeryüzünden yükseklik olarak 160 km ve 2.000 km arasına denk gelen yörüngedir. Buradaki uyduların yönü, yönelimi, izlediği yol farklılık gösterebilir. Yörüngenin sunduğu bu çeşitlilik sayesinde çoğunluklu olarak kullanılan yörüngelerdendir. Bu yörüngenin yeryüzüne en yakın yörünge olması sebebiyle yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek amacıyla kullanılan uydular bu bölgededir. Bu özelliklerinin yanı sıra bu yörüngede diğer yörüngelerdeki uydulara kıyasla daha sık ve hızlı geçişler yaşanır. Bu yörünge Nesnelerin İnterneti teknolojisi için kullanılması planlanan uydular için de uygundur. Bu yörüngedeki uydular yere yakınlığı sebebiyle görüntü ve internet erişimi konusunda iyi çözümler sunsa da aynı görevi yerine getirmekle sorumlu birden çok uydu gönderildiğinde kapsanan alan, geçiş sıklığı gibi konularda avantaj elde edilir. Bu durum da "Takım Uydu" konseptinin doğmasına sebep olmuştur.

Orta Dünya Yörüngesi (ODY)

2.000 km ile 35.786 km arasındaki yüksekliği kapsayan yörüngedir. Belirli bir yol izleme zorunluluğu olmaması yönüyle ADY ile benzerlik gösterir. Bu yörüngede küresel konumlama uyduları bulunur.

Dünya Eş-zamanlı Yörünge (DEY)

35.786 km yükseklikteki yörüngedir. Dünyanın ekvatoru üzerinde sabit bir noktada dünya ile eş zamanlı hareket eden uyduların yerleştirildiği yörüngedir. Dünya ile aynı hızda dönen yörüngedir. Dünyadan bakan bir gözlemci, bu yörüngedeki uyduları hareketsizmiş gibi görür. Bu özelliği sayesinde dünyada izdüşümü sürekli aynı bölgeyi kapsamı alanında tutabilir. Ayrıca yeryüzüne uzaklığı sayesinde kapsadığı alan oldukça geniştir. Bu durum haberleşme uyduları için avantaj sağlıyor olup bu yörüngede çoğunlukla haberleşme, hava durumu ve bazı askeri uydular kullanılır.

Güneş Senkron Yörünge (GSY)

200 ile 1.000 km arasındaki alana denk gelen yörünge yüksekliğindedir. Uydu, dünyanın her noktasından geçerken aynı yerel zamanda geçer. Bu sayede aynı bölgenin her defasında aynı

ışık koşullarında görüntülenmesi sağlanır. ADY'nin alt kategorisi olarak sayılabilecek bir yörünge çeşididir.

Sürekli kullanım dahilinde olmayan geçiş yörüngeleri "Transfer Yörüngesi" olarak adlandırılır ve uyduların bir yörüngeden başka bir yörüngeye taşınmasının sağlandığı yörüngedir. Pek sık kullanılan bir yörünge değildir.

Lagrange Yörüngesi olarak adlandırılan yörünge ise çoğunlukla bilimsel uzay araçlarının gönderildiği derin uzay araştırmalarında kullanılan noktalardan oluşan yörüngelerdir.

Küçük uydu konseptinin yaygınlaşması, aslında takım uydu konseptinin gelişmesi ile başlamıştır.

2.2. Uydu Sistemlerinde Model Yaklaşımı

Uyduların geliştirilme aşamasındaki model yaklaşımı; fırlatılacak olan uydu modeline kadar sıralı bir şekilde farklı modellerin geliştirilerek gereksinimlerin/tasarımın doğrulanmasının baz alındığı yaklaşımdır. Bu model yaklaşımı projenin bütçesi ve ihtiyaçlarına göre değişiklik göstermekle birlikte çoğunlukla aşağıda listelenen modellerden oluşur [9, 10, 11]:

Mühendislik prototip tahtası (Engineering bread board)

Modeller arasında en düşük maliyetli olacak olan modeldir. Bu model ile sistem işlevsel anlamda daha karmaşık hale gelmeden önce uzay kalifiye olmayan bileşenler ile temel fonksiyonların doğrulanması hedeflenir. Bu model sayesinde sistemdeki işlevsel gereksinimler tamamen karşılanana kadar değişiklikler gerçekleştirilebilir.

Mühendislik modeli

Fırlatılacak olan uçuş modeli ile işlevsel anlamda aynı olan modeldir, ancak bu modelde uzay kalifiye bileşenler ile ticari bileşenlerin karışımı olacak şekilde modeller tercih edilir. Bu aşamada sistemin kendinden beklenen işlevsel gereksinimleri karşıladığı, gerçekleştirilen testler ile doğrulanması hedeflenir.

Kalifikasyon modeli

Uçuş modelindeki bütün beklentileri karşılaması beklenen modeldir. Bu aşamada çoğunluklu olarak çevresel testlerle birlikte bir önceki aşamada kapsanmamış işlevsel testlerin gerçekleştirilmesi beklenir.

Uçuş modeli

Ürünün nihai halidir ve de aynı zamanda uzaya fırlatılacak olan modeldir. Kabul testleri ve belli işlevsel testler bu modelde de gerçekleştirilir.

Bu modellere uygulanması gereken testler ve bu testlerin süresi hakkında detaylı bilgi ECSS-E-ST-10-03, "Testing" [12] standardında detaylandırılmıştır. Bu testlerin artması ile uydunun nitel güvenilirliği artar. Her bir modelde görülen hatalar deneme yanılma yolu ile düzeltilerek, hataların bir sonraki modele aktarılması önlenir.

2.3. Büyüklüklerine Göre Uydu Sistemlerinin Sınıflandırılması

Uyduların boyutu tasarımın ilk aşamalarında belirlenir. Çünkü uydunun boyutu, uydu tasarım ve üretim maliyetlerinde, fırlatma seçeneklerinde, görev profilleri gibi konularda büyük bir rol oynar. Günümüzdeki teknolojik gelişmeler, daha fazla işlevi daha küçük birimlerle yerine getirmeyi hedeflemektedir. Bu durumun da uydu tasarım, üretim ve fırlatma maliyetleri başta olmak üzere birçok katkısı vardır. En önemlisi fırlatma maliyetlerinin büyük ölçüde düşmesidir. Yukarıda da bahsedildiği üzere küçük boyutlardaki uydular genellikle alçak yörüngede kullanılmak üzere geliştirilir. Bu durum; uydunun haberleşme konisine girdiği zaman ve tekrarın kısıtlı olmasına sebep olur. Fakat çoklu atılan küçük uydular (takım uydular) sayesinde bu geçiş sayısı artarak uydunun kullanım amacına bağlı olarak alınan verimin artmasına sebep olur.

Literatürde [13, 14], uydu boyutlarının sınıflandırılması için hem fikir olunamasa da, uyduların kütlelerine göre sınıflandırılması aşağıdaki gibidir.

- Femto Uydular: < 0.1 kg
- Piko Uydular: 0.1 - 1 kg
- Nano Uydular: 1 - 10 kg

- Mikro Uydular: 10 - 100 kg
- Mini Uydular: 100 - 500 kg
- Yaygın Uydular: 500 - 1000 kg
- Orta Büyüklükte Uydular: 1000 - 2500 kg
- Büyük Uydular: 2500 kg üzeri.

Bu çalışmanın konusu olan “Küçük Uydular” İngilizce’de Smaller Satellites (SmallSat) olarak isimlendirilmiş olan 500 kg ve altı uyduları kapsamaktadır.

3. GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİ

Güvenilirlik mühendisliği, sistemin kendisinden beklenen performansı belirlenmiş olan ömür içerisinde başarı ile yerine getireceğini teminat altına almayı hedefler. Bu teminat; tasarım ve üretim mühendislerini destekleyerek ve kalite teminatı aktiviteleri ile de senkronize olarak sağlanmalıdır [15,16]. Temel amaçlarından bir diğeri ise ürünlerde karşılaşılabilecek hataları öngörüp tasarımda gerekli önlemleri alarak maliyet etkin çözümler sunmaktır.

3.1. Güvenilirlik Mühendisliği Metodolojisi

Özellikle uzay sektörü gibi bakım ve tamir faaliyetlerinin uygulanabilirliğinin zor olduğu, güncel ve karmaşık teknolojiler ile donatılmış sistemlerde kritik öneme sahip olan güvenilirlik mühendisliği, sistemlerin başarısızlık riskini değerlendirerek performans gereksinimlerini karşılamak için stratejik tasarım ve test süreçleri sunar. Güvenilirlik mühendisliği disiplinin ele aldığı konular nitel ve nicel iki farklı kavram olarak değerlendirilmelidir.

Nicel kavramların odaklandığı konu hata oranları üzerinden ilerlemektedir. Güvenilirlik mühendisliğinin yapıtaşını oluşturan standartlardan biri olarak kabul edilen MIL-HDBK-338B, sistem seviyesinde atanmış olan sayısal güvenilirlik değerinin alt sistemlere tahsislendirilmesi, yedeklilik kavramlarının tanımlanması, tahsislendirilmiş değerlerin yedeklilik kavramları göz önünde bulundurularak doğrulanması gibi matematiksel modellemeleri içerir. Bu standart hata oranı kavramı üzerine yoğunlaşıp, hata oranlarını modellemelerinden bahsetmektedir [17].

Güvenilirlik Tahmin Analizi Raporu'nun bir parçası olarak, güvenilirlik hedeflerinin tahsisi için *Hedeflerin Uygulanabilirlik Tekniği* [17] kullanılır. Bu teknik, öncelikle mekanik-elektrik sistemler için tamir olmaksızın güvenilirlik tahsis etme yöntemi olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde alt sistem tahsis faktörleri, sistemin karmaşıklığı, teknik düzeyi, çalışma süresi ve çevresel koşulların sayısal derecelendirmelerine göre hesaplanır. Bu derecelendirmeler, mühendislik ekibinin deneyimlerine dayanarak tahmin edilir. Her derecelendirme 1'den 10'a kadar olan bir ölçekle yapılır ve sistem seviyesi sayısal güvenilirlik gereksinimi aşağı doğru değerler şu şekilde atanır:

Sistem karmaşıklığı

Karmaşıklık, sistemi oluşturan muhtemel parça veya bileşenlerin sayısı dikkate alınarak değerlendirilir ve bu parçaların veya bileşenlerin montaj karmaşıklığı da göz önünde bulundurulur. En az karmaşık sistem 1 olarak derecelendirilirken, oldukça karmaşık bir sistem 10 olarak derecelendirilir.

Teknolojik seviye

Mevcut mühendislik ilerleme durumu tüm alanlarda dikkate alınır. En az gelişmiş tasarım veya yöntem 10 değeri alırken, en yüksek derecede gelişmiş olan 1 değeri alır.

Performans süresi

Görev süresi boyunca sürekli çalışan bileşen 10 olarak derecelendirilirken, görev süresi boyunca en az süre çalışan bileşen 1 olarak derecelendirilir.

Çevre

Çevresel koşullar 10'dan 1'e kadar derecelendirilir. Çalışma sırasında sert ve çok zorlu çevre koşullarına maruz kalması beklenen bileşenler 10 olarak derecelendirilirken, en az zorlu çevre koşulları ile karşılaşması beklenenler 1 olarak derecelendirilir.

Derecelendirmeler, güvenilirlik mühendisi ve tasarım ekibi tarafından mühendislik bilgileri ve deneyimlerine dayanarak atanır. Her alt sistem için belirlenen dört derecelendirme çarpılarak alt sistem için genel bir derecelendirme elde edilir. Alt sistem derecelendirmeleri daha sonra toplamlarının 1 olması için normalize edilir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için kullanılan matematiksel eşitlikler aşağıdaki gibi paylaşılmıştır:

$$\lambda_S T = \sum_{k=1}^{L} \lambda_k T \tag{3.1}$$

$$\lambda_k = C_k \lambda_S \tag{3.2}$$

$$C_k = \frac{w_k}{W} \tag{3.3}$$

$$w_k = r_{1k} r_{2k} r_{3k} r_{4k} \tag{3.4}$$

$$W = \sum_{k=1}^{L} w_k \tag{3.5}$$

Burada;

λ_S: Sistemin toplam hata oranı (FIT),

T: Görev Süresi,

λ_k: Her bir alt sisteme tahsislendirilmiş hata oranı,

C_k: “k” alt sisteminin karmaşıklığı,

w_k: “k” alt sistemi için toplam ağırlık oranlar,

W: Bütün alt sistemlerin ağırlık oranlarının toplamı,

r_{ik}: Her bir alt sistem için yukarı bahsedilmiş dört faktörün ağırlığı,

L: Alt sistem sayısıdır.

Ayrıca bir başka yapı taşı standart olarak kabul edilebilen MIL-HDBK-217F standardı ise elektronik bileşenlerin doğası gereği yapabileceği hataları ve maruz kaldığı çevresel etkenler ile her bir bileşene özel değişkenlik gösterebilen başka parametreleri göz önünde bulundurarak, elektronik bileşenler özelinde hata oranlarının hesaplanmasında kullanılan bir standarttır. Bu standart gibi elektronik bileşenlerin hata oranları hesaplamalarında kullanılan Telcordia SR-332, ANSI/VITA 51.1, China’s GJB/z 299C, IEC 61508 [18] standartları da mevcuttur.

Güvenilirlik mühendisliğinin nitel tarafı ise parça stres azaltma, hata türleri etkileri ve kritiklik analizi gibi analizler ile tasarımda yapılması gereken değişiklikleri belirleyerek sayısal güvenilirliğin iyileştirilmesine yönelik analizlerden öncelikli olarak uygulananlarıdır.

Güvenilirlik mühendisliği disiplini bahsedilen bu analizler haricinde, ürünün geliştirilmesindeki kilometre taşlarının hepsinde gereksinim, yönetim süreçleri, alt yüklenici ve müşteri ile yürütülen güvenilirlik aktivitelerinin takibinde de rol alır.

3.2. Uzay Sistemleri Güvenilirlik Mühendisliği Analizleri

Güvenilirlik disiplini analizleri uygulandığı mühendislik sektörüne göre farklılık gösterebilir. Örnek olarak otomotiv sektöründe ISO 26262 ve FMVSS [19] gibi standartlar takip edilirken, havacılık sektöründe ARP 4754 ve ARP 4761 gibi standartlar kullanılır. Kullanılan standartlarda, ürünler için uygulanması önerilen analizler ve aktiviteler de farklılık gösterebilir. Bu çalışmanın odağında uzay alanındaki güvenilirlik yaklaşımları temel alınmış olup Avrupa Uzay Standartları (European Cooperation for Space Standardization - ECSS) tarafından uygulanması önerilen güvenilirlik analizleri de verilmiştir [3].

- Hata Türü ve Etkileri Kritiklik Analizi (HTEKA),
- Donanım-Yazılım Kesişim Analizi (HTEKA içerisinde de gerçekleştirilebilir),
- Hata Ağacı Analizi (HTEKA içerisinde de gerçekleştirilebilir),
- Ortak Sebep Analizi (HTEKA içerisinde de gerçekleştirilebilir),
- En Kötü Durum Analizi,
- Parça Stres Analizi,
- Arıza Tespit İzolasyon ve Kurtarma Analizi,
- Güvenilirlik Tahmin Analizi.

3.2.1. Hata türü ve etkileri kritiklik analizi (HTEKA)

ECSS-Q-ST-30-02C'ye göre [20] HTEKA, yani *Hata Türü ve Etkileri Kritiklik Analizi*, sistemdeki olası hata türlerini, bu arızaların etkilerini ve kritik seviyelerini değerlendiren sistematik bir analiz yöntemidir. HTEKA'nın amacı, bir sistemdeki tüm bileşenlerin veya

süreçlerin arıza olasılıklarını, bu arızaların sisteme veya görev başarısına olası etkilerini inceleyerek riskleri belirlemek ve azaltmaktır.

HTEKA, öncelikle Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) ile başlar; bu aşamada her bir bileşenin nasıl arızalanabileceği (hata türleri) ve bu arızanın sistem üzerindeki etkileri incelenir. HTEA'nın bir genişletilmiş versiyonu olan HTEKA, hata türlerinin göreve olan kritikliği ve arıza etkilerinin ağırlık derecesini de hesaba katar. Özellikle uzay ve uydu sistemlerinde HTEKA, güvenilirlik analizinin önemli bir parçası olarak kullanılır, böylece kritik bileşenlerde olası hatalar için önleyici tedbirler alınarak sistemin genel güvenilirliği artırılır.

HTEKA içinde donanım-yazılım kesişim analizi, donanım ve yazılım bileşenleri arasındaki etkileşimlerden kaynaklanabilecek hataları öngörmek ve değerlendirmek için yapılan bir çalışmadır. Bu analiz, donanım ve yazılım bileşenlerinin birbirini nasıl etkileyebileceğini anlamaya odaklanır. Özellikle küçük uydular gibi sistemlerde, donanım-yazılım uyumsuzlukları ciddi güvenilirlik ve performans sorunlarına yol açabileceği için bu kesişim analizi önemlidir.

HTEKA içeriğine dahil edilerek gerçekleştirilebilecek bir diğer analiz ise *Hata Ağacı Analizi*'dir. Hata Ağacı Analizi, tasarım ve geliştirme sürecine derinlemesine bir bakış sağlayarak potansiyel hata türlerinin kök nedenlerini ve bu nedenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini görselleştirmeye yardımcı olur. HTEKA, sistemdeki her bir bileşenin olası hata türlerini ve bu hataların etkilerini belirlerken, Hata Ağacı Analizi daha çok bu hatalara neden olan olayların hiyerarşik yapısını analiz etmek için kullanılır. Hata Ağacı Analizi, HTEKA'ya ek olarak kullanıldığında, sistemin hata türlerinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.

HTEKA'ya içeriğinde bulunabilecek son analiz ise *Ortak Sebep Analizi*'dir. HTEKA içerisinde Ortak Sebep Analizi gerçekleştirilmesi; birden fazla hata türünün aynı temel sebep veya olaydan kaynaklanabileceği durumları belirlemek için kullanılır. Bu analiz, sistemin güvenilirliğini artırmak amacıyla aynı anda birden fazla bileşeni veya süreci etkileyebilecek ortak nedenleri ortaya çıkarmak için uygulanır. HTEKA'ya Ortak Sebep Analizi'nin dahil edilmesi, aynı kök nedene dayalı riskleri belirlemeye ve iyileştirmelere yönelik daha odaklanmış stratejiler geliştirmeye yardımcı olur.

3.2.2. Parça stres azaltma (PSA)

ECSS-Q-ST-30-11C “Derating- EEE Components” [21] standardına göre PSA, elektronik bileşenlerin güvenilirliğini artırmak amacıyla nominal çalışma değerlerinin altında çalıştırılmaları anlamına gelir. Bu süreç, bileşenlerin maksimum çalışma sınırlarının (örneğin, voltaj, akım, güç gibi) belirli bir yüzdesi kadar düşürülmesi ile gerçekleştirilir. PSA, bileşenlerin termal yüklerini ve streslerini azaltarak arızalanma olasılıklarını düşürmeyi ve böylece sistem güvenilirliğini artırmayı amaçlar. ECSS-Q-ST-30-11C'ye göre [21] PSA kriterleri, uzay ve uydu uygulamalarında kullanılan bileşenlerin stres limitlerini tanımlamak için spesifik parametreler içerir. Bu analiz EEE bileşenlere uygulanabilir bir analiz olup sadece ekipman seviyesinde geçerlidir.

3.2.3. En kötü durum analizi

ECSS-Q-ST-30C [3] standardında tanımlanan En Kötü Durum Analizi (EKDA), bir sistemdeki veya bileşendeki en kötü durum koşullarını dikkate alarak performans sınırlarının doğrulanmasını amaçlayan bir analiz yöntemidir. EKDA, bileşenlerin veya sistemin tüm potansiyel değişkenlerini (sıcaklık değişimleri, voltaj varyasyonları, bileşen toleransları gibi) en uç değerlerde çalışacak şekilde değerlendirir. Bu analiz, bileşenlerin en kötü koşullarda dahi tasarım gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını doğrulamak için yapılır.

EKDA, özellikle uzay ve uydu sistemleri gibi zorlu çalışma ortamlarında, bileşenlerin belirlenen sınır değerleri dahilinde güvenle çalışmasını sağlamada kritik rol oynar. Bu analiz yöntemiyle tasarımın güvenilirliği ve performans sürdürülebilirliği sağlanarak, görev başarısına yönelik riskler en aza indirilmiş olur.

3.2.4. Arıza tespit, izolasyon ve kurtarma (ATİK) analizi

ATİK Analizi, bir sistemde oluşabilecek arızaların otomatik olarak tespit edilmesi, arızalı bileşenlerin izole edilmesi ve sistemin işlevini sürdürebilmesi için kurtarma stratejilerinin belirlenmesini amaçlayan bir süreçtir. Uzay sistemleri gibi kritik görev ortamlarında ATİK, güvenilirlik ve görev sürekliliğini sağlamak adına hayati önem taşır. ATİK analizinde üç temel aşama vardır.

Arıza tespiti

Sistem, sensörler ve tanılama algoritmaları kullanarak beklenmeyen davranışları veya performans sapmalarını algılar.

Arıza izolasyonu

Algılanan arızanın kaynağı belirlenir ve arızanın etkilediği bileşen veya alt sistem izole edilir.

Arıza kurtarma

İzole edilen arızaya yönelik kurtarma stratejileri uygulanır. Bu stratejiler, arızalı bileşeni devre dışı bırakmak veya yedek bir bileşeni devreye sokmak gibi yöntemleri içerir.

ATİK analizinin amacı, sistemin güvenilirliğini artırmak, arızaların yayılmasını önlemek ve görev performansının sürdürülebilirliğini sağlamaktır. Bu analiz yöntemi, özellikle insan müdahalesinin sınırlı olduğu uydu ve uzay sistemleri için kritik bir güvenlik ve operasyonel iyileştirme süreci olarak görülür.

3.2.5. Güvenilirlik tahmin analizi

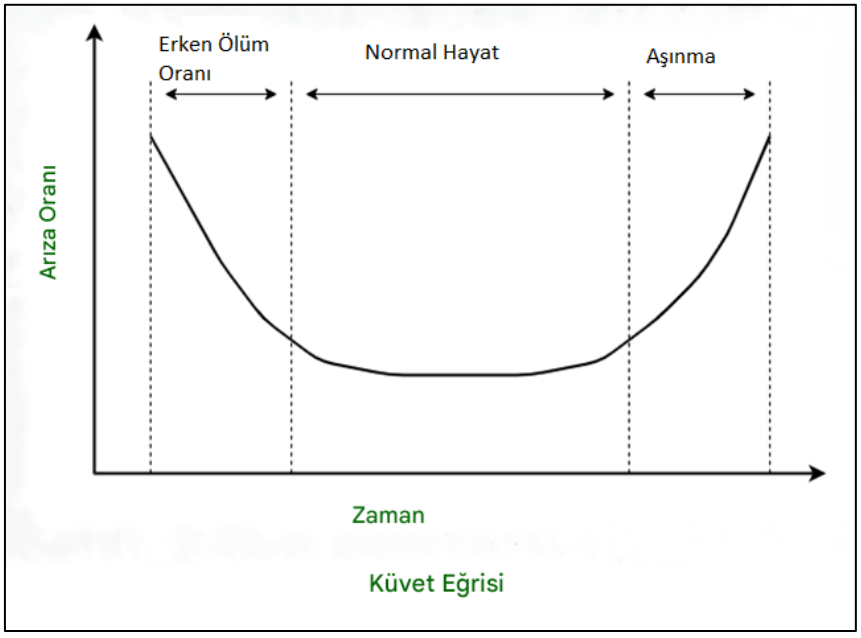
Güvenilirlik tahmin analizi, analizin gerçekleştirileceği sistemin her bir bileşenin hata oranlarını göz önünde bulundurarak sistemin çalışacağı çevre koşullarının da dahil edilerek operasyonel görev ömrü boyunca başarılı olma olasılığının elde edildiği analizdir. Güvenilirlik Tahmin analizinin başlıca hizmet ettiği iki husus vardır; ilki sistem için müşteri tarafından gereksinimler ile beklenen hedef güvenilirlik değerinin alt sistem ve ekipman seviyesindeki değerlerin birleşimi ile doğrulamasını sağlamak, ikincisi ise yapılacak hesaplamalar doğrultusunda elde edilecek güvenilirlik değeri doğrultusunda tasarımda gerekli güncellemeleri gerçekleştirmektir.

Hata oranı, bileşenlerin belirli zaman aralığında gerçekleştirdiği hataların sıklığını ifade eder. Uzay sistemlerindeki bileşenlerin hata oranları ifade edilirken 10^9 (1 milyar) saatte gerçekleşen hata miktarı olan FIT (Failure In Time) kullanılır. Güvenilirlik Tahmin

Analizlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan ve görev ömrü boyunca hata oranının değişimini gösteren küvet eğrisi güvenilirlik mühendisliğinde önemli yeri olan bir eğridir.

Küvet eğrisi 3 bölgeden oluşur. Bu bölgeler sırası ile Erken Ölüm, Faydalı Ömür ve Aşınma Bölgesi'dir (Şekil 3.1).

Erken Ölüm Bölgesi'nde görülen hatalar; sistemin görev ömrünün başında karşılaşılan hatalar olup, sebepleri üretim, kurulum ve tasarım kaynaklıdır. Buradaki hataların önüne geçebilmek fırlatmadan önceki test sayısının ve süresinin arttırılması ile mümkün olur [23]. Yapısal ve ısıl açıdan uydu sistemine uygulanabilecek olan testlerin aynı sıra Hızlandırılmış Ömür Testi ve "Burn-in Test" gerçekleştirilebilecek olan güvenilirlik testlerinden bazılarıdır. Hataların tespit edilmesi ve bu aşamada düzeltilmesi ile hata oranı giderek azaltılır. Bu aşama birden çok ürünün piyasaya sürüldüğü ve hataların giderildiğinin varsayıldığı sistemlerde söz konusudur. Uydu sistemlerinin model yaklaşımı doğrultusunda, bu tür hatalar yerdeki geliştirme aşamasında tamamlanıyor olarak kabul edilir.



Şekil 3.1. Küvet eğrisi [22]

Normal Hayat olarak gösterilen bölge ise sistemin hata oranının sabit olduğunun kabul edildiği, hataların rastgele olarak görüldüğü görev ömrü aşamasıdır. Uydu sistemlerinin güvenilirlik hesaplamaları yapılırken bu aşama temel alınarak sabit hata oranı olduğu varsayımı ile hesaplamalar gerçekleştirilir. Uydu sistemlerinde güvenilirlik mühendisliği

uygulanırken, Aşınma Bölgesi'ne kadar olan aşama asıl görev ömrü süresi olarak tanımlanmalı ve güvenilirlik analizleri ile uydu görev ömrü süresinin bu aşama başlamadan tamamlanmış olması teminat altına alınmalıdır.

Aşınma Bölgesi ise yaşlanma aşaması olarak da adlandırılabilir. Bu aşamada sistemde zamanla maruz kalınan çevresel, elektriksel, ısıl veya yapısal gibi streslerden kaynaklı hata oranı kademli olarak artış göstermeye başlar.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden de kaynaklı uydu sistemlerinde hata oranı sabit ve rastgele olarak kabul edilerek güvenilirlik tahmin analizleri gerçekleştirilir. Hata oranının sabit kabul edildiği faydalı ömür aşamasındaki güvenilirlik değeri (R) ise aşağıdaki formülde de gösterildiği gibi üstel bir fonksiyon ile ifade edilmektedir.

$$R = e^{-\lambda t} \tag{3.6}$$

Burada; t zaman, λ hata oranını ifade etmektedir. Bir sistem için güvenilirlik tahmin analizi gerçekleştirilirken öncelikle EEE bileşenlerin hata oranlarının hesaplanması veya ulaşılmış test verileri var ise bunları hesaplamaya katılması ile kart temelli toplam hata oranı hesaplanır. Devre temelli toplam hata oranının hesaplanması aşağıdaki formülde de gösterildiği gibi EEE bileşenlerin hata oranlarının toplamı ile elde edilir.

$$\lambda_T = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{3.7}$$

- λ_T: Devre temelli toplam hata oranını temsil eder.
- λ_i: Her bir bileşenin hata oranını temsil eder.
- n: Devredeki toplam bileşen sayısını ifade eder.

Burada elde edilen devre temelli hata oranları "Eş. 3.6" ile güvenilirlik değerini dönüştürülür. Her bir kart için güvenilirlik değerlerinin elde edilmesinin ardından kartların güvenilirlik değerleri çarpılarak ve yedeklilik yaklaşımları göz önünde bulundurularak toplam ekipmanın toplam güvenilirlik değeri elde edilir. Bu işlem aşağıdan yukarı doğru; EEE bileşenlerden kartlara, kartlardan ekipmanlara, ekipmanlardan alt sistemlere ve alt sistemlerden sistemin toplam güvenilirlik değerinin hesaplanmasına kadar devam eder.

Yedekliliğin olmadığı sistemler seri bağlı sistemler olarak ifade edilir. Bu sistemlerde birimlerden herhangi birinin kaybı sistemin kaybına denk gelir. Bu sistemlerin toplam güvenilirlik değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\mathrm{R} = R_1 \times R_2 \times \ldots \times R_k = e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_k)T} \tag{3.8}$$

Yedeklilik konseptinin hesaplamaya dahil edilmesi ise yedekliliğin sıcak (aktif) veya soğuk (pasif) olmasına göre matematiksel modeli değişir.

Soğuk yedeklilik

bir sistemdeki yedek bileşenlerin veya modüllerin, yalnızca ana bileşen arızalandığında devreye girecek şekilde yedeklenmesi anlamına gelir. Soğuk yedekli bileşenler normal çalışma sırasında kapalı veya pasif durumdadır; yani çalıştırılmazlar veya enerji almazlar. Bu yöntem, yedek bileşenlerin yalnızca gerektiğinde çalıştırılması sayesinde, yedek parçaların ömrünü uzatır ve enerji tüketimini düşürür. Eş. 3.8'de soğuk yedekli olan birimler içi kullanılan eşitlik verilmektedir.

$$R(t) = e^{-m\lambda_{on}t}\left[1 + \sum_{i=1}^{n-m} \frac{\left(1-e^{-\lambda_{off}t}\right)^i}{i!} \quad \prod_{j=0}^{i-1} j + m\left(\frac{\lambda_{on}}{\lambda_{off}}\right)\right] \tag{3.9}$$

Burada:

- λ_{on} : birim çalışırken hata oranı (FITs: 10^{-9} hata/saat),
- λ_{off}: birim kapalı durumdayken hata oranı (λ/10),
- n: özdeş yedekli birim sayısı,
- m: çalışan birim sayısını ifade etmektedir.

Sıcak yedeklilik; bir sistemdeki yedek bileşenlerin veya modüllerin ana bileşenle birlikte sürekli olarak çalışır durumda olduğu yedekleme türüdür. Sıcak yedekli bileşenler, ana bileşenle eş zamanlı olarak enerji alır ve aktif olarak çalışır, böylece ana bileşen arızalandığında yedek bileşen anında devreye girer ve sistemde kesinti yaşanmaz. Eş. 3.9 ile sıcak yedekli birimler için güvenilirlik hesaplaması yapılabilir.

$$R(t) = \sum_{i=0}^{n-m} C\binom{i}{n}\left(1 - e^{-\lambda t}\right)^{i}\left(e^{-\lambda t}\right)^{n-i} \quad (3.10)$$

Buradaki parametreler Eş. 3.6 ve Eş. 3.8'de paylaşıldığı üzere, t zaman, λ hata oranını, n özdeş yedekli birim sayısı, m çalışan birim sayısını ifade etmektedir.

Bu tez kapsamında tek bir devre üzerinden örnek bir güvenilirlik tahmin analizi gerçekleştirileceği için yedeklilik eşitlikleri kullanılmayacaktır. Bu eşitliklerin detayları hakkındaki bilgiye [17]'den ulaşılabilir.

Sistemin güvenilirlik değerinin hesaplanabilmesi için EEE bileşenlerin hata oranlarının test verileri ile bilinmesi veya hesaplanması gerekir. EEE bileşenler için hata oranlarını hesaplanmasına yönelik çeşitli standartlar mevcuttur. Bu standartlar ECSS-Q-HB-30-08A "Components Reliability Data Sources and Their Use" [24] el kitabında Çizelge 3.1'deki gibi listelenmiştir.

Uydu sistemlerinde gerçekleştirilen güvenilirlik tahmin analizlerinde çoğunlukla MIL-HDBK-217F standardı kullanılır. Son güncellemesi 1995 yılında gerçekleştirilmiş bu standart her ne kadar yıllarca güvenilirlik tahmin analizi için kullanılmış olsa da gelişen teknoloji ve sektördeki yaklaşımlar ile geçerliliği giderek azalmıştır. Kullanıldığı durumlarda elde edilen sonuçlar ile saha verilerinin uyumsuzluğu bazı çalışmalar ile de gösterilmiştir [25].

Çizelge 3.1. Uzay sistemlerinde kullanılması önerilen güvenilirlik tahmin standartları/el kitapları

Standart/El Kitabı	*Yayım*
AT&T Reliability Manual	Van Nostrand Reinhold
FIDES (UTE C 80-811)	FIDES Group
HRD5	British Telecommunications
IEEE Gold Book	IEEE Gold Book Group
IRPH	ITALTEL (Italian Telecommunications Company)
MIL-HDBK-217	USA Department of Defense
PRISM (RAC / EPRD)	Reliability Analysis Center
RDF2000 (IEC-62380-TR)	UNION TECHNIQUE DE L'ELECTRICITE
Siemens SN29500	Siemens
Telcordia SR-332	Telcordia Technologies

Standartlar göz önünde bulundurulduğunda FIDES standardı güvenilirlik tahmin ve güvenilirlik süreç kontrolü olmak üzere sunduğu iki farklı yaklaşım ile diğer standartlardan ayrışır. Bu yaklaşımı sayesinde RAHAT ürünlerin oranın yüksek çıkmamasına sebep olarak daha gerçekçi sonuçlar sunar. Örnek olarak; uzay alanındaki güvenilirlik hesaplamalarında tarihçe önemli bir yer oynar ve FIDES hata oranı hesaplamalarında bunu göz önünde bulundurur.

Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere geleneksel uyduların aksine küçük uydularda uzay kalifiye bileşenler yerine RAHAT ürünler tercih edilmektedir. RAHAT ürünler ile kalifikasyonları arasında önemli bir bağlantı vardır, ancak bu bağlantı, ürünü nerede ve nasıl kullanacağına bağlı olarak değişir. RAHAT ürünlerin kalifikasyon durumu, ürünün ticari olarak hazır olması ve geniş çapta kullanılabilirliği nedeniyle genellikle kullanıcıların belirli uygulamalar için ekstra değerlendirmeler yapmasını gerektirebilir.

RAHAT ürünler farklı kalifikasyonlara tabi tutulmuş, kullanıcıdan gelen geri bildirimler doğrultusunda satışa hazır halde rafta bekleyen ürün olarak değerlendirilebilir. Tanımı gereği kalifikasyonları doğrultusunda Uzay RAHAT, Otomotiv RAHAT, Askeri RAHAT vb. gibi nitelendirilmektedirler. Ancak bu tez çalışması uzay kapsamında kullanılacak olan bileşenlerin güvenilirliklerine odaklandığından ve bu kalifikasyon kategorilerinin arasında en zorlusunun uzay olmasından; uzay kalifiye bileşenler haricindeki bileşenler RAHAT olarak kabul edilecektir.

RAHAT ürünlerin uzay uygulamalarında kullanılmadan önce ek testlere tabi tutulması gerekebilir. Çünkü bu uygulamalarda daha katı güvenilirlik, dayanıklılık ve uzun ömür gereksinimleri vardır. Bu tür durumlarda, RAHAT ürünlerin özel kalifikasyon süreçlerinden geçmesi gerekir. Bir bileşeni uzay kalifiye olabilmesi için tamamlaması gereken testler oldukça fazladır. Küçük uydulardaki yaklaşımda bu maliyeti azaltmak için otomotiv veya ticari standartlara uygun kalifiye edilmiş bileşenler kullanılır. Bu durum ise bu bileşenlerin uzay ortamının çevresel koşullarına uygun olup olmadığının test edilmemesini beraberinde getirir.

Ancak RAHAT ürünlerin maliyetleri düşürmek için kullanıldığını göz önünde bulundurunca yapılacak olan ek testler (çoğunlukla çevresel testler olup örnek olarak titreşim, şok, ısıl

vakum halkası testi, radyasyon testi gibi testler) de yine maliyeti arttıran çözümlerden olduğu için tercih edilmezler. Bu durumda güvenilirlik test verileri veya analizleri devreye girer.

Bazı RAHAT bileşenlerin güvenilirlik test verileri üretici firmalar tarafından gerçekleştirilip kullanıcı firmaya sağlıyor olsalar da test sonuçlarına sahip bileşenler oldukça sınırlıdır. Özellikle; görece daha basit olan kondansatör, direnç vb. bileşenler için testler gerçekleştirilmemektedir. Bunun başlıca sebebi; bu bileşenlerin hata oranlarının zaten oldukça düşük olması ve literatürdeki standartların da bu bileşenler için aşağı yukarı benzer sonuçları vermesidir. Ancak mikro devre sınıflandırmasına girebilecek görece karmaşık bileşenler için hem standartların bazı durumlarda yetersiz kalması hem de standartlar arası hesaplamalardaki farklılıklar, bu bileşenler için güvenilirlik testlerinin gerçekleştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur.

Ancak hali hazırda güvenilirlik testi gerçekleştirilmemiş bileşenler için güvenilirlik test düzeneğini oluşturmak oldukça maliyetli ve zaman alıcıdır. Bu sebeple güvenilirlik tahmin analizi gerçekleştirilirken test verileri mevcut olan bileşenlerin test verileri hesaplamaya dahil edilirken, test verisi olmayan bileşenler için MIL-HDBK-217F, FIDES gibi standartlar kullanılır.

Bu çalışmada MIL-HDBK-217F'e alternatif olarak FIDES standardının seçilmesinin sebebi budur.

Bu düşüncenin bir başka dayanağı ise RAHAT bir bileşen olan CSD18511KCS parçasının MIL-HDBK-217F ile hesaplanmış hata oranı değeri ile FIDES 2009 ile hesaplanmış hata oranı verileri kıyaslandığında, FIDES 2009 ile elde edilen hata oranı değerinin bileşenin güvenilirlik test verisine daha yakın sonuçlar sunmuş olmasıdır [26]. Çizelge 3.2'de bu bileşenin test verisine ilişkin değerleri görülmektedir. Bu tarz güvenilirlik testleri ile birden çok bileşenin uzun süreler ve belirli sıcaklık değerlerindeki hata sayısını göz önünde bulundurarak bir hata oranı hesaplanması hedeflenir.

Çizelge 3.2. TI firması CSD18511KCS test sonuçları [26]

Parça Numarası	Hata Oranı (FIT)	Kullanım Sıcaklığı (°C)	Test Sıcaklığı (°C)	Test Süresi (saat)	Örneklem Sayısı	Hata Sayısı
CSD18511KCS	2,3	55	125	1000	5159	0

Yukarıda paylaşılan test sonuçları Texas Instruments (TI) firmasının CSD18511KCS bileşeni için yaptığı güvenilirlik testinin sonuçlarıdır [27]. Bu test için 5.159 adet bileşen 1.000 saat boyunca çalıştırılarak 2,30 FIT hata oranı elde edilmiştir. Bu değerlerin doğruluğu örneklem sayısının artması ile artar. Uzay kalifiye bileşenlerin ve test ortamının maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda güvenilirlik testlerinin bileşen üreten firmalarda uygulanması makul bir durumdur.

Bu bileşenin hata oranı FIDES 2009 ve MIL-HDBK-217F kullanılarak hesaplandığında ise; FIDES 2009 ile elde edilen sonuç 2,31 FIT olup MIL-HDBK 217F ile elde edilen sonuç 446,59 FIT'tir.

Analizlerin doğruluğunun değerlendirilebileceği bir diğer veri ise saha verileridir. Ancak uyudu üreticisi çoğu firma yörüngede karşılaştığı hataların neler olduğu verisini paylaşmaktan imtina ederler.

Bu sebeplerden dolayı yapılacak olan çalışmada test veya saha verisi gibi gerçek bir veri ile kıyaslama sunulamayacak olsa da FIDES ve MIL-HDBK-217F standartlarının güvenilirlik tahmin analizi hesaplamalarında kullandıkları yaklaşımlar kıyaslanacak ve küçük uydular için hangisinin uygulanmasının daha gerçekçi sonuçlar verebileceği değerlendirilecektir.

Güvenilirlik tahmin analizinde MIL-HDBK-217F yaklaşımı

Çoğu sektörde halen uygulanan MIL-HDBK-217F "Reliability Prediction of Electronic Equipment" [28] standardı uydu sektöründe de çoğunlukla kullanılan güvenilirlik hesaplama yöntemlerinden biridir. Amerika Birleşik Devletleri'nin üretici firmaların test verilerinden, literatür bilgilerinden ve Amerikan askeri bakım verilerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur.

Standartta hata oranı hesaplamaları için iki yaklaşım sunulmuştur. Bunlardan ilki "Parts Count" olarak adlandırılmakta olup projenin başında, henüz kullanılacak olan bileşenler netleşmemişken genel bir hesaplama yapmak için kullanılması önerilmektedir. Bu yaklaşımda her bir bileşen türünden kaç adet kullanılacağı bilgisi ile doğruluğu daha az bir hesaplama sonucu elde edilir. Diğeri ise "Part Stress" olarak adlandırılan analizin gerçekleştirileceği birimdeki her bir bileşen için hata oranı hesaplaması gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, proje neredeyse tamamlanmak üzere veya tamamlanmışken uygulanır. Parça Stres yöntemi ile yapılan hesaplamalardan elde edilecek sonuçlar daha gerçekçi olmakla birlikte çoğunlukla daha düşük güvenilirlik değerlerinin elde edildiği çalışmalardır.

EEE bileşene göre değişmekle birlikte, genellemek gerekirse MIL-HDBK-217F'te belirtilen hata oranı aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir.

$$\lambda = \lambda_b \Pi_Q \Pi_E \Pi_T \Pi_A \Pi_R \Pi_C \Pi_S \tag{3.11}$$

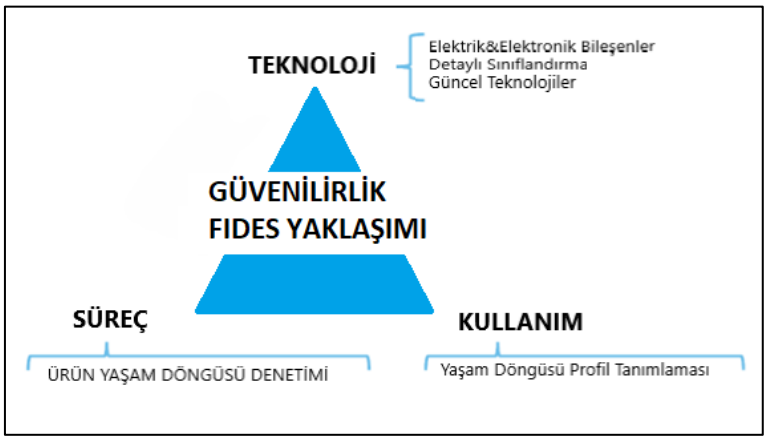
Eşitlikte kullanılan λ parametresi bileşenin toplam hata oranını ifade etmektedir. λ, bileşenin 10^6 saatteki görülen hata sayısını ifade etmektedir. Bu değer FIT ($1/10^9$ saat) cinsine çevrilmek istendiğinde 1.000 sayısına bölünmelidir. λ_b (base failure rate) EEE bileşenin doğası gereği göstereceği hataları ifade etmektedir. Bu değer her bir bileşen için farklılık gösterir. Π_Q ve Π_E parametreleri bütün bileşenler için sabit olsa da diğer parametrelerin formüle dahil bileşenler açısından hata oranı üzerinde etkisi olup olmamasına göre değişmektedir. Π_Q kalite faktörüdür ve bileşenin üretim süreçleri boyunca uyduğu spesifikasyonlara göre belirlenir. Π_E ise çevresel faktörü ifade etmekte olup bileşenin kullanılacağı ortama göre belirlenmektedir. Uzay ortamı bu faktörün değerinin en düşük olduğu faktördür. Π_S ; elektriksel stres değerini ifade eden faktördür. Π_T ; sıcaklık değerinin yarattığı stresi ifade eden faktördür. Π_C ; bağlantı yapıları için belirlenen faktördür, örnek olarak metalurjik olmasına veya olmamasına göre değişkenlik gösterebilir. Π_A ; uygulama faktörüdür. Örnek olarak diyotlarda, gerilim kontrolü veya katlayıcı görev görmesine göre değişkenlik gösterebilir. Π_R ; güç değerini ifade eden faktördür. Bileşenin çalıştığı güç aralığına göre farklı değerler alabilir.

Güvenilirlik tahmin analizinde FIDES 2009 yaklaşımı

FIDES Guide 2009 Edition A “Reliability Methodology for Electronic Systems” standardı [29] 2009 yılında oluşturulup, Eylül 2010’da yayınlanmıştır. Airbus, Thales, Eurocopter, Nexter Electronics ve MBDA firmalarının ortak çalışması ile oluşturulmuş Avrupa menşeili hata tahmin standardıdır. Standardın son versiyonu 2023 yılının sonunda yayınlanmış olmasına rağmen tezdeki güvenilirlik hesaplamasında kullanılacak olan Windchill Quality Solutions (WQS) 12.0 uygulamasında FIDES için son hesaplama yönteminin 2009’daki versiyonu ile uyumlu olmasından kaynaklı 2009 versiyonu kullanılmıştır.

FIDES’in kullandığı hesaplama modellemesinde üretici ve kullanıcı firmaların süreçleri, elektronik bileşenin kalite faktörü, güvenilirlik faktörü ve benzeri birçok faktörü mevcut olup hesapta ele alınan parametreler elektronik bileşenin türüne göre farklılık gösterir. FIDES bu üçlü yapıtaşından oluşan yaklaşımı Şekil 3.2’deki gibi açıklamaktadır.

FIDES bu yaklaşımı ile Hatalar Mekaniği (Physics of Failure /PoF) prensibini temel alarak iyileştirme süreçlerine daha çok dahil edilebilecek sonuçlar sunmayı hedeflemiştir. Hatalar Mekaniği ile sistem sayısal güvenilirlik değerinin hesaplanmasının yanı sıra, sistemde görülen hataların fiziksel mekanizmalarını anlamak, tasarım iyileştirmeleri hakkında bilgi sunmak, bakım stratejilerinin optimize edilmesi gibi nitel yaklaşımları da sunmayı hedefler.



Şekil 3.2. FIDES güvenilirlik yaklaşım diyagramı [30]

Hatalar Mekaniği, geleneksel istatistiksel modelleme yöntemlerinden farklı olarak, arızaların nasıl ve neden gerçekleştiğini fiziksel süreçler üzerinden ele alır. Bu analiz, özellikle elektronik bileşenlerin güvenilirliği üzerinde detaylı bir bakış açısı sunar.

Hatalar Mekaniği yaklaşımı, arızaların oluşma nedenlerini, örneğin ısıl, mekanik veya kimyasal stres gibi fiziksel stres faktörlerini dikkate alarak analiz eder. Bu, bileşenlerin nasıl ve hangi koşullarda arızalanabileceği konusunda daha hassas öngörüler sağlar.

Arızaların temel nedenlerini anlamak, tasarım aşamasında bu nedenlere yönelik önleyici tedbirlerin geliştirilmesi Hatalar Mekaniği'nin tasarıma bir başka katkısıdır. Bu sayede, sistemin yaşam döngüsü boyunca daha yüksek güvenilirlik elde edilir.

Hatalar Mekaniği, bileşenlerin kullanım ömrünü daha doğru tahmin etmede etkilidir. Arıza mekanizmaları detaylı bir şekilde incelendiğinden, sistemlerin ömrünü etkileyen faktörler belirlenebilir ve gerçekçi ömür tahminleri yapılabilir.

Hatalar Mekaniği yaklaşımı, hangi koşullar altında test yapılması gerektiğine dair bilgi verir ve böylece test süreçlerinin daha etkili olmasını sağlar. Bu sayede gereksiz testlerin önüne geçilir ve maliyetler optimize edilir.

Hatalar Mekaniği, sistemlerin güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda maliyetlerin de düşürülmesine yardımcı olabilir. Arızaların fiziksel sebepleri anlaşıldığında, bu arızaların önüne geçecek daha az maliyetli tasarım ve üretim çözümleri geliştirilebilir. FIDES'teki matematiksel genel modelleme ise Eş 3.11'deki gibi verilir.

$$\lambda = \lambda_{Fiziksel} \Pi_{PÜ} \Pi_{SÜreç} \tag{3.11}$$

Eşitlikte belirtilen λ bileşenin toplam hata oranını temsil etmektedir. MIL-HDBK-21F'tekine benzer olarak λ, bileşenin 10^6 saatteki hata sayısını ifade etmektedir. $\lambda_{Fiziksel}$ ise MIL-HDBK-217F'teki benzer olup bileşenin doğasından gelen hata oranlarını temsil etmektedir. $\Pi_{PÜ}$; bileşenin (parça üretme) üretim süreçleri üzerinde kalite ve teknik kontrollerin değerlendirildiği parametredir. Son parametre olan $\Pi_{Süreç}$ parametresi ise üretici ve kullanıcı firmaların tasarım, üretim ve geliştirme süreçlerinin değerlendirildiği parametredir.

FIDES 2009 ile MIL-HDBK-217F'in kıyaslanması

Yukarıda listelenen matematiksel modellemelerden de tahmin edilebileceği üzere bu iki standart arasındaki bariz fark ele aldığı parametre sayısıdır. FIDES'in bu formülasyonu sayesinde elde edilecek olan sonuçların gerçek veriler ile daha uyumlu olması beklenir.

Ayrıca FIDES sunduğu yaklaşım kapsamında, üretici firmanın uyduğu kalite standartlarından kullanıcı firmanın ürünü kullanırken uyacağı süreçler ve standartları da göz önünde bulundurarak çok disiplinli bir yaklaşım sunmaktadır.

FIDES'in MIL-HDBK-217F'ten bir diğer ve en büyük farkı ise Hatalar Mekaniği olarak adlandırılan yaklaşımı temel almasıdır. Malzemelerin ve bileşenlerin fiziksel özelliklerine ve maruz kaldıkları çevresel ve operasyonel gerilimlere dayanarak arızaların nasıl meydana geldiğini anlamayı ve tahmin etmeyi amaçlayan bir güvenilirlik mühendisliği yaklaşımıdır. Geleneksel güvenilirlik yöntemlerinden (örneğin, MIL-HDBK-217F gibi, daha çok istatistiksel verilere dayanan) farklı olarak, Hatalar Mekaniği, arızaların neden meydana geldiğini açıklamak için, ısıl, mekanik, elektriksel veya kimyasal gibi çeşitli gerilimlerin malzeme üzerinde nasıl bozulmalara ve nihai arızalara yol açtığını inceler. Üretici firmalar çoğunlukla, maliyet etkin çözümler sunmak adına RAHAT bileşenlerin güvenilirlik değerlerini hesaplamaz veya test etmezler. Hatalar Mekaniği'nin sadece istatiksel arıza oranlarına dayanmasından ziyade arızaların neden meydana geldiğini anlamaya yönelik yaklaşımı sayesinde, mühendisler hataların fiziksel nedenlerini ele alarak güvenilirliği iyileştirmeye yönelik çözümler sunarlar. Hatalar Mekaniği, mühendislerin arızaları tahmin etmesini ve önlemesini sağlayan, fiziksel nedenlere dayanan ileriye dönük bir güvenilirlik yaklaşımıdır. FIDES ise bu yaklaşımın temel alındığı güvenilirlik standartlarının başında gelir. Kullanılan matematiksel modellemeler ısıl, elektriksel ve mekanik aşırı stres durumları için literatürdeki Hatalar Mekaniği matematiksel modellemelerine uygun oluşturulmuştur.

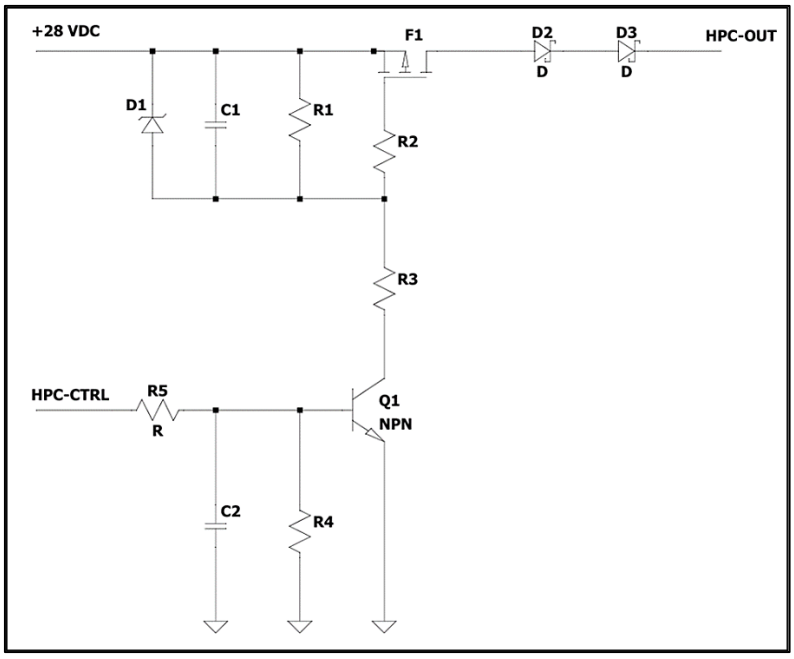
4. ÖRNEK DEVRE ÜZERİNDEN GÜVENİLİRLİK TAHMİN ANALİZİ

Uydularda veya genel olarak sistemlerde güvenilirlik tahmin analizi EEE bileşen seviyesindeki hata oranı hesaplamasından başlayarak devrelerin güvenilirlik analizinin hesaplanmasına, devrelerden ekipmanlara, ekipmanlardan alt sistemlere ve son olarak alt sistemlerden sistem seviyesi güvenilirlik değerinin hesaplanmasına doğru gider. Bu sebeple bu çalışma kapsamında örnek bir devrenin FIDES 2009 ve MIL-HDBK-217F standartları ile güvenilirlik tahmin analizinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

4.1. Örnek Devre

Güvenilirlik tahmin analizi hali hazırda tasarlanmış olan bir devrenin güvenilirliğini hesaplamak amacıyla yapılır. Bu tez kapsamında güvenilirlik analizi gerçekleştirilecek olan devre bir Yüksek Güç Komut (YGK) devresidir. YGK devreleri, yüksek güç gereksinimi olan yüklerin güvenli ve kontrollü bir şekilde açılıp kapanmasını sağlayan devre yapısıdır. Bu devreler, genellikle uydu ve uzay sistemlerinde veya savunma uygulamalarında yüksek güçlü alt sistemlerin kontrol edilmesinde kullanılır. YGK devreleri 22 V ile 29 V arasında değişen gerilim kaynaklarını girdi olarak alır.

YGK devreleri, yüksek akım ve gerilimleri kontrol edebilmek için güç yarı iletkenleri (MOSFET, IGBT) ve bazen röleler kullanarak tasarlanır. Bu devreler, komut veya sinyal aldığında belirli bir yükü devreye bağlar veya devreden çıkararak, uydunun yüksek güç tüketen veya emniyet güvenilirlik gereksinimlerine göre kritik olarak belirlenmiş ekipman veya alt sistemi açıp kapatmak amacıyla kullanılır. Devre, aynı zamanda aşırı akım ve kısa devre durumlarında da koruma sağlar. Örnek bir YGK devresinin şeması Şekil 4.1’de verilmektedir. Bu devre için kullanılan EEE bileşenler ise Çizelge 4.1’de listelenmiştir.



Şekil 4.1. Örnek YGK devresinin şeması

Çizelge 4.1. YGK devresindeki EEE bileşenler

Tanımlayıcı numara	*Test verisi mevcut ise Hata Oranı (FIT)*	*Parça değerleri*	*Üretici firma*
R1	-	47 KΩ	Yageo
R2	-	10R	Yageo
R3	-	100 KΩ	Yageo
R4	-	100 KΩ	Yageo
R5	-	1 KΩ	Yageo
C1	-	100 pF/50V	Murata
C2	-	10 pF/50V	Murata
D1	0,26 FIT	8.2V (Zener Diyot)	Onsemi
D2	0,13 FIT	70 V (Schottky Diyot)	Onsemi
D3	0,13 FIT	70 V (Schottky Diyot)	Onsemi
F1	3,49 FIT	40 V P-Channel MOSFET	Onsemi
Q1	3,13 FIT	40 W (NPN Transistor)	Onsemi

Bu bileşenlerin seçiminde özellikle dikkat edilen husus RAHAT bileşenler olmalarıdır. Sebebi ise küçük uydulardaki RAHAT bileşen kullanım tercihidir. Dirençler ve kondansatörlerin pasif bileşenler olması ve bu durumun beraberinde getirdiği düşük hata oranı sebebiyle firmalar bu bileşenler için test gerçekleştirmezler. Ancak diyot veya transistör gibi aktif ve görece daha karmaşık bileşenler için test verileri gerçekleştirilir. İnternet sitesinden güvenilirlik test verilerine ulaşılabilecek bir firma olması sebebiyle aktif bileşenler için Onsemi [31] firmasının bileşenleri seçilmiştir.

4.2. Örnek Devrenin FIDES 2009 ile Güvenilirlik Hesaplaması

FIDES 2009'a uygun olacak şekilde bir hesaplama gerçekleştirilmesi için öncelikle bazı değerlerin hesaplanması gerekir. Bu değerler WQS uygulamasının da girdi olarak kullandığı parametrelerdir. Öncelikli olarak temel Hatalar Mekaniği formülünden ilerlemek gerekir.

$$\lambda_{Fiziksel} = [\sum_{Fiziksel_faktör}(\lambda_0 \times \Pi_{Hızlanma})] \times \Pi_{Indirgenme} \quad (4.1)$$

Burada bahsedilen λ_0; belirli koşullar altında, belirli bir teknoloji için referans hata oranlarını ifade etmektedir. Gerçekleştirilecek olan analiz kapsamında bu değer, WQS uygulamasının veri tabanında mevcut olup sisteme ayrıca girilmesine gerek yoktur.

$\Pi_{Hızlanma}$ ise Hatalar Mekaniği matematiksel modellemelerinin kapsandığı parametredir. Bu parametre için; ısıl, elektriksel, mekanik, nem, kimyasal, ısıl çevrim oranı gibi birçok parametreyi bileşenin teknolojisi ve malzemesine göre hesaplamaları içerir. Burada kullanılan matematiksel modellemelere örnek vermek gerekirse; ısıl için Arrhenius, mekanik için Basquin, nem için Hallberg-Peck, ısıl çevrim oranı için Norris-Landzberg gibi matematiksel modellemeler kullanılır [32]. $\Pi_{Hızlanma}$ parametresi de WQS uygulaması veri tabanında mevcut olup bu parametre için kullanıcıdan herhangi bir girdi beklenmez.

Bu durumda WQS uygulamasına girdi olması adına sadece $\Pi_{Indirgenme}$ faktörünün hesaplanması gerekir. Bu parametre; en iyi 1 olacak, en kötü 100 olacak şekilde 1-100 aralığında değerler alır. Bu faktör; ısıl, mekanik ve elektriksel açıdan hesaplamanın yapılacağı birimin maruz kaldığı aşırı stresi ifade eden bir faktördür ve aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$\Pi_{Indirgenme} = (\Pi_{Yerleşim} \times \Pi_{Uygulama} \times \Pi_{Sağlamlık})^{0,511 \times \ln(C_{\text{hassaslık}})} \quad (4.2)$$

WQS aracı sayesinde buradaki 3 parametrenin girilmesi ile $\Pi_{Indirgenme}$değeri uygulama tarafından hesaplanabilir. Bu 3 parametre, güvenilirlik tahmin analizi gerçekleştirilecek olan devrenin işlevleri, maruz kalacağı çevre koşulları, kullanıcı ve üretici firma bilgilerine göre FIDES tarafından belirlenmiş olan kriterler doğrultusunda hesaplanır. Bu 3 parametreden ilki $\Pi_{Yerleşim}$ parametresi; ürünün bulunduğu pozisyonu ve arayüzlerinin değerlendirildiği

parametredir. $\Pi_{Yerleşim}$ için değer ataması Çizelge 4.2 ile uyumlu olacak şekilde gerçekleştirilir.

Çizelge 4.2. $\Pi_{Yerleşim}$değeri ataması

Devrenin İşlevi	$\Pi_{Placement}$
Sayısal arayüz sağlamayan işlev	1,0
Sayısal arayüz sağlayan işlev	1,3
Analog düşük seviye arayüz sağlamayan işlev	1,2
Analog düşük seviye arayüz sağlayan işlev	1,5
Analog güç arayüz sağlamayan işlev	1,3
Analog güç arayüz sağlayan işlev	1,8

YGK devresinin hangi işleve denk geldiğini bulmak için FIDES'te şu şekilde bir bilgilendirme mevcuttur.

- Analizinin gerçekleştirileceği devre iki sistem arasındaki bağlantıyı sağlamakla yükümlü ise arayüz sağlayan olarak kabul edilmelidir.
- Analizinin gerçekleştirileceği devre güç iletimi veya güç üretiminden sorumlu ise "güç" sınıflandırmasına dahil edilmelidir.
- Analizinin gerçekleştirileceği devre analog bir devre ise analog, değil ise sayısal olarak kabul edilmelidir.

YGK devresi, yüksek güç girişinin alındığı ve bu gücün ilgili birimin açılıp kapanması aracılığıyla kullanılmasını sağlayan (gücü sağlayan veya ileten bir yapısı yok) analog bir devre olmasından kaynaklı; Çizelge 4.2'de analog düşük seviye arayüz sağlayan işlev sınıfına giriyor olup $\Pi_{Yerleşim}$değeri 1,5 olarak hesaba dahil edilmiştir.

Çizelge 4.3. Pos değeri atama kriterleri

Kriter	*Tanım*	*Seviye*	*Pos*
Dikkate alınan aşamaya uygun kullanıcı türü	Operasyonel kısıtlamalarla karşılaşırken prosedürlere uyma yeteneğini temsil eder.	0: Uygun 1: Orta 2: Uygun Değil	20
Dikkate alınan aşamadaki kullanıcı yeterlilik seviyesi	Operasyonel bağlamda kullanıcı veya çalışanın kontrol seviyesini temsil eder.	0: Uygun 1: Orta 2: Uygun Değil	10

Çizelge 4.3. (devam) Pos değeri atama kriterleri

Kriter	*Tanım*	*Seviye*	*Pos*
Sistemin Hareketliliği	Sistemin taşınabilirliği ile ilgili olasılıkları ifade eder.	0: Hafif 1: Orta 2: Yüksek	4
Ürün Manipülasyonu	Yanlış manipülasyonlar, şoklar, düşmeler vb. olasılıklarını ifade eder.	0: Hafif 1: Orta 2: Yüksek	15
Sistem için elektriksel ağ türü	Elektrik beslemeleri, sinyaller ve elektrik hatlarındaki beklenen elektriksel bozulma seviyesini ifade eder: güç açma, anahtarlama, güç kaynağı, bağlantı/ayrılma.	0: Hafif 1: Orta 2: Yüksek	4
Ürünün insan faaliyetlerine maruziyeti	İnsan faaliyetleri ile ilgili olasılıklara maruziyeti ifade eder: şok, nihai kullanımda değişiklik vb.	0: Hafif 1: Orta 2: Yüksek	8
Ürünün makine bozulmalarına maruziyeti	Makinaların, motorların, eyleyicilerin işletimi ile ilgili olasılıkları ifade eder: şok, aşırı ısınma, elektriksel bozulmalar, kirleticiler vb.	0: Hafif 1: Orta 2: Yüksek	3
Ürünün hava koşullarına maruziyeti	Yağmur, dolu, don, kum fırtınası, yıldırım, toz gibi hava koşullarına maruziyeti ifade eder.	0: Hafif 1: Orta 2: Yüksek	2

İkinci parametre ise $\Pi_{Uygulama}$ parametresidir. Bu parametre ise ürünün kullanılacağı çevreye göre belirlenir. Aşağıda verilen eşitlik ve Çizelge 4.3 ile uyumlu olacak şekilde hesaplanır.

$$\Pi_{Uygulama} = \frac{1}{66} \sum_{k=Kriter} Pmarks_k \times Pos_k \tag{4.3}$$

Eşitlikte verilen Pmarks ve Pos parametrelerinin hesaplanması ise Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5 ile yapılmaktadır.

Çizelge 4.4. Pos değeri ataması

Kriter	*Atanan Seviye*
Dikkate alınan aşamaya uygun kullanıcı türü	2
Dikkate alınan aşamadaki kullanıcı yeterlilik seviyesi	1
Sistemin Hareketliliği	0
Ürün Manipülasyonu	0
Sistem için elektriksel ağ türü	2
Ürünün insan faaliyetlerine maruziyeti	0
Ürünün makine bozulmalarına maruziyeti	1
Ürünün hava koşullarına maruziyeti	2

Çizelge 4.5. Pmarks değeri ataması

Seviye	*Pmarks*
0: Uygun/Hafif	1
1: Orta	3,2
2: Uygun Değil/Yüksek	10

YGK devresi ve uzay koşulları doğrultusunda yukarıdaki tablodaki değerlendirmeler yapılmıştır. Bu kapsamda Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'de görülen şekilde her bir kriter için verilen değer karşılarına eklenmiştir.

Buna göre "Eş. 4.3" eşitliği ile hesaplanan $\Pi_{Uygulama}$ değeri 4,98 olarak hesaplanmıştır.

WQS'in kullanıcı tarafından beklediği son parametre olan $\Pi_{Sağlamlık}$ parametresi ise ürünün geliştirme sürecinde maruz kaldığı aşırı streslerin değerlendirildiği parametredir. Bu parametre de $\Pi_{Uygulama}$ parametresi ile benzer şekilde, FIDES tarafından paylaşılmış olan kontrol listesinin puanlanması ile hesaplanır. Buradaki kontrol listesine dair puan dağılımını içeren tablonun bir kısmı örnek olarak verilmiştir.

Çizelge 4.6. *Önerilen_ağırlık* hesaplaması

Öneriler	*Önerilen_ağırlık*
Tüm ürün uygulama ve bakım operasyonları için eksiksiz prosedürler yazılması	7
Çevresel şartnamelerin eksiksiz olduğunu kontrol edilmesi. Şartnamelerin eksiksizliğine yönelik doğrulama kriterleri: analiz, testler, operasyonlardan gelen geri bildirimler, standartlara uyum	4
Arıza yayılmasına yol açabilecek arıza durumlarının analizini yapılması	4

Çizelge 4.7. *Memnuniyet_Puanı* değerinin belirlenmesi

Öneriler	*Memnuniyet_Puanı*
N1: Önerinin uygulanmadığı durumlar (Güvenilirlik ile ilgili kesin riskler ortaya çıkar.)	0
N2: Öneri yalnızca kısmen uygulanıyorsa (Güvenilirlik ile ilgili potansiyel riskler vardır.)	1
N3: Öneri genel olarak uygulanıyorsa (Güvenilirlik ile ilgili az sayıda risk bulunmaktadır.)	2
N4: Öneri tam olarak uygulanıyor ve bir prosedürde tanımlanmışsa (Güvenilirlik kontrolü sağlanır.)	3

Ancak bu çizelge belli başlı soruların bir kısmıdır (Çizelge 4.6). Oldukça kapsamlı ve fazla sayıda bulunan kontrol listesindeki bu sorular, çalışma kapsamında cevaplanmış ve hesaba dahil edilmiştir. Gerçekleştirilecek olan analiz kapsamında bu sorular cevaplanarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Kontrol listesindeki kriterlere ne kadar uyulduğu doğrultusunda ise Çizelge 4.7'ye uygun olarak değer atamaları yapılır.

Sonrasında bu her bir kontrol parametresinin ağırlığı ile bu parametreye uyum değeri çarpılır. Listedeki bütün çarpımlar toplanıp 225'e bölündüğünde ise aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla $\Pi_{Sağlamlık}$ değeri hesaplanır.

$$\Pi_{Sağlamlık} = e^{0.7\times(1-\text{önerilen_puan})} \tag{4.4}$$

$$\text{Önerilen_Puan} = \frac{1}{225}\sum_i(\text{Önerilen_Ağırlık})_i \times (Memnuniyet_Puanı)_i \tag{4.5}$$

Bu değerlendirmeler doğrultusunda hesaplanan $\Pi_{Sağlamlık}$ parametresi değeri 1,45 olarak elde edilmiştir.

"Eş. 4.2"de bir diğer parametre olan $C_{hassaslık}$ parametresi ise bileşenin geliştirildiği teknolojiye bağlı olarak doğası gereği aşırı streslere karşı hassasiyetini ifade eden parametredir. Bu değer WQS tarafından girdi olarak beklenmemekle birlikte, bileşenin türü ve alt kategorilerinin kullanıcı tarafından girilmesinin ardından FIDES ile uyumlu olacak şekilde otomatik olarak hesaplanır.

Ana denklemdeki bir diğer parametre olan $\Pi_{PÜ}$ değerinin hesaplanması için ise, standartta şu şekilde bir denklem mevcuttur.

$$\Pi_{PÜ} = \text{e}^{1,39\times(1-\text{Parça_Puanı})-0,69} \tag{4.6}$$

$\Pi_{PÜ}$ değeri en iyi 0,5, en kötü 2 olacak şekilde 0,5 - 2 aralığında değer alır. Bu parametrenin hesaplanması; her bir bileşen için ayrı olmalıdır. Bu durum FIDES'in uygulanabilirliğinde zaman ve maliyet açısından olumsuz etki yaratır. Eşitlikteki "*Parça_Puanı*" parametresinin hesaplanması için aşağıdaki eşitlik verilmektedir.

$$Parça_Puanı = \frac{(QA_\text{Üretici}+QA_Bileşen+RA_Bileşen)\times\varepsilon}{36} \tag{4.7}$$

Bu eşitlik güvenilirlik test verileri bulunabilen aktif bileşenler (ayrık yarı iletkenler, entegre devreler, optik izolatör, vb. gibi) için geçerli olup haricindeki bileşenler için uygulanması gereken eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$Parça_Puanı = \frac{(QA_Üretici + QA_Bileşen) \times \varepsilon}{24} \quad (4.8)$$

Yine WQS sayesinde burada 3 parametrenin uygulamaya girilmesi yeterlidir. Sonrasındaki "*Parça_Puanı*" hesabını ve $\Pi_{PÜ}$ hesabını WQS kendisi gerçekleştirir. $QA_{Üretici}$ olarak belirtilen parametre; üretici firmanın kalite teminatını değerlendiren, $QA_{Bileşen}$ bileşenin kalite teminatını değerlendiren, $RA_{Bileşen}$ ise bileşenin güvenilirlik test verilerinin değerlendirildiği parametreyi ifade etmektedir.

Çizelge 4.8. $QA_{Üretici}$ değerinin belirlenmesi

Üretici kalite teminatı seviyesi	*Güncel teknolojiye olan uzaklığı*	$QA_{Üretici}$
ISO/TS16949 V2002 ile sertifikalandırılmışsa	Yüksek	3
QS9000, TL9000, ISO/TS 29001, EN9100, AS9100, JISQ 9100, AQAP 2110, AQAP 2120, AQAP 2130, IRIS, IEC TS 62239, ESA/ECSS QPL, MIL-PRF-38535 QML, MIL-PRF-19500 standartlarından herhangi biri ile sertifikalandırılmışsa	Güncel Teknoloji ile eş	2
ISO 9000 versiyon 2000 ile sertifikalandırılmışsa	Düşük	1
Herhangi bir bilgi yok	Çok Düşük	0

Örnek devrede ele alınan bileşenlerin firmaları Onsemi, Murata ve Yageo firmalarının bileşenleridir. Yageo firması internet sitesinde ise IEC 62321 standardı ile uyumlu olduğunu belirtmiş, ancak sertifika olarak herhangi bir bilgi eklememiştir. Bu sebeple bu firmadan kullanılacak olan bileşenler için $QA_{Üretici}$ parametresi 0 olarak alınmıştır. Murata firması ise ISO9001 ile sertifikalandırıldığından bahsetmiştir. Bu sebeple Murata firmasından kullanılan bileşenler için $QA_{Üretici}$ parametresi 1 olarak alınmıştır. Bu değer bileşen özelinde fark etmeksizin sadece üreticiye göre değişir. Onsemi firması internet sitesinde [33] AS9100 ile sertifiye edildiğini belirtmiştir. Bu sebeple $QA_{Üretici}$ parametresi 2 olarak ele alınmıştır.

$QA_{Bileşen}$ değeri bileşenin cinsine göre değişiklik gösterir. Bu sebeple her bir bileşen için ayrıca değerlendirilecektir. Kullanılan standartlar doğrultusunda WQS uygulamasına

yapılan girdiler değişiklik gösterir. Analiz sonuçları paylaşılırken bu girdilerin neye göre ve nasıl sağlandığı hakkında, bileşenler özelinde açıklamalar yapılacaktır.

Parça_Puanı değerinin hesaplanması için gerekli son parametre olan $RA_{Bileşen}$ parametresinin nasıl değerlendirileceği Çizelge 4.9'da verilmektedir.

Çizelge 4.9. $RA_{Bileşen}$ değerinin belirlenmesi

Seviye/Test İsmi	*Yüksek Sıcaklık Operasyonel Yaşam Testi*	*Yüksek Hızlı Stres Testi*	*Sıcaklık ve Nem Yükleme Testi*	$RA_{Bileşen}$
Çok Güvenilir (Seviye A)	1000 saat, 125 °C, Vmax, 231/0, 1500/0	168 saat, 130 °C, 85%RH, 231/0	168 saat, 130 °C, 85%RH, 231/0	3
Çok Güvenilir (Seviye B)	1000 saat, 125 °C, Vmax, 154/0, 900/0	96 saat, 130 °C, 85%RH, 154/0	96 saat, 130 °C, 85%RH, 154/0	2
Güvenilir	1000 saat, 125 °C, Vmax, 77/0, 231/0	96 saat, 130 °C, 85%HR, 77/0	96 saat, 85 °C, 85%RH, 154/0	1
Güvenilir Değil	Yukarıdaki seviyelerin altı veya hiç güvenilirlik testi gerçekleştirilmemiş	Yukarıdaki seviyelerin altı veya hiç güvenilirlik testi gerçekleştirilmemiş	Yukarıdaki seviyelerin altı veya hiç güvenilirlik testi gerçekleştirilmemiş	0

Yukarıda da bahsedildiği üzere bu değer sadece aktif bileşenler için değerlendirebilir durumdadır. Örnek devredeki aktif bileşenlerin hepsi Onsemi firmasının olup test verileri internet sitesinde [31] mevcuttur. Kullanılmış olan bileşenlerin örneklem sayısı ve testi gerçekleştirdiği süre "Çok" Güvenilir" kategorisine dahil edilebilecek seviyededir. Bu sebeple örnek devrede kullanılan bütün aktif bileşenlerin $RA_{Bileşen}$ değeri "Seviye A Çok Güvenilir" olarak belirlenmiştir.

Temel formüldeki son parametre olan Π_{PM} parametresi ise ürünün nihai halinin kullanılacağı firmanın, şirket içerisindeki güvenilirlik denetimleri için atanan bir parametredir. Bu parametreye göre ürünün geliştirme aşamalarına göre ağırlıklar verilip, söz konusu aşamalar için belirlenmiş bir kontrol listesi oluşturulur. $\Pi_{Process}$ eşitliği ise şu şekilde tanımlanmıştır.

$$\Pi_{Süreç} = e^{\delta(1-Süreç_Puanı)} \tag{4.9}$$

Buradaki eşitliğe göre; $\Pi_{Süreç}$ parametresinin alabileceği en iyi değer 1 olarak belirtilmişken en kötü değer ise 8 olarak belirlenmiştir.

Süreç_Puanı oranını hesaplamak için ise ürünün geliştirme aşamalarına göre uygulanan denetimler, sürecin kalitesi vb. değerlendirmeleri içeren sorulara verilen cevaplar ile geliştirme aşamalarının 100 üzerinden ağırlıklarına oranlanarak bir değer elde edilir. Kontrol listesi oldukça uzun olmakla beraber; Çizelge 4.10'da spesifikasyon aşamasına dair birkaç soruyu içeren bir örnek paylaşılmıştır.

Çizelge 4.10. Örnek kontrol listesi

Tavsiye	*Soru*	*Ağırlık*
Güvenilirlik çalışmalarını gerçekleştirecek personel ve kaynakların sağlanması	Güvenilirlik analizleri için kullanılan bir uygulama var mı? Güvenilirlik için gereklilikler tanımlandı mı? Güvenilirlik alanında çalışacak personel ataması mevcut mu?	10,7
Sayısal güvenilirlik değerinin alt seviyelere tahsislendirilmesi	Sistem seviyesi güvenilirlik değeri alt seviyeleri kırıldı mı? Kırılım sırasında hangi standart kullanıldı?	10,4
Sistemin kullanılacağı ve bakım faaliyetlerinin gerçekleştirileceği ortam için detaylı tanımlama	Ürünün kullanılacağı, taşınacağı, depolanacağı, bakım faaliyetlerinin gerçekleştirileceği ortam için detaylı tanımlama veya sınıflandırma mevcut mudur?	12,4

Bu şekilde bütün sorular cevaplanır, soruların ağırlığı ile verilen cevaplar çarpılarak toplam *Süreç_Puanı*; ardından $\Pi_{Süreç}$ elde edilir. Söz konusu analiz spesifik bir firmanın iç süreçlerini içermediğinden bu detayda bir çalışma bu tezin kapsamına alınamamıştır. Ancak ürünün kullanıcı firmasının ISO9001 ile uyumlu bir firma olduğu varsayılmıştır ve $\Pi_{Süreç}$ parametresi 2,8 ve 4,8'in orta değeri olan 3,8 olarak kabul edilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ancak FIDES ile yapılmış olan hesaplamaların test sonuçlarına daha yakın değerler verebilmesi adına; çalışma kapsamında bu değer üzerinden optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.11'de FIDES'in bu konuya yaklaşımı gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. $\Pi_{Süreç}$ değerinin belirlenmesi

Seviye	*Süreç*	$\Pi_{Süreç}$
Çok Yüksek Güvenilirlik	Neredeyse hiçbir eksiği olmayan süreç	<1,7
Yüksek Güvenilirlik	Kontrollü süreç, güvenilirlik mühendisliği	1,7-2,8
Standart	ISO 9001 versiyon 2000 türü kalite prosedürleri	2,8-3,8
Güvenilir Değil	Güvenilirlik problemlerinin ele alınmadığı süreç	>4,8

4.3. Örnek Devre Üzerinden FIDES 2009 ile Gerçekleştirilmiş Analiz Sonuçları

$QA_{Bileşen}$ değeri her bir bileşen özelinde değişiklik göstereceği için çalışmanın sonuçlar bölümünde bu değerlerin neye göre belirlendiği de paylaşılmıştır. $RA_{Bileşen}$ değeri sadece aktif bileşenler uygulanabilir olduğundan onun da neye göre belirlendiği de bu bölümde paylaşılmıştır.

4.3.1. Dirençler FIDES sonuçları

Dirençlerden R1 bileşeni (47 KΩ olan bileşen) diğer dirençlerden farklı bir kategori olarak otomotiv sınıf bir bileşendir. Örnek devrede kullanılan dirençlerin hepsi Yageo firmasının bileşenleridir. Yageo firmasına ait $QA_{Üretici}$ değeri önceki bölümlerde "0" olarak belirlenmişti, bu sebeple WQS uygulamasına bütün dirençler için bu şekilde girdi yapılmıştır.

R1 direnci için FIDES sonuçları

Değeri 47 KΩ olan dirençtir. Bu bileşenin veri sayfasında [34] paylaşılan bilgiye göre bir otomotiv kalifikasyon standardı olan AEC-Q200 ile kalifiye edildiği söylenmiştir. Çizelge 4.12'de görüldüğü üzere WQS uygulamasına bu değer "3" olarak girilmiştir.

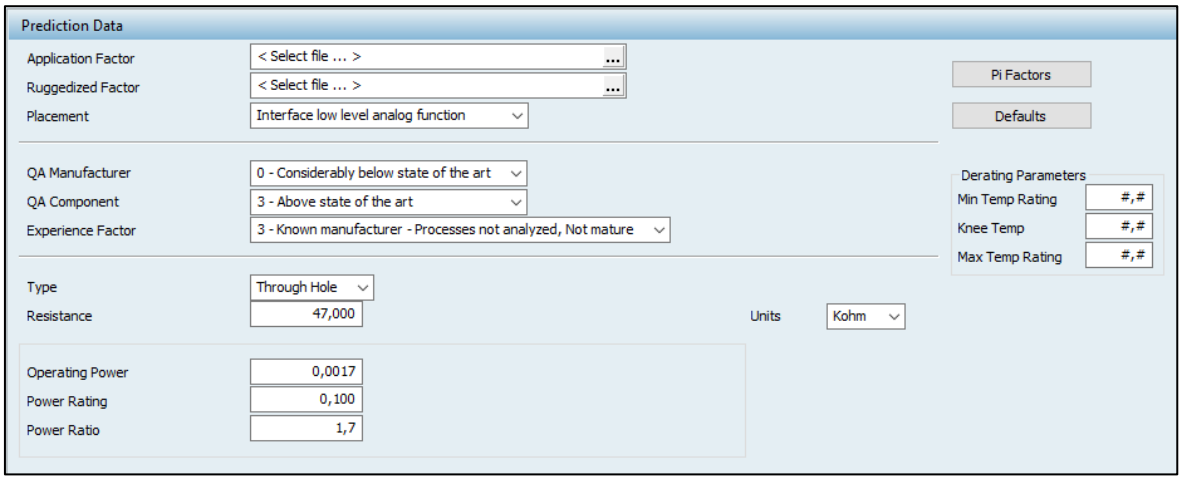
Çizelge 4.12. Pasif bileşenler için $QA_{Bileşen}$ değerinin belirlenmesi

Bileşen kalite teminatı seviyesi	*Güncel teknolojiye olan uzaklığı*	$QA_{Bileşen}$
AEC Q200, MIL-PRF-xxxx seviye S, MIL-PRF-xxxx seviye R, MIL-PRF-xxxx seviye D, MIL-PRF- seviye C, ESCC 400x seviye B, NASDA-QTS-xxxx Class I standartlarına göre kalifiye edilmişse	Yüksek	3
Üretici testleri MIL-PRF-xxx level P, MIL-PRF-xxxx level B, ESCC 400x level C, NASDA-QTS-xxxx class II standartlarına uyumlu olacak kalifikasyon şekilde gerçekleştirilmişse	Güncel Teknoloji ile eş	2
CECC standartları: MIL-PRF-xxxx seviye M, veya üreticiye özel/tanımlanmamış kalifikasyon programı	Düşük	1
Herhangi bir bilgi yok	Çok Düşük	0

FIDES 2009'da bu çizelgenin dirençler ve pasif bütün bileşenler için uygulanabilir olduğundan bahsedilmiştir. Bu sebeple kondansatörler için de bu çizelge temel alınarak

$QA_{Bileşen}$ değeri belirlenmiştir. Şekil 4.2'de WQS uygulamasına bu değerlerin girilmiş hali görülmektedir.

Hesaplanabilir ve mevcut verilerin her iki standart için de WQS uygulamasına girdi olarak sağlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda uygulanan elektriksel değerler (uygulanan gerilim ve güç) devre analizi ile hesaplanmış haricindeki ısıl ve elektriksel değerler (ısıl kat sayı ve operasyonel güç ve gerilim değerleri) bileşenlerin veri sayfalarından girilmiştir.

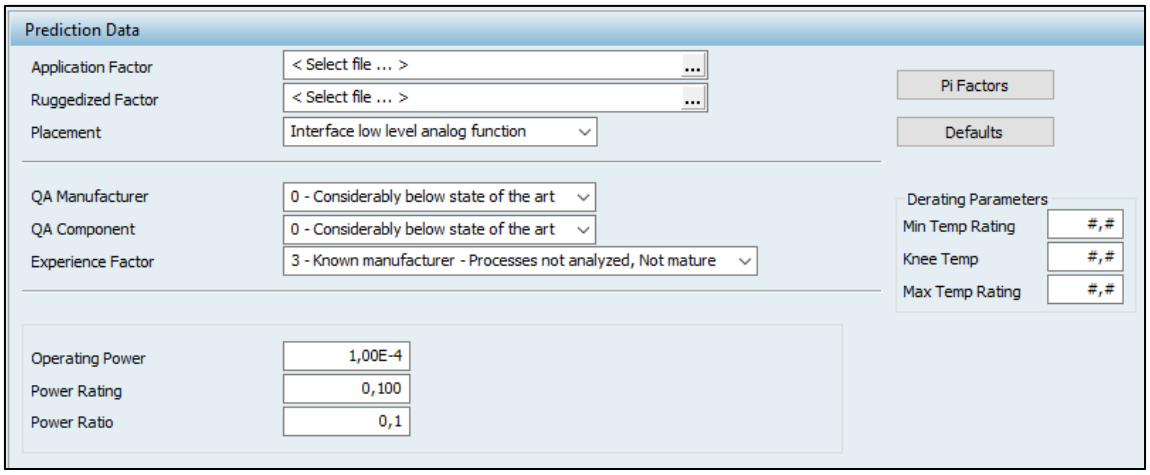


Şekil 4.2. R1 direnci FIDES WQS girdileri

Buraya girilen değerler ışığında 47 KΩ R1 direnç için FIDES ile elde edilen hata oranı değeri 1,351 FIT'tir.

R2 direnci için FIDES sonucu

Değeri 10Ω olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [35] kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Yukarıda paylaşılan Çizelge 4.12 doğrultusunda WQS uygulamasına bu direnç için "Çok Düşük" sınıflandırmasına girecek şekilde "0" değeri atanmıştır. Şekil 4.3'de R2 direnci için WQS uygulamasına yapılan girdiler görülmektedir.

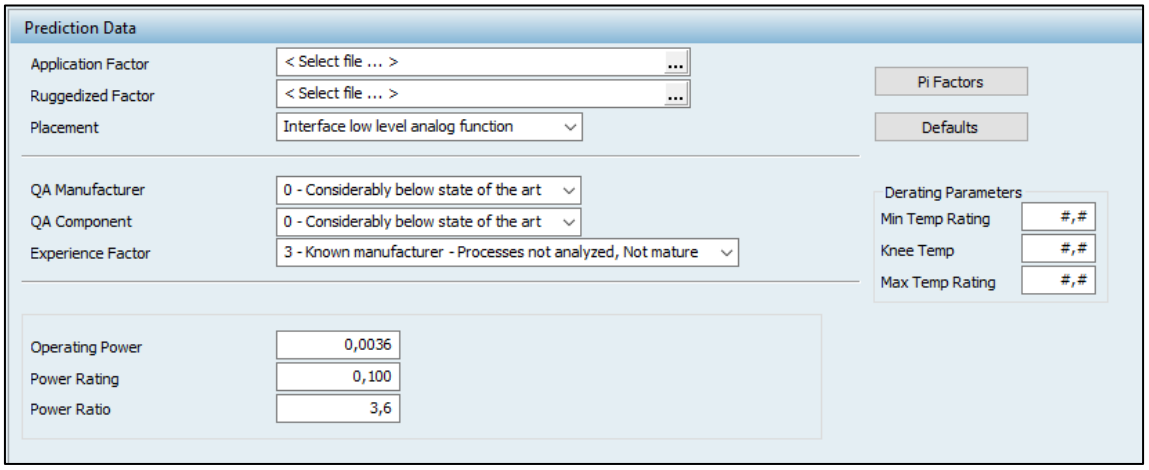


Şekil 4.3. R2 direnci FIDES WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda R2 direnci için FIDES ile hesaplanmış hata oranı 0,235 FIT olarak bulunmuştur.

R3 direnci için FIDES sonucu

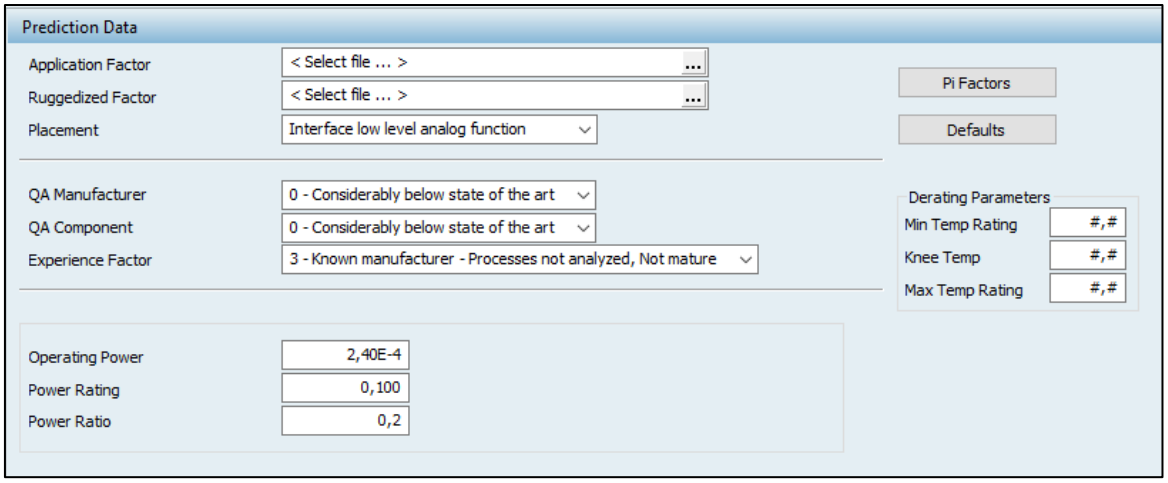
Değeri 100 KΩ olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [36] kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Yukarıda paylaşılan Çizelge 4.12 doğrultusunda WQS uygulamasına bu direnç için "Çok Düşük" sınıflandırmasına girecek şekilde "0" değeri atanmıştır. Şekil 4.4'de R3 direnci için WQS uygulamasına yapılan girdiler görülmektedir.



Şekil 4.4. R3 direnci FIDES WQS girdileri

R4 direnci için FIDES sonucu

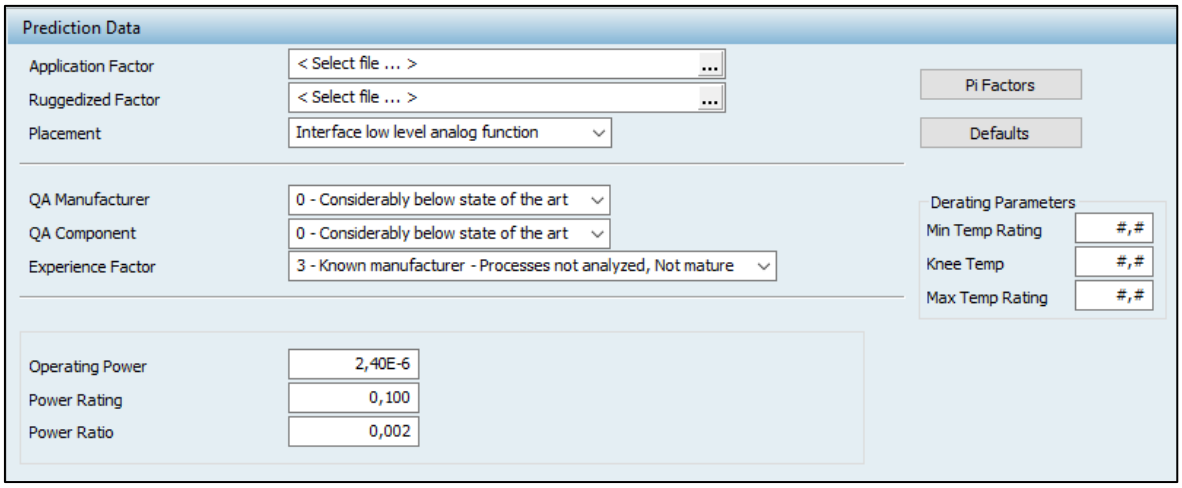
Değeri 100 KΩ olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [36] kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Yukarıda paylaşılan Çizelge 4.12 doğrultusunda WQS uygulamasına bu direnç için "Çok Düşük" sınıflandırmasına girecek şekilde "0" değeri atanmıştır. Şekil 4.5'de R5 direnci için WQS uygulamasına yapılan girdiler görülmektedir.



Şekil 4.5. R4 direnci FIDES WQS girdileri

R5 direnci için FIDES sonucu

Değeri 1 KΩ olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [37] kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır Yukarıda paylaşılan Çizelge 4.12 doğrultusunda WQS uygulamasına bu direnç için "Çok Düşük" sınıflandırmasına girecek şekilde "0" değeri atanmıştır. Şekil 4.6'de R5 direnci için WQS uygulamasına yapılan girdiler görülmektedir.



Şekil 4.6. R5 direnci FIDES WQS girdileri

4.3.2. Kondansatörler FIDES sonuçları

Kullanılan her iki kondansatör de seramik kondansatördür, FIDES'te seramik kondansatörler için tür olarak belirlenen başka bir sınıflandırma da mevcuttur. Bu sınıflandırma; kondansatörlerin veri sayfalarında sıcaklık kat sayısının bulunup bulunmamasını göz önünde bulundurur. Bu kapsamda kullanılmış olan her iki kondansatörün de sıcaklık kat sayıları mevcut olup FIDES'ten alınarak Çizelge 4.13'de görülebileceği üzere "Tür 1" kapsamında ele alınmalıdır.

Çizelge 4.13. Kondansatör tür belirlemesi

Tür İsmi	*Tür Belirleme Kriteri*
Tür 1	Tanımlı sıcaklık katsayısı
Tür 2	Belirsiz sıcaklık katsayısı

$QA_{Bileşen}$ ataması ise pasif bileşenler için Çizelge 4.12.'de gösterildiği şekilde yapıldığı için kondansatörler de bu kapsama girmektedir. Her iki kondansatör için de veri sayfalarında [38,39] herhangi bir kalifikasyon bilgisi bulunmaması sebebiyle $QA_{Bileşen}$ değeri "0" olarak kabul edilmiştir.

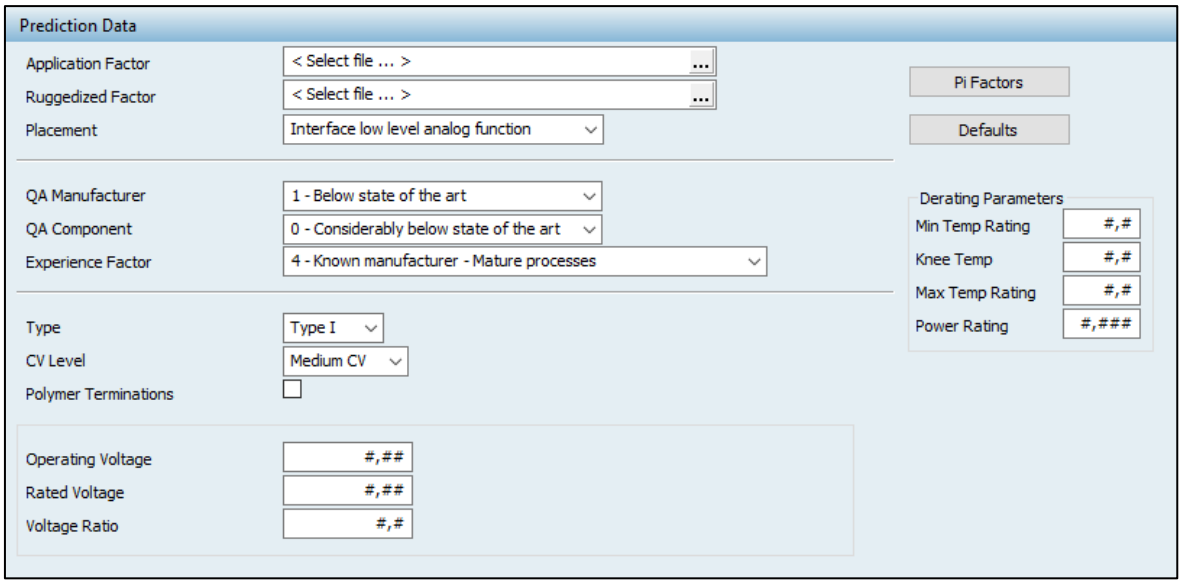
C1 bileşeni FIDES sonuçları

Bileşen, 100 pF/50 V değerinde bir kondansatördür. Kondansatörler için türlerin belirlenmesinin ardından FIDES'te tanımlanan ve WQS uygulamasının da girdi olarak beklediği "CV Seviyesi" mevcuttur. Bu seviyesi kondansatörün kapasitans ve gerilim değerlerinin çarpımı ile elde edilen değerdir. Belirlenmesi ise Çizelge 4.14 doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

C1 kondansatörünün CV seviyesi hesaplandığında (100 pF ve 50 V'nin çarpımı) 5×10^{-9} değeri elde edilmektedir. Bu değer de Çizelge4.14'de gösterildiği üzere Orta CV sınıflandırılmasına dahil olmasına sebep olur. Şekil 4.7'de bu değerlerin WQS uygulamasına girilişine ulaşılabilir.

Çizelge 4.14. CV seviyesi belirlenmesi

CV Seviyesi	*Tür 1*	*Tür 2*
Düşük CV	10^{-9}'dan küçükse	10^{-7}'den küçükse
Orta CV	10^{-9} ile 10^{-7} arasında ise	10^{-7} ve 10^{-5} arasında ise
Yüksek CV	10^{-7}'den büyükse	10^{-5}'ten büyükse

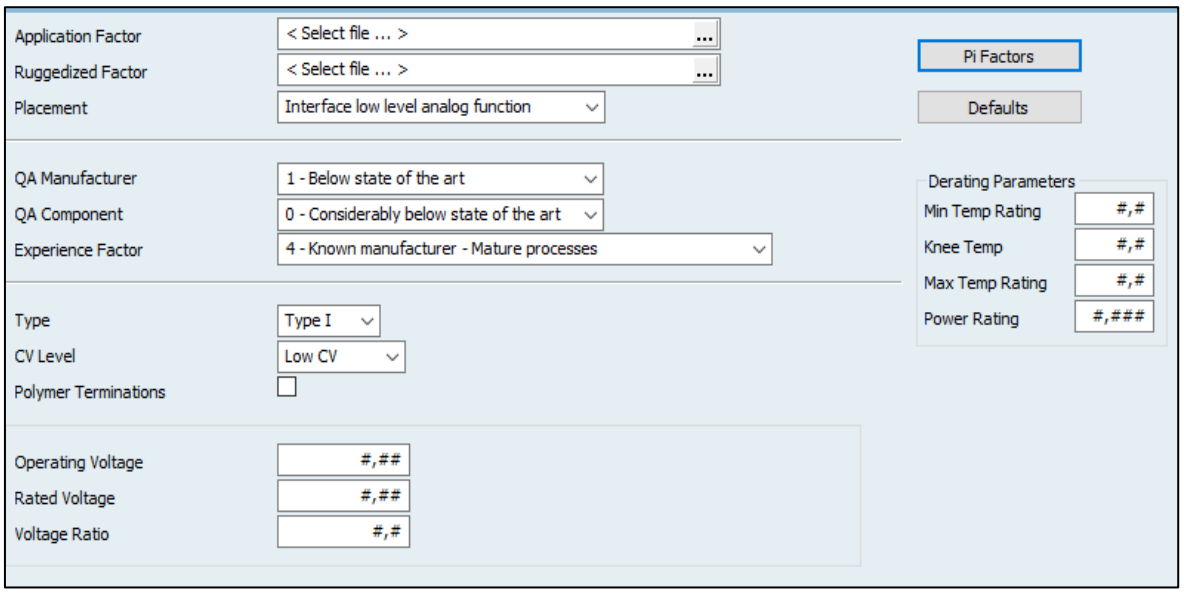


Şekil 4.7. C1 kondansatörü FIDES WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda C1 bileşeni için hesaplanan hata oranı değeri görülebilir. Bu girdilere göre FIDES ile elde edilen hata oranı 13,068 FIT'tir.

C2 bileşeni FIDES sonuçları

Bileşenin değeri 10 pF/50 V'dir. CV Seviyesi (10 nF ve 50 V'nin çarpımı) 5×10^{-6} olarak hesaplanmıştır. Bu durum Çizelge 4.14'e göre "Düşük CV" sınıflandırmasına dahil olmasına sebep olmuştur. Şekil 4.8'de bu girdilerin WQS uygulamasına girdisi gösterilmiştir.



Şekil 4.8. C2 kondansatörü FIDES WQS girdileri

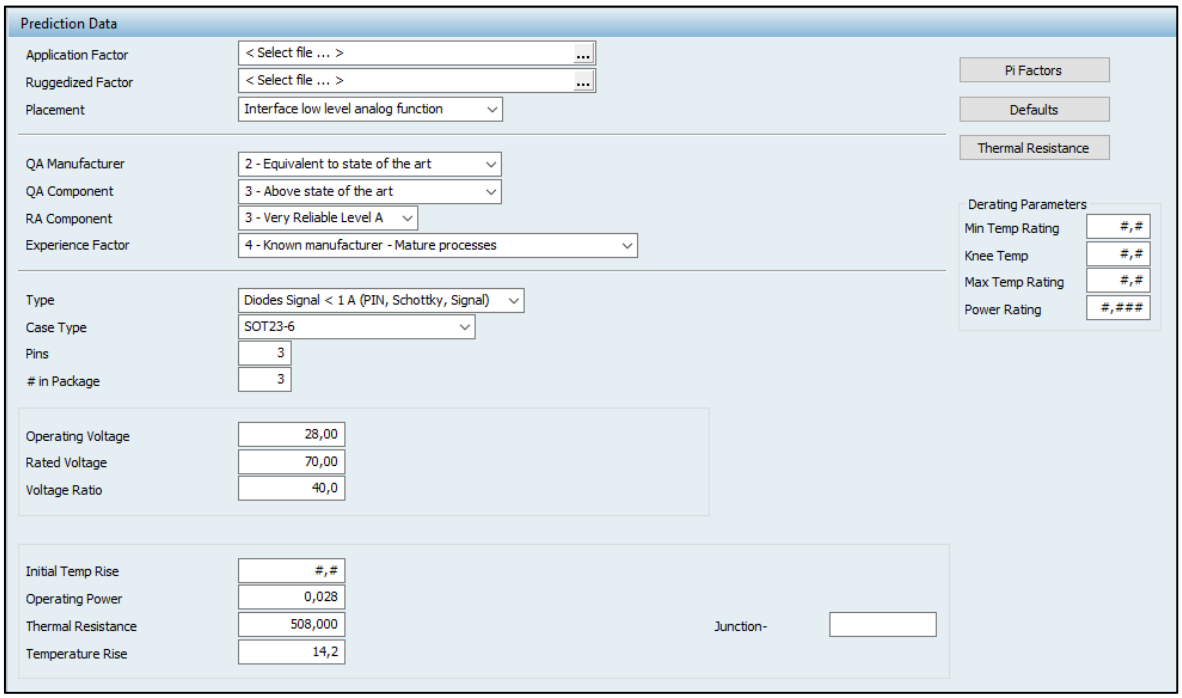
Bu girdiler doğrultusunda C2 bileşeni için hesaplanmış olan hata oranı değeri ise 7,841 FIT olarak bulunmuştur.

4.3.3. Schottky diyotlar FIDES sonuçları

Örnek devrede D2 ve D3 olarak gösterilmiş olan diyotlardır. Birbirinin aynı parçalardır, bu sebeple hata oranları aynı olacak şekilde elde edilmiştir. Sonuçlar tek biri üzerinden paylaşılacaktır. Şekil 4.9'da bu diyotlar için WQS uygulamasına yapılmış olan girdiler mevcuttur.

Yarı iletken sınıflandırmasına dahil olan Schottky diyotlar Onsemi firmasından seçilmiştir. Bu bileşenlerin veri sayfaları [40] doğrultusunda paketleme türleri uygulamaya girilmiştir.

Ayrıca yine veri sayfasında paylaşılan AEC-Q101 standardı ile kalifiye edilmiş olması bilgisi sayesinde FIDES'te paylaşılan Çizelge 4.15 doğrultusunda $QA_{Bileşen}$ değerini "3" olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.9. D2 ve D3 bileşenleri FIDES WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda D2 ve D3 bileşeni için hesaplanmış olan hata oranı değeri ise 0,148 FIT olarak bulunmuştur. Bu değer sadece tek bir diyot için bulunmuş olan hata oranı değeridir. D2 ve D3 bileşenlerin toplam hata oranı bulunurken 2 ile çarpılacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

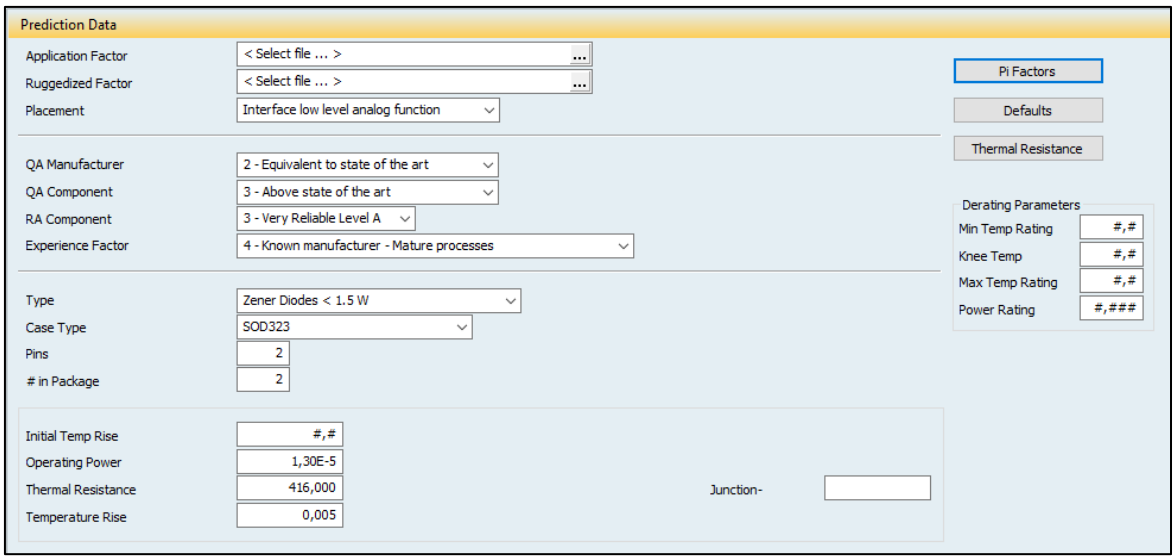
Çizelge 4.15. Ayrık yarı iletkenler için $QA_{Bileşen}$ değerinin belirlenmesi

Bileşen kalite teminatı seviyesi	*Güncel teknolojiye olan uzaklığı*	$QA_{Bileşen}$
AEC Q101, MIL-PRF-19500 JANS, ESCC 5xxx seviye B, NASDA-QTS-xxxx Class I standartlarına göre kalifiye edilmişse	Yüksek	3
Üretici testleri JESD22, EIAJ-ED-4701, MIL-STD-750'ye uyumlu olacak şekilde gerçekleştirmişse veya, MIL-PRF-19500 JANTX veya JANTXV, ESCC 5xxx seviye C, NASDA-QTS-xxxx Class II standartlarına göre kalifikasyon gerçekleştirilmişse	Güncel Teknoloji ile eş	2
MIL-PRF-19500 JAN veya üreticiye özel/tanımlanmamış kalifikasyon programı	Düşük	1
Herhangi bir bilgi yok	Çok Düşük	0

Bu çizelge bütün ayrık yarı iletkenler için uygulanabilir olup, örnek devrede kullanılan D1, D2, D3, F1 ve Q1 bileşenleri için uygulanabilirdir.

4.3.4. Zener diyot FIDES sonucu

Örnek devrede D1 ile gösterilen Zener diyotudur. Çalışma değeri 8,2 V olacak şekilde seçilmiştir. Çizelge 4.15'teki sınıflandırma doğrultusunda $QA_{Bileşen}$ ataması gerçekleştirilmiştir. Veri sayfasında [41] bir otomotiv kalifikasyon standardı olan AEC-Q101 ile kalifiye edildiği paylaşılmıştır. Bu sebeple $QA_{Bileşen}$ değeri "3" olarak kabul edilmiştir. Ayrıca yine veri sayfasında paylaşılmış olan paketleme türü WQS uygulamasına girdi olarak sağlanmıştır (Şekil 4.10).

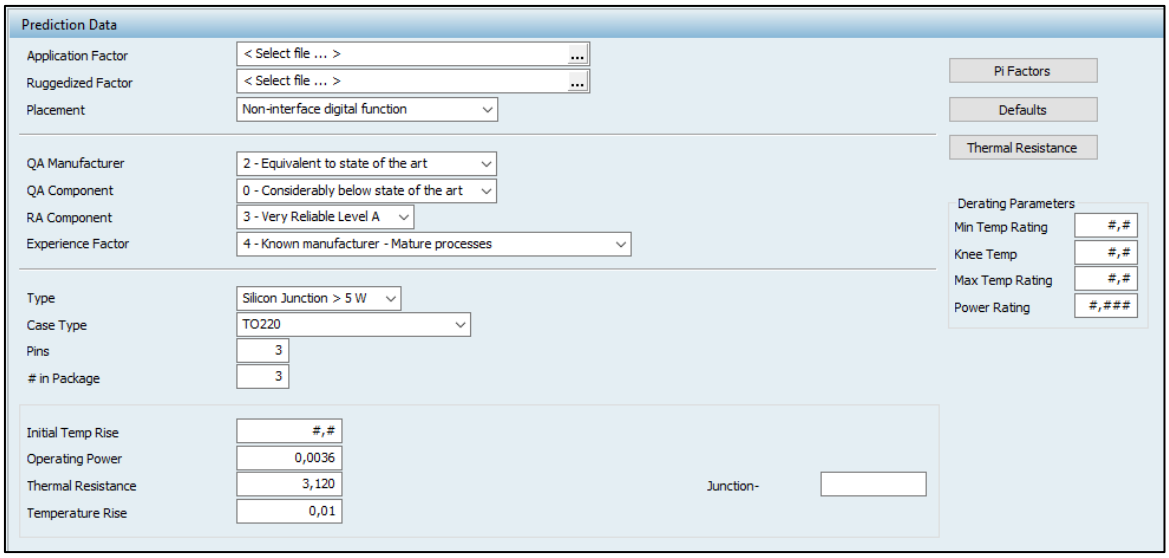


Şekil 4.10. D1 bileşeni FIDES WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda D1 bileşeni için hesaplanmış olan oranı 0,596 FIT olarak elde edilmiştir.

4.3.5. NPN transistör FIDES sonucu

Örnek devrede Q1 ile gösterilen NPN bir transistördür, 40 V gerilim değeri ile çalışır. Veri sayfasında [42], otomotiv standardı olan AEC-Q101 standardına göre kalifiye edildiği bilgisi paylaşılmıştır. Bu doğrultuda, Çizelge 4.15.'e göre $QA_{Bileşen}$ değeri "3" olarak kabul edilmiştir. Ayrıca yine veri sayfasında paylaşılmış olan paketleme türü e WQS uygulamasına girdi olarak sağlanmıştır. Bu girdiler Şekil 4.11'de verilmektedir.

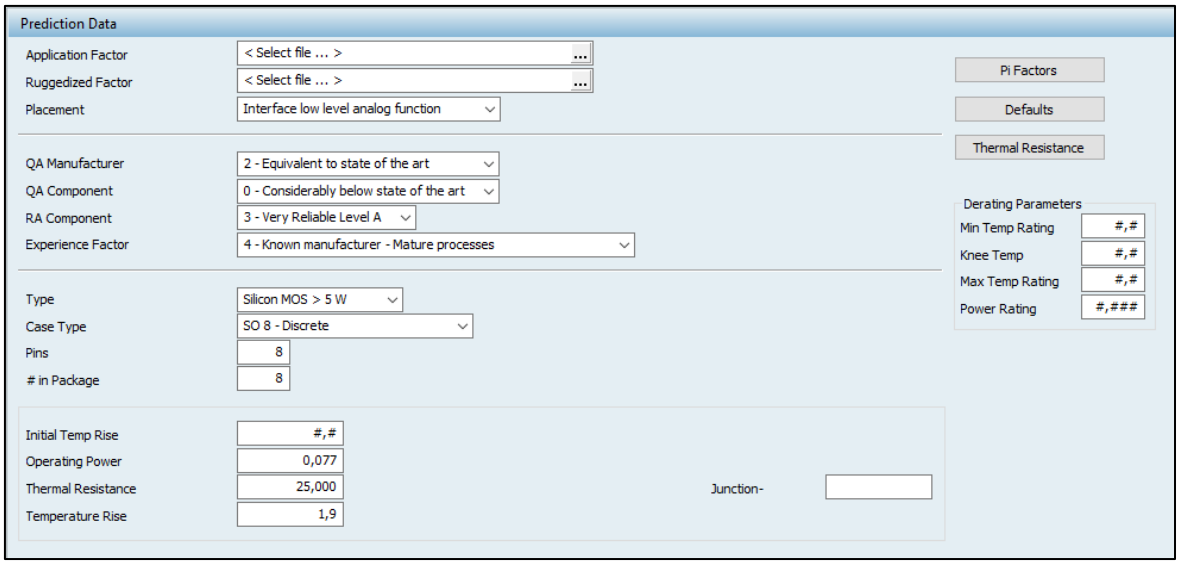


Şekil 4.11. Q1 bileşeni FIDES WQS girdileri

Buradaki girdiler doğrultusunda Q1 bileşeni için FIDES ile hesaplanmış olan hata oranı 3,868 FIT'tir.

4.3.6. P-MOSFET FIDES sonucu

Örnek devrede F1 olarak gösterilen bileşendir. 40V P kanallı güç MOSFET sınıflandırmasında olan bir bileşendir. Veri sayfasında [43], otomotiv standardı olan AEC-Q101 standardına göre kalifiye edildiği bilgisi paylaşılmıştır. Bu doğrultuda, Çizelge 4.15.'e göre $QA_{Bileşen}$ değeri "3" olarak kabul edilmiştir. Ayrıca yine veri sayfasında paylaşılmış olan paketleme türü WQS uygulamasına girdi olarak sağlanmıştır. Bu girdiler Şekil 4.12'de verilmektedir.



Şekil 4.12. F1 bileşeni FIDES WQS girdileri

Buradaki girdiler doğrultusunda F1 bileşeni için FIDES ile hesaplanmış olan hata oranı yaklaşık 5,652 FIT'tir.

4.4. Örnek Devrenin MIL-HDBK-217F ile Güvenilirlik Hesaplaması

Matematiksel modellemesinde önceki bölümlerde bahsedilmiş olan MIL-HDBK-217F için WQS'e girdi olarak sağlanması gereken parametreler FIDES'e göre daha azdır. FIDES'te olduğu gibi MIL-HDBK-217F'te de devrede kullanılacak olan bilgiler uygulamaya girilir.

4.5. Örnek Devre Üzerinden MIL-HDBK-217F ile Gerçekleştirilmiş Analiz Sonuçları

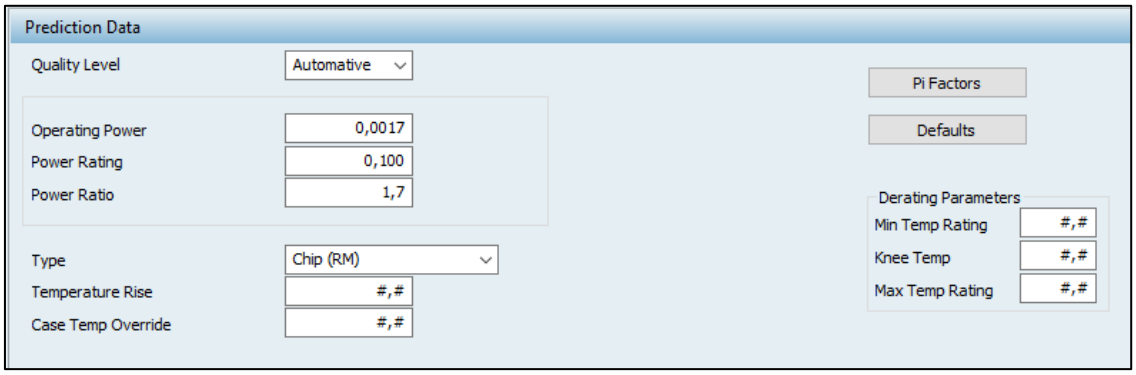
Bu bölümde, her bir bileşen için WQS uygulamasından, MIL-HDBK-217F standardı kullanılarak hesaplanmış hata oranları verilmiştir. Her bir bileşen için dikkate alınan parametrelerin farklılık göstermesinden kaynaklı ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

4.5.1. Dirençler MIL-HDBK-217F sonuçları

Dirençlerden 47 KΩ olan bileşen MIL-DBK-217F'e göre de diğer dirençlerden farklı bir kategoride olması sebebiyle WQS uygulamasına girişi farklı yapılmıştır. Diğer dirençler için girişler ve dolayısıyla elde edilmiş olan hata oranları aynı olmasından kaynaklı tek bir başlık altında ele alınarak sonuçlar paylaşılmıştır.

R1 direnci için MIL-HDBK-217F sonucu

47 KΩ değeri olan dirençtir. Veri sayfasında uyumlu olduğu belirtilen kalite standardı doğrultusunda otomotiv sınıfı ve yüksek kararlı olarak değerlendirilmiş olup WQS uygulamasına Şekil 4.13'teki girdiler sağlanmıştır.



Şekil 4.13. R1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda R1 bileşeni için MIL-HDBK-217F'e göre hesaplanmış olan hata oranı değeri 0,222 FIT'tir.

R2 direnci için MIL-HDBK-217F sonucu

Değeri 10Ω olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [35] kalifikaslyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu direncin veri sayfasında kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu sebeple MIL-HDBK-217F'e göre "Ticari" sınıfına dahil edilmektedir. Şekil 4.14'te bu bilginin WQS uygulamasına girdi olarak sağlandığı görülmektedir.



Şekil 4.14. R2 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda R2 bileşeni için MIL-HDBK-217F'e göre hesaplanmış olan hata oranı değeri 1,477 FIT'tir.

R3 direnci için MIL-HDBK-217F sonucu

Değeri 100 KΩ olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [36] kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu direncin veri sayfasında kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu sebeple MIL-HDBK-217F'e göre "Ticari" sınıfına dahil edilmektedir. Şekil 4.15'te bu bilginin WQS uygulamasına girdi olarak sağlandığı görülmektedir.

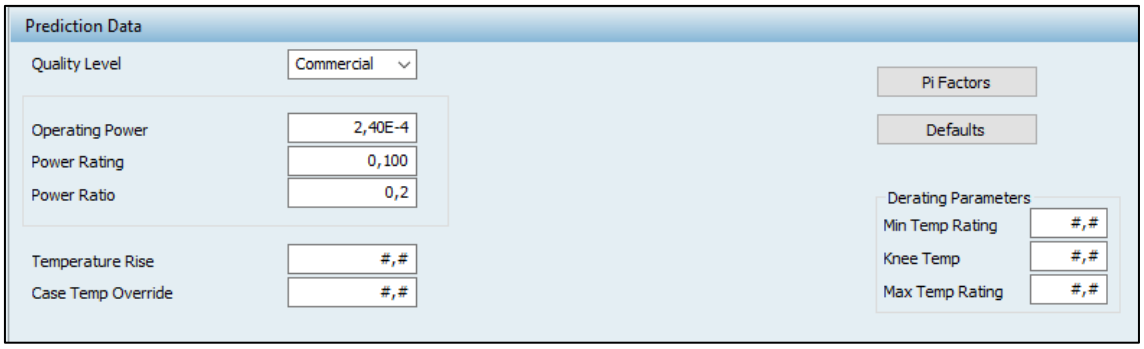


Şekil 4.15. R3 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda R3 bileşeni için MIL-HDBK-217F'e göre hesaplanmış olan hata oranı değeri 6,209 FIT'tir.

R4 direnci için MIL-HDBK-217F sonucu

Değeri 100 KΩ olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [36] kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu direncin veri sayfasında kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu sebeple MIL-HDBK-217F'e göre "Ticari" sınıfına dahil edilmektedir. Şekil 4.16'da bu bilginin WQS uygulamasına girdi olarak sağlandığı görülmektedir.



Şekil 4.16. R4 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda R4 bileşeni için MIL-HDBK-217F'e göre hesaplanmış olan hata oranı değeri 2,080 FIT'tir.

R5 direnci için MIL-HDBK-217F sonucu

Değeri 1 KΩ olan dirençtir. Bu direncin veri sayfasında [37] kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu direncin veri sayfasında kalifikasyonuna dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu sebeple MIL-HDBK-217F'e göre "Ticari" sınıfına dahil edilmektedir. Şekil 4.17'de bu bilginin WQS uygulamasına girdi olarak sağlandığı görülmektedir.



Şekil 4.17. R5 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

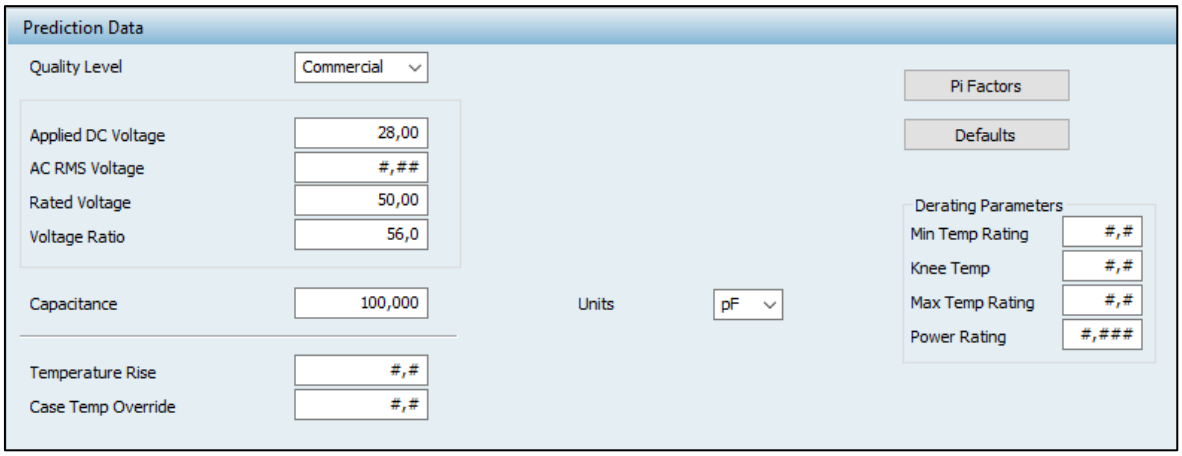
Bu girdiler doğrultusunda R5 bileşeni için MIL-HDBK-217F'e göre hesaplanmış olan hata oranı değeri 0,344 FIT'tir.

4.5.2. Kondansatörler MIL-HDBK-217F sonuçları

MIL-HDBK-217F'e göre yapılan hata oranı hesaplamasında, kondansatörler için kalite faktörüne ek olarak kondansatörün değerini de göz önünde bulundurulmaktadır. Örnek devrede kullanılan kondansatörlerin değerlerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklı ayrı ayrı ele alınmıştır.

C1 kondansatör

100 pF/50 V değeri olan bileşendir. Veri sayfasında herhangi bir kalite standardından bahsedilmediği için ticari sınıflandırmaya dahil edilmiş olup WQS uygulamasına da bu şekilde girdi yapılmıştır. Şekil 4.18'de bu girdilerin WQS uygulamasına sağlandığı ekran görülmektedir.



Şekil 4.18. C1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

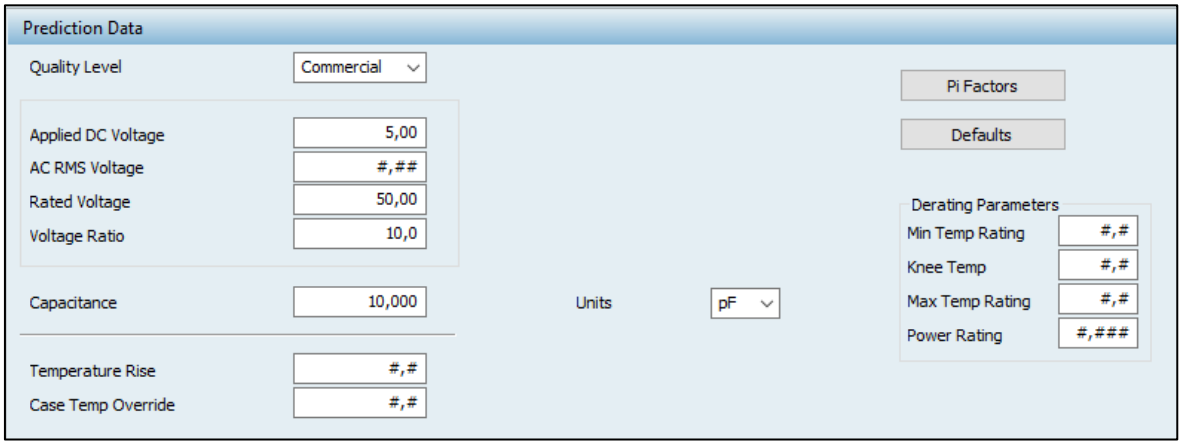
Bu girdiler doğrultusunda MIL-HDBK-217F ile hesaplanan hata oranı değeri 55,062 FIT'tir.

Yine pasif bir bileşen olan kondansatör için bu değer oldukça yüksektir. MIL-HDBK-217F ile elde edilen sonuç, FIDES ile elde edilen sonuca göre daha yüksek bir hata oranı vererek daha da kötü bir sonuç sunmuştur.

C2 kondansatör

10 pF/50 V değeri olan bileşendir. Veri sayfasında herhangi bir kalite standardından bahsedilmediği için ticari sınıflandırmaya dahil edilmiş olup WQS uygulamasına da bu

şekilde girdi yapılmıştır. Şekil 4.19'da bu girdilerin WQS uygulamasına sağlandığı ekran görülmektedir.



Şekil 4.19. C2 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

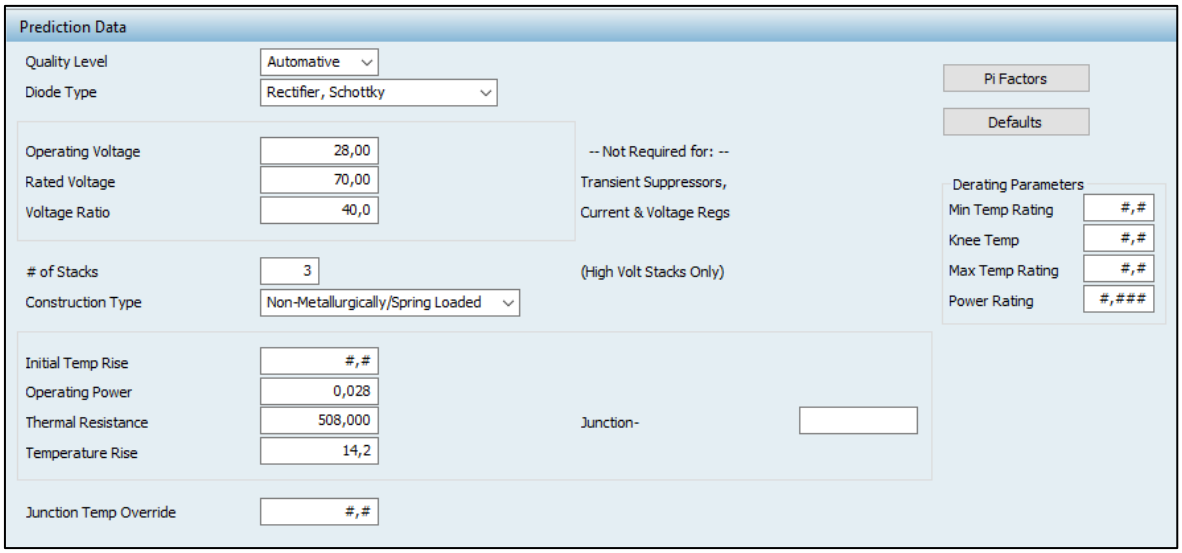
Bu girdiler doğrultusunda MIL-HDBK-217F ile hesaplanan hata oranı değeri 24,800 FIT'tir.

C1 bileşeni ile benzer şekilde, bir bileşen olan kondansatör için bu değer oldukça yüksektir. MIL-HDBK-217F ile elde edilen sonuç, FIDES ile elde edilen sonuca göre daha yüksek bir hata oranı vererek daha da kötü bir sonuç sunmuştur.

4.5.3. Schottky diyotlar MIL-HDBK-217F sonuçları

Örnek devrede D2 ve D3 olarak gösterilmiş olan diyotlardır. Birbirinin aynı parçalar ve üzerlerine düşen ısıl ev elektriksel streslerin de aynı olması sebebiyle hata oranları aynı olacak şekilde elde edilmiştir. Sonuçlar tek biri üzerinden paylaşılacaktır.

D2 ve D3 bileşenlerinin veri sayfasında otomotiv kalite standardı ile uyumlu olduğu paylaşılmıştır. Bu bilgi, WQS uygulamasına girdi olarak sağlanmıştır (Şekil 4.20).



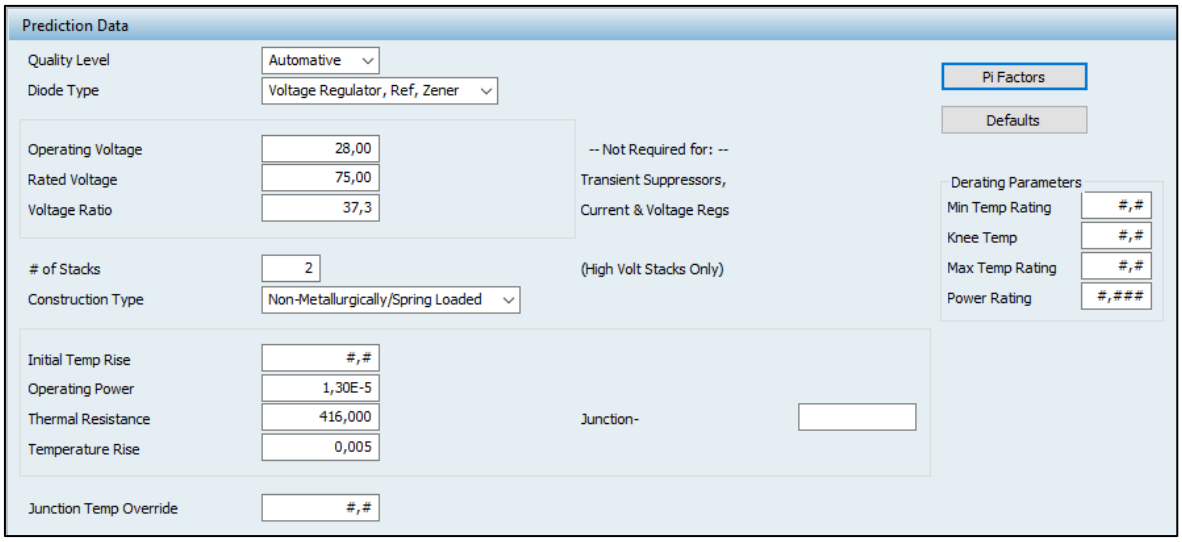
Şekil 4.20. D2 ve D3 bileşenleri MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda hesaplanmış olan hata oranı tek bir diyot için 1,854 FIT olarak bulunmuştur.

Burada paylaşılan hata oranı değerinin tek bir Schottky diyot için geçerli olduğu, örnek devrede bu diyottan 2 adet bulunması sebebiyle hesaplamalarda bu değerin 2 katı olacak şekilde dahil edileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

4.5.4. Zener diyot MIL-HDBK-217F sonucu

Örnek devrede D1 ile gösterilen ve 8.2 V değeri olan Zener diyottur. Veri sayfasında bir otomotiv kalifikasyon standardı olan AEC-Q101 ile kalifiye edildiği paylaşılmıştır. Bu sebeple WQS uygulamasına kalifikasyonu otomotiv olacak şekilde girdi sağlanmıştır (Şekil 4.21).

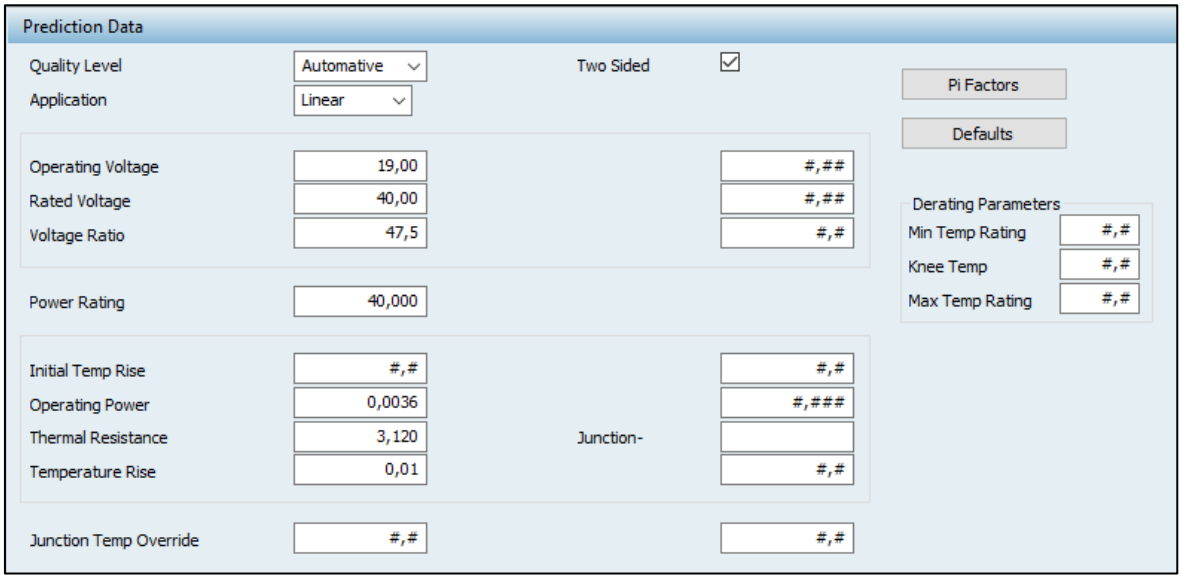


Şekil 4.21. D1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda MIL-HDBK-217F ile elde edilen hata oranı değeri ise 1,669 FIT olarak hesaplanmıştır.

4.5.5. NPN transistör MIL-HDBK-217F sonucu

Örnek devrede Q1 ile gösterilen NPN bir transistördür, 40 V gerilim değeri ile çalışır. Veri sayfasında, otomotiv standardı olan AEC-Q101 standardına göre kalifiye edildiği bilgisi paylaşılmıştır. Bu bilginin WQS uygulamasına girilmiş hali Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

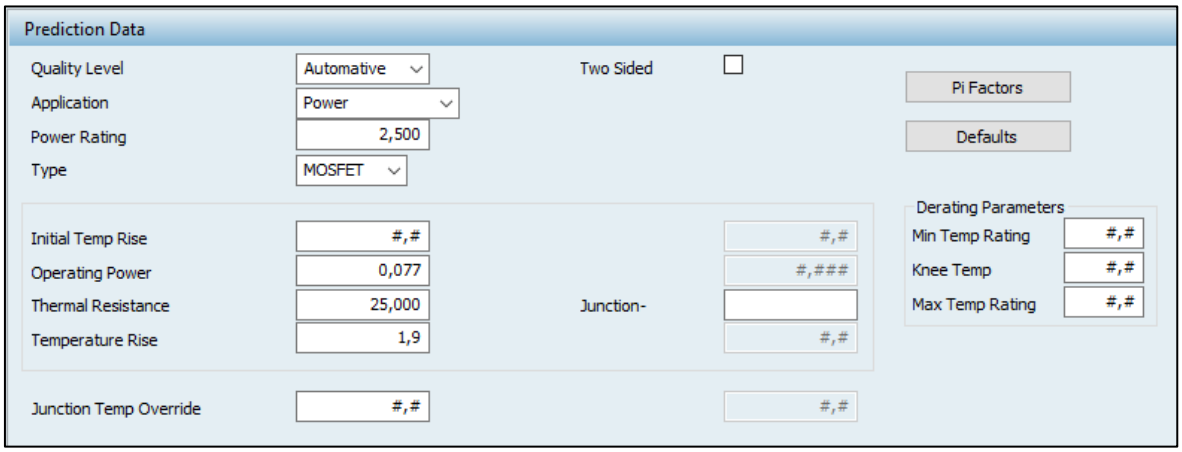


Şekil 4.22. Q1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Buradaki girdiler doğrultusunda Q1 bileşeni için MIL-HDBK-217F ile hesaplanmış olan hata oranı 2,546 FIT'tir.

4.5.6. P-MOSFET MIL-HDBK-217F sonucu

Örnek devrede F1 olarak gösterilen bileşendir. 40 V P kanallı güç MOSFET sınıflandırmasında olan bir bileşendir. Veri sayfasında, otomotiv standardı olan AEC-Q101 standardına göre kalifiye edildiği bilgisi paylaşılmıştır. Bu doğrultuda WQS uygulamasına yapılan girdiler Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. F1 bileşeni MIL-HDBK-217F WQS girdileri

Bu girdiler doğrultusunda F1 bileşeni için MIL-HDBK-217F ile hesaplanmış olan hata 33,616 FIT'tir.

5. SONUÇLARIN KIYASLANMASI VE TARTIŞMA

Sonuçlar devre temelli değerlendirildiğinde FIDES ile elde edilmiş olan hata oranının daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 5.1'de WQS uygulaması ile örnek devre üzerinden gerçekleştirilen güvenilirlik tahmin analizi sonuçları verilmiştir.

Parts Table

Filter

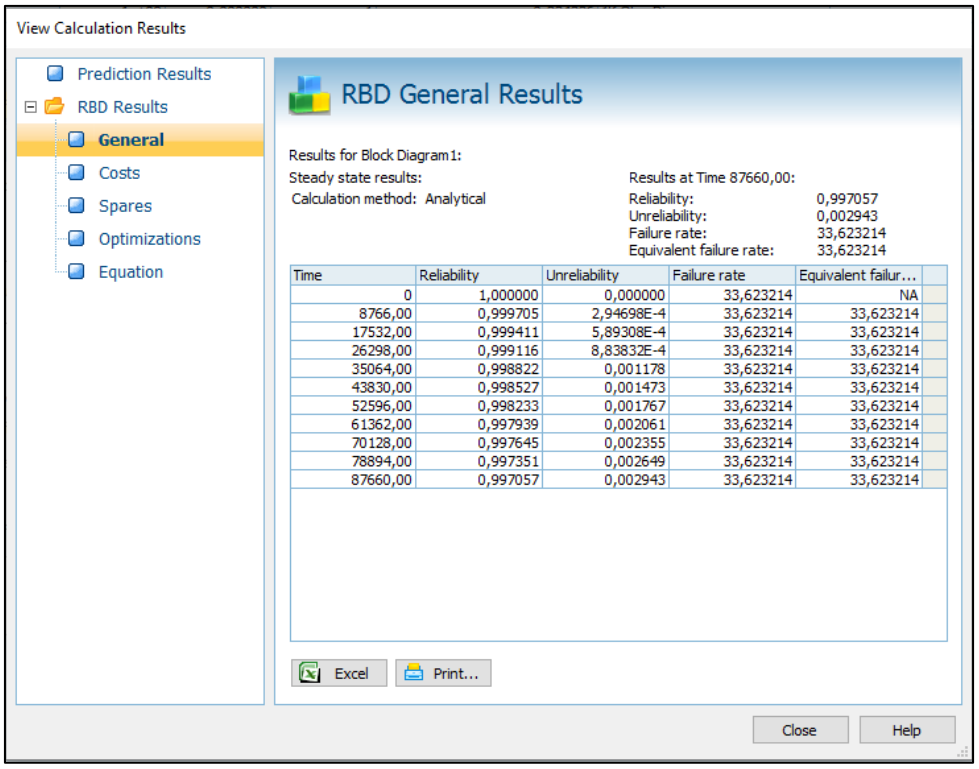
	Name	Description	Part Number	Category	Subcategory	Failure Rate...
1	D1	8.2V Zener Diyot	MM3Z8V2T1G	Discrete Semicondu...	Low Power Diode	0,470577
2	D2	Schottky Diyot	BAS70-04L	Discrete Semicondu...	Low Power Diode	0,116678
3	D3	Schottky Diyot	BAS70-04L	Discrete Semicondu...	Low Power Diode	0,116678
4	C1	100 nF/50 V Kondansatör	GRM1885C1H101JA01-01A	Capacitor	Ceramic	10,317038
5	C2	10 nF/50 V Kondansatör	GRM1885C1H100JA01-01A	Capacitor	Ceramic	6,190223
6	R1	47K Ohm Direnç		Resistor	High Stability Bulk Metal Foil P...	1,066221
7	R2	10 Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,185294
8	R3	100K Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,195932
9	R4	100K Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,185593
10	R5	1K Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,185002
11	F1	40 V P Kanal MOSFET	FDS4685	Discrete Semicondu...	Power Transistor	4,461737
12	Q1	40W NPN Güç Transistörü	2N5190G	Discrete Semicondu...	Power Transistor	3,053670

Şekil 5.1. FIDES örnek devre bileşenleri hata oranları genel görüntüsü

Şekil 5.1'den de görülebileceği üzere kondansatörler, kullanım ömründe o kadar çok hata yapan bileşenler olmamasına rağmen analiz sonucunda hata oranı en yüksek olarak çıkan bileşenler olmuşlardır. Bu, FIDES'in kondansatörler için sunduğu çözümün yetersiz kaldığını gösteren bir durumdur. Pasif bileşenler için güvenilirlik testlerinin gerçekleştirilmemesi sebebiyle maalesef bu değerin yüksek oluşu test verileri ile kıyaslanamamaktadır. Ancak mühendislik tecrübeleri ve geçmiş güvenilirlik tahmin çalışmaları kapsamında, pasif bir bileşen olan kondansatörler için bu değerin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Bu durumu destekleyecek en büyük örnek; aktif bileşenler olan yarı iletkenlerin test verilerinde dahi bu büyüklükte değerler olmamasıdır.

Dirençler her zaman hata yapma ihtimali düşük değerlendirilen bileşenlerdir. Bu durum kondansatörler ile benzerlik gösteriyor olup pasif bileşenler olmalarından kaynaklıdır. FIDES'in bu bileşenler özelinde verdiği sonuçlar küçük hata oranlarından oluşmakla beraber daha gerçekçi sonuçlardır.

FIDES'in yarı iletkenler için verdiği sonuçlar ise; bu bileşenlere ait test verilerinin mevcut olmasından kaynaklı MIL-HDBK-217F'in toplam sonucunun paylaşılması ile kıyaslanarak gösterilmiştir. Örnek devrenin FIDES'e göre toplam hata oranı Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2. FIDES toplam sonuç

Bu şekilde ayrıca 10 yıl boyunca örnek devrenin yıl bazlı güvenilirlik değerindeki değişim de görülebilir. Hata oranının sabit olduğu sistemlerde “Eş. 3.6”dan da anlaşılabileceği üzere güvenilirlik değeri sadece geçen süre ile değişebilmektedir. Örnek devrenin 10 yıl sonunda FIDES ile hesaplanan güvenilirlik değeri 0,997 olarak elde edilmiştir. Örnek devrenin FIDES ile gerçekleştirilen güvenilirlik tahmin analizinde hata oranı 33,623 FIT olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.3’te örnek devrede bulunan bütün bileşenlerin WQS uygulamasındaki genel görünümü ve her birinin MIL-HDBK-217F ile hesaplanmış hata oranları ayrı ayrı görülmektedir.

Parts Table

Filter

	Name	Description	Part Number	Category	Subcategory	Failure Rate...	217 Quality
1	D1	8.2V Zener Diyot	MM3Z8V2T1G	Semiconductor	Diode	5,416939	Automative
2	D2	Schottky Diyot	BAS70-04L	Semiconductor	Diode	1,853813	Automative
3	D3	Schottky Diyot	BAS70-04L	Semiconductor	Diode	1,853813	Automative
4	C1	100 nF/50 V Kondansatör	GRM1885C1H101JA01-01A	Capacitor	Chip, Ceramic (CDR)	55,061506	Commercial
5	C2	10 nF/50 V Kondansatör	GRM1885C1H100JA01-01A	Capacitor	Chip, Ceramic (CDR)	24,799755	Commercial
6	R1	47K Ohm Direnç		Resistor	Film (RL, RLR, RN, RNR, RM)	0,221957	Automative
7	R2	10 Ohm Direnç		Resistor	Film, Var NonWW (RVC)	1,476780	Commercial
8	R3	100K Ohm Direnç		Resistor	Film, Var NonWW (RVC)	6,208606	Commercial
9	R4	100K Ohm Direnç		Resistor	Film, Var NonWW (RVC)	2,080060	Commercial
10	R5	1K Ohm Direnç		Resistor	Film, Var NonWW (RVC)	0,344453	Commercial
11	F1	40 V P Kanal MOSFET	FDS4685	Semiconductor	Si FET	33,615987	Automative
12	Q1	40W NPN Güç Transistörü	2N5190G	Semiconductor	Transistor	2,546069	Automative

Şekil 5.3. MIL-HDBK-217F örnek devre bileşenleri genel görüntüsü

Şekilden de görülebileceği üzere bileşenlerin hepsinde olmasa da FIDES'e göre MIL-HDBK-217F ile hesaplanmış hata oranları çoğunlukla daha yüksek olma eğilimindedir. Bu durum; tahmin edildiği üzere MIL-HDBK-217F'in RAHAT bileşenler için daha kötümser sonuçlar sunduğunu doğrular niteliktedir. MIL-HDBK-217F ile yapılan hesaplamalarda özellikle pasif bileşenlerde çok yüksek bir hata oranı sonucu elde edilmiştir. Bu sonuca göre aktif ve görece daha karmaşık bir MOSFET olan F1 bileşeninin hata oranı pasif ve basit bir bileşen olan R2 direncinden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum henüz saha verileri dahil olmayan bir devrede dahi gerçekleştirilen analizin güvenilirliği ve doğruluğu hakkında fikir verebilir.

View Calculation Results

- Prediction Results
- RBD Results
  - General
  - Costs
  - Spares
  - Optimizations
  - Equation

RBD General Results

Results for Block Diagram1:
Steady state results:
Calculation method: Analytical

Results at Time 87660,00:
Reliability: 0,988194
Unreliability: 0,011806
Failure rate: 135,479738
Equivalent failure rate: 135,479738

Time	Reliability	Unreliability	Failure rate	Equivalent failur...
0	1,000000	0,000000	135,479738	NA
8766,00	0,998813	0,001187	135,479738	135,479738
17532,00	0,997628	0,002372	135,479738	135,479738
26298,00	0,996443	0,003557	135,479738	135,479738
35064,00	0,995261	0,004739	135,479738	135,479738
43830,00	0,994080	0,005920	135,479738	135,479738
52596,00	0,992900	0,007100	135,479738	135,479738
61362,00	0,991721	0,008279	135,479738	135,479738
70128,00	0,990544	0,009456	135,479738	135,479738
78894,00	0,989368	0,010632	135,479738	135,479738
87660,00	0,988194	0,011806	135,479738	135,479738

Excel Print...

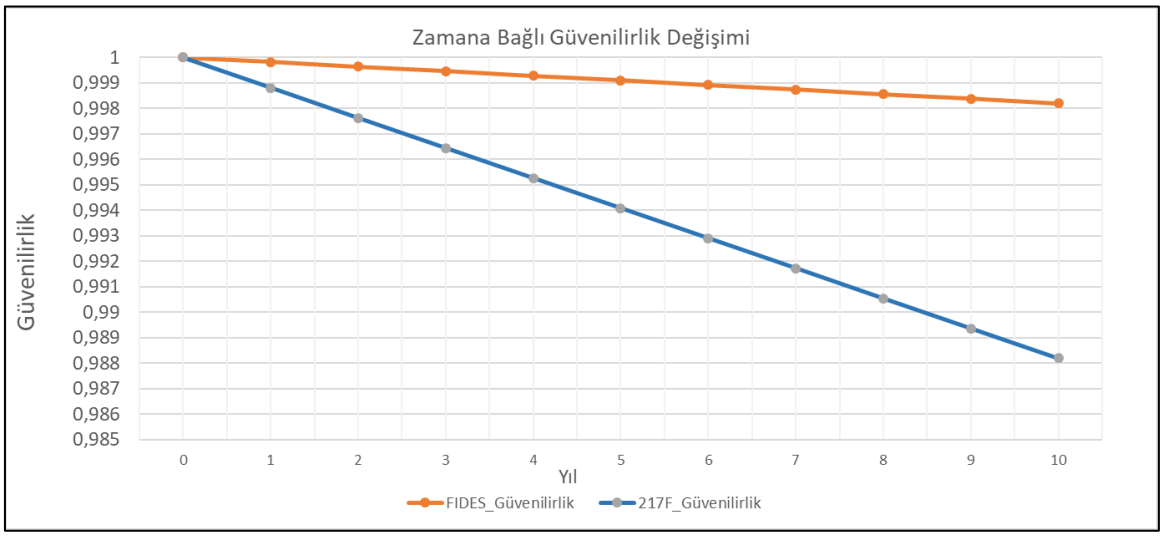
Close Help

Şekil 5.4. MIL-HDBK-217F toplam sonuç

MIL-HDBK-217F standardı ile gerçekleştirilen güvenilirlik tahmin analizinin sonuçları ise Şekil 5.4'de verilmiştir. MIL-HDBK-217F ile hesaplanmış örnek devre güvenilirlik tahminine göre, devrenin toplam hata oranı 135,480 FIT olarak elde edilmiştir. Şekilde devrenin toplam güvenilirlik değerinin 10 yıl boyunca yıllık değişimi görülebilir. 10 yılın sonundaki güvenilirlik değeri ise 0,988 olarak hesaplanmıştır.

Buradaki sonuçlar ışığında MIL-HDBK-217F ile FIDES 2009'un sonuçları arasında neredeyse 4 kat fark vardır. Bütün devre için test verileri mevcut olmadığından bu şekilde bir kıyaslama yapmak sağlıklı olmasa da, sahada karşılaşılan hatalar ve sıklıkları göz önünde bulundurulduğunda MIL-HDBK-217F'in gerçek sonuçlardan uzak değerler verdiği söylenebilir.

Şekil 5.5.'teki grafik ile her iki standartta da yapılan analiz sonuçlarında elde edilmiş olan güvenilirlik değerinin zamana bağlı değişimi gözlemlenebilir.



Şekil 5.5. Zamana bağlı güvenilirlik değişim grafiği

Grafikte, güvenilirlik değerindeki 10 yıllık değişim gözlemlenebilir. Analizin gerçekleştirildiği örnek devrenin 10 yıllık görev ömrü olduğu varsayıldığında MIL-HDBK-217F ile gerçekleştirilen analizin hata oranının yüksekliğine bağlı olarak güvenilirlik değerinde FIDES ile olan fark daha da açılmış olarak gözlemlenmiştir.

FIDES 2009; MIL-HDBK-217F'e kıyasla test verilerine daha yakın sonuçlar vermektedir. Tez kapsamında bu yakınlığı daha da arttırabilmek adına, analiz başında varsayımda

bulunulmuş olan *Süreç_Puanı* değerinde farklı bir değer ele alınarak FIDES'in sonuçlarının daha da iyileştirilip iyileştirilemeyeceğinin denenmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda yine ISO9001 standardı ile uyumlu olan değer aralığında (2,8 ile 3,8) bulunan ancak daha düşük bir hata oranı vereceği tahmin edilen 3,0 değeri WQS uygulamasına girdi olarak sağlanmış ve FIDES için bir hesaplama daha gerçekleştirilmiştir.

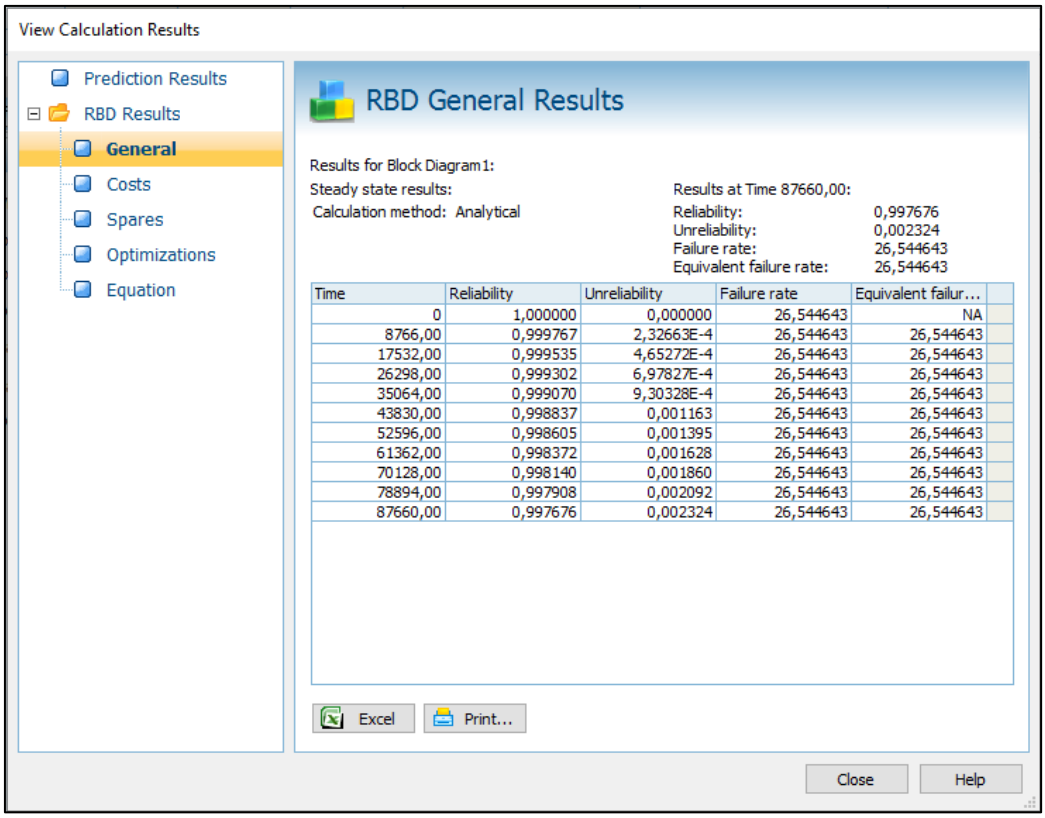
Bu değer doğrultusunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.6'da görülebilir.

Filter

	Name	Description	Part Number	Category	Subcategory	Failure Rate...
1	D1	8.2V Zener Diyot	MM3Z8V2T1G	Discrete Semicondu...	Low Power Diode	0,470577
2	D2	Schottky Diyot	BAS70-04L	Discrete Semicondu...	Low Power Diode	0,116678
3	D3	Schottky Diyot	BAS70-04L	Discrete Semicondu...	Low Power Diode	0,116678
4	C1	100 nF/50 V Kondansatör	GRM1885C1H101JA01-01A	Capacitor	Ceramic	10,317038
5	C2	10 nF/50 V Kondansatör	GRM1885C1H100JA01-01A	Capacitor	Ceramic	6,190223
6	R1	47K Ohm Direnç		Resistor	High Stability Bulk Metal Foil P...	1,066221
7	R2	10 Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,185294
8	R3	100K Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,195932
9	R4	100K Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,185593
10	R5	1K Ohm Direnç		Resistor	Low Power Film (Minimelf)	0,185002
11	F1	40 V P Kanal MOSFET	FDS4685	Discrete Semicondu...	Power Transistor	4,461737
12	Q1	40W NPN Güç Transistörü	2N5190G	Discrete Semicondu...	Power Transistor	3,053670

Şekil 5.6. FIDES *Süreç_Puanı* 3,0 iken hata oranları genel görüntüsü

Süreç_Puanı parametresinin 3,0 olarak girilmesi ile elde edilen sonuçlar aktif bileşenler için test verilerine daha yakın olarak elde edilmiştir.



Time	Reliability	Unreliability	Failure rate	Equivalent failur...
0	1,000000	0,000000	26,544643	NA
8766,00	0,999767	2,32663E-4	26,544643	26,544643
17532,00	0,999535	4,65272E-4	26,544643	26,544643
26298,00	0,999302	6,97827E-4	26,544643	26,544643
35064,00	0,999070	9,30328E-4	26,544643	26,544643
43830,00	0,998837	0,001163	26,544643	26,544643
52596,00	0,998605	0,001395	26,544643	26,544643
61362,00	0,998372	0,001628	26,544643	26,544643
70128,00	0,998140	0,001860	26,544643	26,544643
78894,00	0,997908	0,002092	26,544643	26,544643
87660,00	0,997676	0,002324	26,544643	26,544643

Şekil 5.7. FIDES *Süreç_Puanı* 3,0 iken toplam sonuç

Süreç_Puanı değerinin 3,8 olduğu sonuçlar 33,623 FIT iken; 3,0 olarak WQS'e girildiğinde 26,545 FIT olarak elde edilmiştir. Değerdeki bu düşüş, hata oranı değerinde de bir azaltmaya sebep olarak güvenilirlik değerinde bir iyileştirme sağlamıştır. Buradan yapılacak olan çıkarımlardan ilki; bileşenin/ekipmanın/sistemin kullanılacağı firmadaki güvenilirlik süreçleri FIDES'te mevcut kontrol listesine uygun olarak iyileştirilerek ürünün güvenilirlik değeri için 3,0 değerine yakınsamalıdır. İkinci bir sonuç ise test verilerine daha yakın değerler elde edilebilmesi adına *Süreç_Puanı* değerinin 3,0 seçilmesinin daha gerçekçi sonuçlar verebileceğidir.

FIDES 2009 ve MIL-HDBK-217F ile gerçekleştirilmiş analizlerin her bir bileşen özelindeki sonucu Çizelge 5.1. 'de verilmiştir. Aktif bileşenler özelinde bu sonuçlar test verileri ile de kıyaslanabilir durumdadır. Ayrıca FIDES'in test verilerine nasıl daha yakın sonuçlar verebileceğine yönelik yapılmış olan değerlendirme sonucunda *Süreç_Puanı* değerinin 3,0 olarak alınarak yapılmış hesaplama sonuçları da yine Çizelge 5.1.'de paylaşılmıştır.

Çizelge 5.1. Bileşenler sonuç kıyaslama

Bileşen Numarası	*FIDES 2009 Sonucu (Süreç_Puanı=3,8)*	*FIDES 2009 Sonucu (Süreç_Puanı =3,0)*	*MIL-HDBK-217F Sonucu*	*Test Sonucu*
R1	1,351	1,066	0,222	-
R2	0,235	0,185	1,477	-
R3	0,248	0,196	6,209	-
R4	0,235	0,186	2,080	-
R5	0,234	0,185	0,344	-
C1	13,068	10,317	55,062	-
C2	7,841	6,190	24,800	-
D1	0,596	0,471	5,417	0,26
D2, D3	0,148	0,117	1,854	0,13
F1	5,652	4,462	33,616	3,49
Q1	3,868	3,053	2,546	3,13

Test sonuçlarına göre FIDES ile elde edilmiş değerler test verilerine daha yakın bir durumdadır. R1 ve Q1 bileşeni hariç, MIL-HDBK-217F standardı daha kötümser sonuçlar vermiştir. Ancak test verisi mevcut olan Q1 bileşenin FIDES ile yapılmış olan hata oranı hesaplamasının test sonuçlarına daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tablodan yapılacak bir başka çıkarım ise FIDES'te ele alınmış olan parametrelerden *Süreç_Puanı* parametresinde farklı bir değer alındığında test sonuçlarına daha yakın veriler elde edileceğidir. Bu kıyaslamalardan özetle çıkarılacak olan, RAHAT bileşenlerin kullanıldığı küçük uydularda FIDES standardı ile gerçekleştirilecek olan güvenilirlik tahmin analizlerinin gerçek veriler/ test verileri ile daha örtüşür sonuçlar vereceğidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında örnek devre üzerinden MIL-HDBK-217F ve FIDES 2009 standartları için WQS uygulaması kullanılarak Güvenilirlik Tahmin Analizi gerçekleştirilmiştir. FIDES 2009 kullanılarak gerçekleştirilen çalışma, ele aldığı parametreler açısından daha kapsamlı olmasından kaynaklı çözünürlüğü daha yüksek ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmuştur. Ancak bu standardın uygulamasında parametre miktarındaki fazlalığın beraberinde getirdiği hesaplama karmaşası ve dolayısıyla bir zaman kaybı mevcuttur. Özellikle bileşen temelli hesaplanan parametrelerin çokluğu her ne kadar sonuçların çözünürlüğünü arttırıyor olsa da zaman açısından dezavantajlı konumdadır. Bu çalışmada yapılan analiz, örnek bir devre için gerçekleştirilmiş olup devredeki karmaşık ekipmanların her bir elemanın işlevi tek tek ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında bu parametrelerin her biri tek tek hesaplanmış ve daha doğru bir kıyaslama yapılabilmesi hedeflenmiştir. Ancak FIDES'i kullanacak olan firmalar, devre temelli parametreleri girdi olarak sağlamak yerine ekipman temelli işlevler belirleyip bunları daha genel hale getirerek WQS üzerinden hesaplamalarını gerçekleştirebilir. Bu durum yaşanan zaman kaybının kısmen önlenmesine fayda sağlayacaktır.

MIL-HDBK-217F standardı sadece bileşenin teknolojik hatlarını hesaplamada göz önünde bulundururken; FIDES üretici firma, kullanıcı firma, ürünün kendi kalitesi, kullanıcı firmanın güvenilirlik süreçlerinin olgunluğu gibi bakış açılarıyla çözüm sunmaktadır. Bu durum hem hesaplama sonuçlarında olumlu etkiler yaratmaktadır, hem de bu çok yönlü yaklaşım sayesinde güvenilirliği iyileştirmeye yönelik ne gibi aksiyonların alınabileceği hakkında da fikir vermektedir.

FIDES'in Hatalar Mekaniği'ni göz önünde bulunduran yaklaşımı sayesinde, bu standart ile gerçekleştirilen Güvenilirlik Tahmin Analizi'nin tasarıma etkilerinin doğrudan ve daha etkili olabilecek şekilde olmasıdır. FIDES'in uyguladığı yaklaşım doğrultusunda tasarımda süreçsel, teknolojik ve kullanım gibi farklı açılardan iyileştirici çözümler bulmak mümkündür. Örnek olarak *Süreç_Puanı* hesaplamasında kullanılan kontrol listesindeki sorular doğrultusunda, ürünün geliştirilmesinden sorumlu firma zamanla güvenilirlik süreçlerini iyileştirip tasarım, üretim ve hatta ürünün kullanım ömründe dahi güvenilirliği iyileştirecek çözümler elde edebilmektedir.

Çalışma kapsamında FIDES test sonuçlara daha yakın sonuçlar sunmuş olsa da bu değerlerin test verilerine daha da yaklaşabilmesi adına *Süreç_Puanı* parametresi üzerinde değişiklik yapılması hedeflenmiştir. Analizin başlangıç aşamasında 3,8 olarak alınan değer; sonrasında 3,0 olarak tekrar girilerek değerlendirme yapıldığında FIDES sonuçları test verilerine daha da yakın değerler haline gelmiştir. Çalışma kapsamında bileşenlerin ISO9001 standardı ile uyumlu olan bir firmada kullanıldığı varsayılmıştı ve bu kapsamda 2,8 ve 4,8 değerlerinin ortalaması olan 3,8 değeri girdi olarak sağlanmıştı. Ancak yine bu değer aralığında olan 3,0 değeri girildiğinde elde edilen sonuçların test verilerine daha yakın olması sebebiyle; analiz gerçekleştirilirken bu parametrenin bu şekilde girilecek olmasının test sonuçlarına daha yakın veriler sunacağı gözlemlenmiştir. Bu gözlem doğrultusunda bundan sonraki çalışmalarda bu değerlendirme göz önüne bulundurulabilirdir.

Buna ek olarak *Süreç_Puanı* parametresinin 3,0 değerini sağlayabilmesi adına ürünü kullanacak olan firmada süreçsel iyileştirmelerin sağlanması önem taşımaktadır. Bu değeri düşürmek için yapılacak olan güncellemeler test verilerine yakınlaşmanın yanı sıra nicel ve nitel güvenilirlikte de iyileştirme sağlayacaktır.

Geleneksel uydularda Güvenilirlik Tahmin Analizi yapılırken kullanılan MIL-HDBK-217F standardı; FIDES 2009 standardına kıyasla RAHAT bileşenlerden oluşan devreler için daha genel bir yaklaşım sunmasından kaynaklı, test verileri ile kıyaslandığında doğruluğu daha düşük sonuçlar vermiştir.

Bir diğer husus ise; Hatalar Mekaniği'nin güvenilirlik analizlerindeki kullanımının analizlerin doğruluğuna etkisidir. Matematiksel modellemelerini ve güvenilirlik iyileştirmesine yönelik yaklaşımlarını Hatalar Mekaniği'ni baz alarak oluşturmuş olan FIDES; bu çalışma kapsamında sunduğu gerçekçi yaklaşımlar ile de bunu doğrulamıştır. Hatalar Mekaniği Bölüm 3.1.5'te de bahsedildiği üzere güvenilirlik analizlerinde daha gerçekçi ve kök neden odaklı bir yaklaşım sunar; sistemin güvenilirlik performansını artırarak, uzun vadede operasyonel başarıyı sağlamaya yönelik önemli katkılar sağlar.

Gerçekleştirilmiş olan mevcut çalışmalarda [44] da benzer sonuçlar elde edilmiş olup özellikle uzay alanında [45,46] MIL-HDBK-217F'in sunduğu yaklaşımın yetersizliğine değinilmiştir. Hatta bu çalışmalarda MIL-HDBK-217F standardı ile FIDES arasındaki farkın neredeyse 100 kata kadar dayandığından da bahsedilmiştir.

Daha öncesinde gerçekleştirilmiş çalışmalara ek olarak bu çalışmada tek bir bileşen özelinde bir kıyaslama değil devre bazlı bir kıyaslama gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla FIDES'in sunduğu çözüm farklı türdeki bileşenler özelinde de değerlendirilerek literatüre katkıda bulunulmuştur.

FIDES'in sunduğu yaklaşımın bir başka artısı olarak ise Hatalar Mekaniği'nin teknolojik gelişmeler ile eşlenik olacak şekilde güncellemelere açık olması ve standardın belirli aralıklarla yenilenerek güncelliğini korumasıdır. Burada, MIL-HDBK-217F'in en son 1995 yılında güncellendiğini hatırlatmak faydalı olacaktır.

Çalışmada, FIDES 2009'un RAHAT ürünler özelinde daha doğru sonuçlar vereceğinden bahsedilmesi, RAHAT ürünlerden oluşan küçük uydular için uygulanabilirliğini doğrular niteliktedir. Ancak belki sonrasında yapılacak olan çalışmalar, FIDES'in güncel versiyonu 2023 ile gerçekleştirilecek olan güvenilirlik tahmin analizleri ile bu durumun RAHAT ürünler ve dolayısıyla küçük uydular özelinde sınırlı kalmayacağını doğrulayabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Small Satellite History. URL: https://newspaceeconomy.ca/2023/07/14/a-timeline-of-the-smallsat-market-past-present-and-future/, Son Erişim Tarihi: 28.07.2024.

2. İnternet: Space Accidents. URL: https://www.britannica.com/story/7-accidents-and-disasters-in-spaceflight-history, Son Erişim Tarihi: 28.07.2024.

3. European Cooperation for Space Standardization. (2017). Space Product Assurance – Dependability, ECSS-Q-ST-30C, Rev. 1. Noordwijk, The Netherlands.

4. Langer, M. (2018). *Reliability assessment and reliability prediction of CubeSats through system level testing and reliability growth modelling*, Doktora Tezi, Münih Teknik Üniversitesi, Münih.

5. Demko, E., Grumman, N. (1996). "Commercial-off-the shelf (COTS): A challenge to military equipment reliability," *Proceedings of 1996 Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Las Vegas, NV, USA, 1996, pp. 7-12.

6. İnternet: FIDES. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fides_(reliability), Son Erişim Tarihi: 11.08.2024.

7. İnternet: Physics of Failure. URL: https://www.ansys.com/blog/what-is-physics-of-failure#:~:text=Physics%20of%20Failure%20is%20used,of%20failure%20within%20specified%20environmentshttps://en.wikipedia.org/wiki/Fides_(reliability), Son Erişim Tarihi: 11.08.2024.

8. İnternet: Types of orbits. URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits, Son Erişim Tarihi: 21.10.2024.

9. İnternet: Satellite model Philosophy. URL: https://www.eetimes.com/the-model-philosophy-used-by-space-engineering-companies/, Son Erişim Tarihi: 08.10.2024.

10. European Cooperation for Space Standardization. (2023). ECSS System – Glossary of Terms, ECSS-S-ST-00-01C, Rev. 1. Noordwijk, The Netherlands.

11. European Cooperation for Space Standardization. (2010). Space Engineering – Verification Guidelines, ECSS-E-HB-10-02A. Noordwijk, The Netherlands.

12. European Cooperation for Space Standardization. (2022). Space Engineering – Testing, ECSS-E-ST-10-03, Rev. 1. Noordwijk, The Netherlands.

13. Pelton, J. N., & Madry, S. (2020). *Handbook of small satellites* (1st ed.). Springer.

14. İnternet: Satellite sizes. URL: https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Smallsats_2023.pdf, Son Erişim Tarihi: 28.10.2024.

15. O'Connor, P. D. T. (1995), “Quantifying uncertainty in reliability and safety studies,” Microelectronics Reliability, vol. 35, no. 9, pp. 1347–1356.

16. Birolini, A. (2007). *Reliability engineering theory and practice*. (5. Baskı). İtalya: Springer.

17. Department of Defense. (2012). Electronic Reliability Design Handbook. MIL-HDBK-338B (Notice-2).

18. İnternet: Reliability Prediction Standards. URL: https://relyence.com/2018/07/16/guide-reliability-prediction-methods/, Son Erişim Tarihi: 04.08.2024.

19. İnternet: Automotive Safety Standards. URL: https://iies.in/blog/what-are-automotive-safety-standards/, Son Erişim Tarihi: 04.08.2024.

20. European Cooperation for Space Standardization. (2009). Space Product Assurance – Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA), ECSS-Q-ST-30-02C. Noordwijk, The Netherlands.

21. European Cooperation for Space Standardization. (2021). Space Product Assurance – Derating-EEE Components, ECSS-Q-ST-30-11C, Rev. 2. Noordwijk, The Netherlands.

22. İnternet: Bathtub Curve. URL: https://www.geeksforgeeks.org/short-note-on-bathtub-curve/, Son Erişim Tarihi: 06.10.2024.

23. Faure, P., Tanaka, A., & Cho, M. (2017). Toward lean satellites reliability improvement using HORYU-IV project as case study. *Acta Astronautica, 133*, 33-49.

24. European Cooperation for Space Standardization. (2011). Space Product Assurance – Components Reliability Data Sources and Their Use, ECSS-Q-HB-30-08A. Noordwijk, The Netherlands.

25. Kenichi, S., Takashi, Y., Toru, Y., Yasuhiro, F., Tomoaki, N. (2022). Efforts to improve spacecraft reliability prediction method to evaluate the probability of successful disposal in ISO 24113:2019. *Journal of Space Safety Engineering*, 656-661.

26. Özkale Bayram, Y., Akçam, N. 2024. Comparison of FIDES guide 2009 and MIL-HDBK-217F in small satelittes. *5. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi*, İstanbul, 299-307.

27. İnternet: Texas Instruments. URL: https://www.ti.com/quality/docs/estimator.tsp, Son Erişim Tarihi: 10.10.2024.

28. U.S. Department of Defense. (1995). *MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment* (Version F). Washington, DC: Department of Defense.

29. FIDES Group. (2009). *FIDES Guide 2009: Reliability Methodology for Electronic Systems*. Paris: FIDES Group.

30. İnternet: FIDES Space. URL: https://dmd.solutions/blog/2024/07/05/reliability-prediction-analysis-of-space-technology-using-fides/, Son Erişim Tarihi: 12.10.2024.

31. İnternet: Onsemi reliability. URL: https://www.onsemi.com/PowerSolutions/reliability.do, Son Erişim Tarihi: 15.10.2024.

32. Bourbouse, S., Giraudeau, M., Montigaud, T. (2024). *Physics of Failure and NRPM or FIDES, Links and Limits of Both Approaches*. ESA RAMS Conference, Noordwijk, 1-21.

33. İnternet: Onsemi quality. URL: https://www.onsemi.com/company/about-onsemi/quality-and-reliability, Son Erişim Tarihi: 04.11.2024.

34. Yageo. (2024). *MFR Series Metal Film Resistors.* New Taipei, Tayvan, 1-17.

35. Yageo. (2022). *RC_L Series Chip Resistors 10R_Yageo*, Tayvan, 1-11.

36. Yageo. (2022). *RC_L Series Chip Resistors 100K_Yageo*, Tayvan, 1-11.

37. Yageo. (2022). *RC_L Series Chip Resistors 1K_Yageo*, Tayvan, 1-11.

38. Murata. (2021). *Chip Multilayer Ceramic Capacitors for General Purpose GRM1885C1H101JA01_(1608M(0603), C0G(EIA), 100pF, DC 50V)*, Japan, 1-31.

39. Murata. (2021). *Chip Multilayer Ceramic Capacitors for General Purpose GRM1885C1H100JA01_(1608M(0603), C0G(EIA), 10pF, DC 50V)*, Japan, 1-31.

40. Onsemi. (2023). *Schottky Barrier Diode BAS70-04L*, Arizona, 1-5.

41. Onsemi. (2021). *300 mW SOD−323 Surface Mount MM3ZxxxT1G Series*, Arizona, 1-7.

42. Onsemi. (2013). *Silicon NPN Power Transistors, 2N5190G*, Arizona, 1-7.

43. Onsemi. (2017). *SFDS4685 40V P-Channel PowerTrench MOSFET* , Arizona, 1-6.

44. Ahmadi, M., Shekhar, A., & Bauer, P. (2023). Comparison of Military Handbook and the FIDES Methodology for Failure Rate Estimation of Modular Multilevel Converters. *CPE-POWERENG 2023 - 17th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, Tallinn, Estonia, 2023, pp. 1-6.

45. İnternet: Comparison of FIDES and MIL-HDBK-217F. URL: https://nepp.nasa.gov/docs/papers/2020-NASA-FIDES-CALCE-Report-Univ-MD-Pecht-Das-Gaonkar.pdf, Son Erişim Tarihi: 12.11.2024.

46. İnternet: FIDES in space. URL: https://escies.org/download/webDocumentFile?id=67086, Son Erişim Tarihi: 13.11.2024.



Gazili olmak ayrıcalıktır