



**ELEKTRO-OPTİK CİHAZLARIN PLATFORM ENTEGRASYONU
TASARIM PROGRAMI**

Kardelen ERCAN KÖSEOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2021

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Kardelen ERCAN

KÖSEOĞLU

12/08/2021

ELEKTRO-OPTİK CİHAZLARIN PLATFORM ENTEGRASYONU TASARIM PROGRAMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Kardelen ERCAN KÖSEOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Savunma sanayiinde elektro-optik cihazlar, kullanıcı için hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle sistemin arızalanması veya kullanılamaması kritik sorunlar ortaya çıkarabilmektedir. Sistem gereksinimlerinin amaca uygun, doğru ve eksiksiz belirlenmesi, tasarımda elde edilen performansı arttırmakta ve en az arıza-hata süresini sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda, platforma entegre sistem seviyesi tasarımlar için bir yol haritası programının bulunmadığı görülmüştür. Eksik veya öngörülememiş gereksinimler nedeniyle sistem tasarımlarında, testlerinde, nihai entegrasyon esnasında veya entegrasyon sonrasında birçok hata ile karşılaşıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada amaç, savunma sanayii için geliştirilecek askeri sistem çözümlerine, sistem mühendisliği bakış açısı ile ortam koşulları gözetilerek hata oranı düşük bir tasarım çözümü için sistem fonksiyonel parametreleri, çevre koşulları ve mekanik gereksinimlerin oluşturulmasında kullanıcıya yol gösterecek bir tasarım rehber programı oluşturmaktır. Çalışmada, askeri alandaki deniz-kara sistemlerinde kullanılan elektro-optik cihazların termal kamera, gündüz kamera ve lazer mesafe ölçer seçimi için gerekli alt parametreleri belirlenmiştir. Deniz veya kara platformunda çalışacak sistemlerde kullanılması gereken, malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine göre seçimi, mekanik dayanımları, kaplama ve boya gereksinimleri, toz-sıvı sızdırmazlık önlemleri, korozyon önlemleri, sökülebilir-sökülemez bağlantı elemanları için ortam koşulları dikkate alınarak mekanik seçim parametreleri oluşturulmuştur. Cihazların ömür devrinde karşılaşılabilecek ortam koşulları için yapılması gereken askeri çevre koşulları test gereksinimleri ve platform için ihtiyaç duyulan test parametreleri açıklanmıştır. Tüm bilgiler excel üzerinden yazılan tasarım programına aktararak program kullanıcılarına tasarım yönlendirmesi yapılmıştır. Böylece, tasarıma ait temel ve detay gereksinimlerin atlanmadan oluşturulması sağlanmıştır. Programın çıktısı olarak sistem mühendislerinin hazırladığı gereksinim dokümanlarına girdi sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 91439

Anahtar Kelimeler : Platform Entegrasyon, Gereksinim, Sistem Mühendisliği, Program, Mekanik, Çevre Koşulları

Sayfa Adedi : 201

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi O. Selim TÜRKBAŞ

PLATFORM INTEGRATION DESIGN PROGRAM OF ELECTRO-OPTICAL DEVICES

(M. Sc. Thesis)

Kardelen ERCAN KÖSEOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

Electro-optical devices are of vital importance for the user in the defense industry. For this reason, the failure of the system or its inability to use it can cause critical problems. Determining the system requirements in accordance with the purpose, correct and complete increases the performance obtained in the design and provides the least downtime. Studies have shown that there is no roadmap program for system-level designs integrated into the platform. It has been determined that many errors have been encountered in system designs, tests, and final integration or after integration due to missing or unforeseen requirements. For this reason, the purpose of this study is to create a design guide program that will guide the user in the creation of system functional parameters, environmental conditions and mechanical requirements for a design solution with a low error rate, considering the system engineering perspective and environmental conditions for the military system solutions to be developed for the defense industry. In the study, the sub-parameters that required for the selection of thermal cameras, day cameras and laser distance meters of electro-optic devices used in military sea-land systems were determined. Mechanical selection parameters have been established by considering the selection of materials according to their physical and mechanical properties, mechanical strength, coating and dye requirements, dust-liquid impermeability measures, corrosion precautions, and environmental conditions for removable-non-removable fasteners, which should be used in systems that will operate on sea or land platforms. Military environmental conditions test requirements and test parameters required for the platform are explained for the ambient conditions that the devices will encounter during their lifetime. All information was transferred to the design program written on excel, and design guidance was made to the program user. Thus, it was ensured that the basic and detailed requirements of the design were created without skipping. Requirement documents prepared by system engineers are provided as an output of the program.

Science Code : 91439

KeyWords : Platform Integration, Requirement, System Engineering, Program, Mechanical, Environmental Requirements

Page Number : 201

Supervisor : Assist. Prof. Dr. O. Selim TÜRKBAS

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın başından sonuna kadar her aşamasında ilgisini ve desteğini esirgemeyen, tecrübeleri ve bilgisiyle bana ışık tutan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Osman Selim TÜRKBAŞ'a, tez konumun seçiminde ve çalışmam süresince bilgi birikimiyle yol gösteren, tıkanıp gittiğim noktalarda görüşleriyle her zaman yanımda olan, yardımlarını esirgemeyen, tezimin ikinci danışmanı Dr. Tolga DURSUN'a saygı, minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Süreç boyunca çalışmalarına her türlü altyapı ve imkânı sunan değerli ve kıymetli kurumum ASELSAN A.Ş' ye teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım süresince motivasyon ve desteğini eksik etmeyen eşim Erkan KÖSEOĞLU'na, bu zamanlarıma gelmemi sağlayan, yetiştiren, annem Songül ERCAN ve Babam Hüseyin ERCAN ve kardeşim Duygu ERCAN'a sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. PROGRAM ALTYAPISI VE TARANAN TEMEL BİLGİLER.....	7
2.1. Program Kapsamı.....	7
2.2. Elektro-Optik Sistemler	8
2.3. Elektromanyetik Spektrum ve Kızılötesi Bölge.....	10
2.4. Kızılötesi Görüntüleme Sistemleri	11
2.5. Atmosferik Geçirgenlik.....	14
2.6. Termal Kamera Alt Birimleri.....	15
2.6.1. Dedektör.....	15
2.6.2. Kızılötesi bölge optik malzeme çeşitleri	18
2.7. Kızılötesi Görüntüleme Sistemine Etki Eden Temel Parametreler.....	20
2.7.1. Çözünürlük.....	20
2.7.2. Kare hızı (frame rate).....	22
2.7.3. f Sayısı.....	22
2.7.4. NETD	23
2.7.5. Görüş alanı (field of view (FOV))	23

	Sayfa
2.7.6. IFOV	24
2.7.7. MRTD	24
2.7.8. Hedef tespit/teşhis/tanıma	26
2.7.9. Optiklerde kaplama	29
2.8. Normalizasyon (NUC)	30
2.9. Atermalizasyon	31
2.10. Optik Yakınlaştırma ve Elektronik Yakınlaştırma.....	32
2.11. Beyaz Sıcak – Siyah Sıcak Görüntü.....	33
2.12. Kontrast	33
2.13. Görüş Mesafesi ve Hava Koşulları	33
2.14. Gündüz Görüş Sistemleri	35
2.14.1. Görünür ışık optik malzeme çeşitleri	36
2.14.2. Gündüz kameraları optik hedef tespit/teşhis/tanıma	36
2.15. Lazer Sistemleri	37
2.15.1. Lazer mesafe ölçer sistemleri (LMÖ)	38
2.15.2. Lazer mesafe ölçüm bilgisi	38
2.15.3. Lazer sistemlerinde dalga boyu bilgileri	39
2.15.4. Tehlike sınıfı	39
2.15.5. Hassasiyet.....	40
2.16. Genel Video/Görüntü Standardları	40
2.16.1. Analog görüntü	40
2.16.2. Renk modelleri	41
2.16.3. Görüntü işaret tipleri	42
2.16.4. Sayısal (dijital) görüntü.....	42

	Sayfa
2.17. Mekanik Sistem Gereksinimleri.....	43
2.17.1. Malzeme seçimi	43
2.17.2. Sökülebilir bağlantı elemanları	53
2.17.3. Bağlantı elemanları için montaj gereksinimleri	57
2.17.4. Kimyasal kilitleyici (vida gevşemezlilik) elemanlar.....	58
2.17.5. Korozyon.....	60
2.17.6. Metalik kaplamalar	66
2.17.7. Boya gereksinimleri	72
2.17.8. Askeri konektörler.....	79
2.17.9. Hizalama (Boresight)	84
2.18. Çevre Koşulları Gereksinimleri	87
2.18.1. Düşük basınç testi	89
2.18.2. Yüksek sıcaklık testi	90
2.18.3. Düşük sıcaklık testi	91
2.18.4. Isıl şok testi	91
2.18.5. Güneş ışıması testi	92
2.18.6. Yağmurlama testi	93
2.18.7. Nem testi	93
2.18.8. Tuz sisi testi	94
2.18.9. Toz ve kum testi	94
2.18.10. Suyu daldırma testi.....	95
2.18.11. Titreşim testi	95
2.18.12. Mekanik şok testi	96
2.18.13. TSE IP sızdırmazlık testi.....	97

	Sayfa
2.19. EMI-EMC	98
2.20. Titreşim ve Şok İzolatörleri	101
3. PROGRAM TASARIM YÖNTEMLERİ.....	103
3.1. Programlama Yöntemi ve Alt Yapısı.....	103
3.2. Kullanıcı Arayüzü Gereksinimleri	106
3.3. Mekanik Sistem Gereksinim Önerileri.....	113
3.3.1. Malzeme seçimi	113
3.3.2. Sökülebilir bağlantı elemanları kullanım ve gereksinim önerileri.....	118
3.3.3. Kimyasal kilitleyicilerin kullanım ve gereksinim önerileri	122
3.3.4. Korozyon tasarımı ve gereksinim önerileri.....	123
3.3.5. Metalik kaplama tasarım ve gereksinim önerileri.....	131
3.3.6. Boya gereksinim ve tasarım önerileri	135
3.3.7. Askeri konektörlerin kullanım tasarım ve gereksinim önerileri	136
3.4. Programlama Yöntemi ve Alt Yapısı.....	140
3.4.1. Çevre testleri önerileri ve sıralamaları	143
3.5. EMI-EMC Gereksinim Önerileri	151
3.6. MTBF Hesaplama	151
3.6.1. Dişli bağlantı elemanlarında hata oranı hesaplama.....	153
3.6.2. Rulman hata oranı hesaplama	156
3.6.3. Şaft hata oranı hesaplama.....	159
3.6.4. Pimler ve kamalar için hata oranı hesaplama.....	162
3.6.5. Yaylarda hata oranı hesaplaması.....	162
3.6.6. Sistem seviyesi MTBF hesaplamaları.....	165
3.6.7. Genel elektronik ekipmanların hata oranı analizi	168

	Sayfa
3.6.8. MTBF analizi uygulaması.....	168
3.7. Titreşim ve Şok İzolatör Seçimi.....	178
3.7.1. Titreşim yüküne maruz kalan platformlar için izolatör seçimi	179
3.7.2. Şok yüküne maruz kalan platformlar için izolatör seçimi	183
3.7.3. İzolatör seçim analizi	185
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	187
KAYNAKLAR	189
EKLER.....	196
EK-1. MTBF analizi uygulaması için doğrulama	198
ÖZGEÇMİŞ	201

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Örnek bir EO sistem alt bileşenleri çalışma dalga boyu farklılıkları.....	9
Çizelge 2.2. Kızılötesi bölge tanımları	11
Çizelge 2.3. Spektral bant kullanım önerileri	13
Çizelge 2.4. Uluslararası görüş mesafesi kodları.....	35
Çizelge 2.5. USAF 1951 Hedefi çözünürlük değerleri	37
Çizelge 2.6. Lazer tehlike sınıflandırması	40
Çizelge 2.7. Analog video formları temel bilgileri	41
Çizelge 2.8. Alüminyum işlem alaşım aileleri	44
Çizelge 2.9. Alüminyum döküm alaşım aileleri	45
Çizelge 2.10. Al ısıt işlemleri ve özellikleri	46
Çizelge 2.11. “T” ısıt işlem alt grupları	46
Çizelge 2.12. Alüminyum işlem alaşımları ve özellikleri.....	47
Çizelge 2.13. Dökme alüminyum alaşımları için karakteristik değerler	48
Çizelge 2.14. AISI-SAE yapı çelikleri sınıflandırması	51
Çizelge 2.15. AISI-SAE paslanmaz çeliklerin sınıflandırması.....	51
Çizelge 2.16. Kompozit malzemelerin özellik karşılaştırılması	51
Çizelge 2.17. Farklı fiber, kompozit ve metallere ait özgül değerler	52
Çizelge 2.18. Genel kullanılan dış profil standartları	53
Çizelge 2.19. ISO 898 metrik cıvata kaliteleri mekanik özellikleri	55
Çizelge 2.20. Östenitik paslanmaz çelik sınıfı elemanlar için mekanik özellikler	57
Çizelge 2.21. Genel korozyon tipleri ve açıklamaları.....	60
Çizelge 2.22. Galvanik çiftler	63
Çizelge 2.23. Metalik kaplama açıklamaları.....	70

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.24. Boya teknikleri.....	73
Çizelge 2.25. En yaygın kullanılan boyalar hakkında özet bilgiler	74
Çizelge 2.26. Temel boya reçineleri karşılaştırılması.....	75
Çizelge 2.27. Temel boya hataları ve sebepleri	78
Çizelge 2.28. konektör tanımlama ilk hane açıklaması	81
Çizelge 2.29. Seri III ve IV sınıf, malzeme, kaplama bilgileri	81
Çizelge 2.30. Konektör boyut kodlama bilgileri.....	83
Çizelge 2.31. Konektör kontak tipleri.....	84
Çizelge 2.32. Sistem tasarımlarında en sık görülen hatalar ve nedenleri	87
Çizelge 2.33. MIL-STD-810 test numaraları ve tanımları.....	89
Çizelge 2.34. MIL-STD-461'e göre temel test grupları	98
Çizelge 2.35. EMI/EMC test gereksinimleri.....	99
Çizelge 2.36. Gereksinim matrisi.....	100
Çizelge 2.37. Genel izolator tipleri	101
Çizelge 3.1. EO sistem gereksinimleri için program soruları ve örnek maddeleri	106
Çizelge 3.2. Mekanik sistem gereksinimleri için program soruları ve maddeleri	110
Çizelge 3.3. Çevre koşul gereksinimleri için program soruları ve maddeleri	112
Çizelge 3.4. Bazı Al alaşımları için mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	114
Çizelge 3.5. Bazı paslanmaz çeliklerin mekanik özellik karşılaştırılması	115
Çizelge 3.6 Bazı paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı karşılaştırılması	115
Çizelge 3.7. Bazı malzemelere ait ısıl genleşme katsayıları	116
Çizelge 3.8. Sıklıkla kullanılan metal malzemelerinin karbon kompozitle uyumu	117
Çizelge 3.9. Vida başı fatura ölçüleri.....	120
Çizelge 3.10. Kimyasal kilitleyici çeşitleri ve kullanım alanları	122

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.11. Belirli metal ve alaşımların arasındaki galvanik uyumluluk	126
Çizelge 3.12. Jam-nut tipi D38999 konektörler için çap ve tolerans bilgileri	138
Çizelge 3.13. Flanşlı D38999 konektörlere ait çap ve tolerans bilgileri.....	138
Çizelge 3.14. Mekanik bileşenler için arıza modları	141
Çizelge 3.15. MIL-STD-810 Standardı revizyon H'ye göre sıcak iklim sıcaklıkları	148
Çizelge 3.16. MIL-STD-810 Standardı revizyon H'ye göre soğuk iklim sıcaklıkları....	148
Çizelge 3.17. Çeşitli test sıralamaları	151
Çizelge 3.18. Temel hata oranı listesi	153
Çizelge 3.19. Çeşitli yüklemeler için düzeltme katsayısı	154
Çizelge 3.20. Darbe sıklığı düzeltme katsayıları	155
Çizelge 3.21. Stres yoğunlaşması için düzeltme katsayıları	156
Çizelge 3.22. Güvenilirlik düzeltme katsayısı	157
Çizelge 3.23. Rulman çalışması kullanım koşulları düzeltme katsayısı	158
Çizelge 3.24. Rulman kirlenme seviyesi düzeltme katsayısı	158
Çizelge 3.25. Şaft yüzey kalitesi düzeltme katsayısı	159
Çizelge 3.26. İzin verilen şaft sapması	161
Çizelge 3.27. Şaft fatura yiv devamsızlığı için stres konsantrasyonu	162
Çizelge 3.28. En sık kullanılan yay malzemelerinin elastisite ve kayma modülleri	163
Çizelge 3.29. MIL-HDBK-217 çevresel faktörler ve tanımları.....	166
Çizelge 3.30. Parça listesi	169
Çizelge 3.31. Parça listesi	173
Çizelge 3.32. Mil ölçüleri	175
Çizelge 3.33. Sistem toplam MTBF hesabı	176

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tasarım programı blok şeması.....	7
Şekil 2.2. Örnek bir elektro-optik sistemin mimarisi.....	8
Şekil 2.3. Örnek bir elektro-optik sistem alt bileşenleri	9
Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum	10
Şekil 2.5. Kızılötesi sistem bileşenleri.....	12
Şekil 2.6. Coğrafyasal sıcaklıklar	14
Şekil 2.7. Atmosferik geçirgenlik	15
Şekil 2.8. Soğutmalı dedektör görseli	16
Şekil 2.9. a) Taramalı FPA b) Taramasız FPA	18
Şekil 2.10. En çok kullanılan kızılötesi bölge optik malzemeleri geçirgenlik eğrileri ...	20
Şekil 2.11. Çözünürlük	21
Şekil 2.12. Piksel tanımları	21
Şekil 2.13. f sayısı ve lens açıklığı.....	23
Şekil 2.14. IFOV görünüşü	24
Şekil 2.15. MRTD ölçümleri için kullanılan standard periyodik dört çubuk hedefi	25
Şekil 2.16. (a) hedef tespit, (b) hedef teşhis, (c) hedef tanıma [28].....	27
Şekil 2.17. MWIR kamera görüş mesafesi, nem ve sıcaklık farkları	28
Şekil 2.18. LWIR kamera görüş mesafesi, nem ve sıcaklık farkları	28
Şekil 2.19. Sis in termal kamera görüntüsüne etkisi	34
Şekil 2.20. USAF hedef çizgileri	37
Şekil 2.21. Lazer sapma parametreleri.....	39
Şekil 2.22. Dünyada video standartları	41
Şekil 2.23. Temel alüminyum alaşımları	44

Şekil	Sayfa
Şekil 2.24. Kompozit fiber serim farkları	53
Şekil 2.25. Paslanmaz çelik bağlantı elemanları için tanımlama sistemi	56
Şekil 2.26. (a) Taşıma dayanımı yetmezliği, (b) kopma dayanımı yetmezliği, (c) çekme dayanımı yetmezliği	57
Şekil 2.27. Parça kenar mesafeleri	58
Şekil 2.28. Dişli arayüzleri arasındaki boşluk	59
Şekil 2.29. (a) Vida yuvası, (b) kör delik, (c) montaj sonrası.....	59
Şekil 2.30. Metal ve alaşımlarının akan deniz suyu içindeki potansiyelleri.....	64
Şekil 2.31. D38999 konektör serileri (a) seri I, (b) seri II, (c) seri III (d) seri IV.....	80
Şekil 2.32 K ve W sınıf konektörlerin görünüşü	82
Şekil 2.33. Konektör anahtarlama yönleri	84
Şekil 2.34. Bore sight mekanizması	86
Şekil 2.35. Mekanik şok altında lehim kırılması	88
Şekil 2.36. PCB kart lehiminin termal genleşme sonucu kırılması	88
Şekil 2.37. EMI/EMC testleri için izole, yansıtmasız oda örneği, ASELSAN.....	100
Şekil 3.1. Program kütüphanesi EO sistemler kırılım ağaç yapısı.....	103
Şekil 3.2. Program kütüphanesi mekanik sistem gereksinimleri kırılım ağaç yapısı	104
Şekil 3.3. Program kütüphanesi çevre koşulları gereksinimleri kırılım ağaç yapısı.....	104
Şekil 3.4. Vida başı için fatura ölçüleri.....	119
Şekil 3.5. Katot/anot yüzey alanının korozyon hızına etkisi	125
Şekil 3.6. (a) uygun olmayan, (b) uygun tasarım, (c) uygun tasarım	125
Şekil 3.7. Uygun ve uygun olmayan tasarımlar	129
Şekil 3.8. Uygun ve uygun olmayan tasarımlar	129
Şekil 3.9. Tasarımlarda yapılabilecek eğimli yüzey önerileri.....	130
Şekil 3.10. Mekanik şok sebebiyle PCB üzerindeki lehim kırılması.....	142

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. Maruz kalınan indüklenmiş ve doğal çevre faktörleri, depolama.....	145
Şekil 3.12. Maruz kalınan indüklenmiş ve doğal çevre faktörleri, çalışma.....	146
Şekil 3.13. MIL-STD-810 standardı revizyon H'ye göre sıcak iklim kategorileri.....	147
Şekil 3.14. MIL-STD-810 Standardı revizyon H'ye göre soğuk iklim kategorileri.....	147
Şekil 3.15. Genel bir şaft montaj görseli	161
Şekil 3.16. Temel yay ölçü temsilleri	163
Şekil 3.17. Tek serbestlik dereceli bir sistemin izolasyon bölgesini gösteren grafik	179
Şekil 3.18. Sönümleme değerine göre izolasyon karakteristiklerini gösteren eğriler.....	180
Şekil 3.19. İzolatörün şoku sönümlemesi	183
Şekil 3.20. Değişik formlardaki şoklar için hız bilgisinin elde edilişi.....	184

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Program kullanıcı arayüzü görünümü	106
Resim 3.2. Mekanik yansıtıcı eleman parçası montajı.....	168
Resim 3.3. Bilyalı rulman MTBF hesabı	170
Resim 3.4. Baskı yayı MTBF hesabı	170
Resim 3.5. Vida MTBF hesaplaması	171
Resim 3.6. Rulman yüzüğü MTBF hesaplaması	172
Resim 3.7. Yay aralayıcı MTBF hesaplaması	172
Resim 3.8. Gimbal ana şaft montajı.....	172
Resim 3.9. Gimbal ana montaj bilyalı rulman MTBF hesabı	174
Resim 3.10. Gimbal ana montaj rulman yüzüğü MTBF hesaplaması	174
Resim 3.11. Gimbal ana montaj mil MTBF hesaplaması	175
Resim 3.12. Doğrulaması yapılan MTBF analiz parçaları.....	177
Resim 3.13. Sistem MTBF analiz sonucu.....	177

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
m	Metre
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
m²	Metrekare
mm²	Milimetrekare
cm²	Santimetrekare
cm³	Santimetreküp
km	Kilometre
g	Gram
kg	Kilogram
Hz	Hertz
N	Newton
kN	Kilonewton
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
°C	Santigrat derece
°F	Fahranheit derece
K	Kelvin
s	Saniye
dk	Dakika
rpm	Revolutions per minute
#	Numara
λ	Lambda

Kısaltmalar**Açıklamalar**

2-D	Two dimensions
ANSI	American National Standards Institute
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic interference
EO	Elektro-Optik
FIR	Far infrared
FOV	Field of view
FPA	Focal Plane Array
HB	Hardness Brinell
HD	High Definition
IFOV	Instantaneous field of view
IR	Infrared
LMÖ	Lazer Mesafe Ölçer
LWIR	Longwave infrared
MIL-HDBK	Military Handbook
MIL-STD	Military Standard
MRTD	Minimum Resolvable Temperature Difference
MWIR	Midwave infrared
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NTSC	National Television Standards Committee
NUC	Nun-uniformaty correction
PAL	Phase Alternate Lines
PCB	Printed circuit board
RGB	Red-Green-Blue
SDI	Serial digital interface
SECAM	SÉquentiel Couleur À Mémoire
SPRITE	Signal Processing In The Element
SWIR	Short wave infrared

1. GİRİŞ

Sistem tasarım mühendisliği, talep/kullanıcı makamı tarafından belirlenen ihtiyaçlara yönelik tasarım çözümleri oluşturan, alt-üst sistemlerin teknik gereksinimlerini belirleyen, farklı sistemleri bir araya getirerek ortak çalışmalarını sağlayan, belirlenen platforma nihai sistemi entegre edip bu süreçlerin gerçekleştirilmesi için tüm planlama, yönetim ve kontrol faaliyetlerini düzenleyen bir disiplinler bütünüdür. Sistem tasarım mühendisi, sıralanan görev tanımlarını doğru bir şekilde gerçekleştirebilmek için sistem gereksinim dokümanı (SGÖ) hazırlayan, gereksinimler doğrultusunda işlerin takibini sağlayan ve nihayete erdiren kişidir.

ASELSAN bünyesinde bulunan tüm sistem birimlerinin sistem gereksinim özellikleri adı verilen dokümana sahip olması gerekmektedir. Bu doküman; tasarlanacak sistemin teknik gereksinimlerini, yeteneklerini, kapasitesini, kullanım sınırlamalarını anlatan ve tüm bunların açık, net, doğrulanabilir ve kesin ifadelerle maddeler haline dönüştürüldüğüne dokümandır. Doküman aynı zamanda, alt sistemlerin tasarımını yapacak bölümler için de referans olarak alınmaktadır. Sistem tasarımı tamamlandığında, sistem gereksinim dokümanına yazılan her maddenin belirli test aşamaları ile doğrulanması gerekmektedir. Dolayısıyla sistem gereksinim dokümanına yazılan her madde çok kritik olup, proje teknik detayını ve kabul aşamalarını etkilemektedir. Tüm bu sebepler nedeniyle dokümandaki teknik maddelerin hazırlanması oldukça uzun vakit alan ve tecrübe gerektiren bir süreçtir.

Savunma sanayii için geliştirilen ve görüntüleme ihtiyacı bulunan birçok projede askeri tip elektro-optik cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar çoğunlukla termal ve gündüz görüntüleme sağlayan, lazer ile mesafe ölçen, hedef tespiti ve takibi yapabilen bütünleşik sistemlerdir. Elektro-optik cihazların tasarımı oldukça fazla değişkene bağlı olmasına rağmen tasarımdaki en önemli faktörlerden birisi cihazların kullanılacağı platforma yönelik tasarlanmasıdır. Ayrıca birbirinden farklı platformlarda çalışması için tasarlanmış sistemlerin bazı durumlarda aynı platforma entegre şekilde çalışması ve böylesi durumlar için tasarimsal olarak iyileştirilmeler yapılması ile sistemin çalışacağı ortama uygun hale getirilmesi söz konusu olabilmektedir. Askeri sınıf gemi, bot veya zırhlı araç gibi deniz ve kara platformları, maruz kalınan çevresel şartlar, mekanik yüklemeler ve kullanıcı ihtiyaçları açısından birbirinden oldukça farklılık göstermektedirler. Örneğin deniz platformlarında

yüksek seviyelerde tuz sisine, dalga şokuna ve neme maruz kalınırken, zırhlı araçlarda yol titreşimi ve yol şoku söz konudur. Tespit veya takip edilmesi beklenen hedefler, bakış hattı menzili, görüntü alınan ortam (deniz ışıması veya kum ve toz) gibi birçok faktör cihaz tasarımını tamamen değiştirmektedir. Bu sebeple elektro-optik sistemlerin tasarımı, seçimi ve platforma entegrasyonu, cihazlardan istenilen-amaçlanan performansın alınabilmesive sistemin olabildiğince hatasız çalışabilmesi için oldukça önemli bir süreç haline gelmektedir. Elektro-optik sistemlerin platformlara entegrasyonu, sistem mühendisliği tarafından tasarlanmakta ve gerçekleştirilmektedir.

Bu cihazların amaca uygun şekilde çalışması özellikle kullanıcı için hayati önem taşımaktadır. Örneğin termal kameralar, özellikle hava karardığında kullanıcının gören gözleri olmaktadır. Dolayısıyla ihtiyaca uygun tasarımın yapılması ve sistemin tasarlanan şekilde çalışması çok önemlidir.

Eksik veya öngörülememiş teknik gereksinimler nedeniyle sistem tasarımlarında, nihai entegrasyon esnasında veya entegrasyon sonrasında birçok hata ile karşılaşıldığı belirlenmiştir. Yaşanan sorunlar hem kullanıcı hem de sistem için zaman, işçilik ve maliyet kaybına sebep olmaktadır. Bu durumların özellikle, tasarımsal öngörülme hata hata, önlenemez olduğu halde belirtilmemiş, yanlış/eksik belirlenmiş, uygulanmamış istekler nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

Sistem tasarımlarında hata oranının en aza indirilmesi, sistem güvenilirliğinin artırılması ve projelerde yapılan entegrasyonlar da bir standardın sağlanabilmesi amacıyla bir tasarım rehberine ihtiyaç duyulmuştur.

Yapılan literatür ve saha araştırmalarında, platforma entegre sistem seviyesi tasarımlar için bir yol haritası programının bulunmadığı görülmüştür. Böylesi bir rehberin olmayışı tecrübelerin aktarılamamasına, tasarımlarda hatalar yapılmasına ve aslında önlenemez olan birçok hatanın entegrasyon esnasında, sonrasında veya bakım-onarımda ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada amaç, sistem mühendisliği bakış açısı ile ortam koşulları gözetilerek, sistem gereksinimleri dokümanında gereksinimlerin eksiksiz tanımlandığı, hata oranı düşük, güvenilirliği artırılmışaskeri sistem tasarımları yapılmasını sağlayan bir tasarım rehber programı oluşturmaktır.

Hazırlanan tasarım programı ile sistem tasarımı yapan kişiye, teknik detayları atlamadan tasarım gereksinimlerini tanımlaması, ihtiyaçları ve şartları belirlemesi için yol gösteren, öğrenilmiş dersler ile yönlendiren bir arayüz sağlanması amaçlanmıştır. Programda verilen öneriler ile kullanıcıyı en az hataya götürecek tasarım parametreleri oluşturulmaktadır.

Çalışma başlangıcında askeri alandaki deniz-kara sistemlerinde kullanılan elektro-optik cihazlar için termal kamera, gündüz kamera ve lazer mesafe ölçer seçimi için gerekli alt parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametreler açıklanarak platforma göre tasarımlarda dikkat edilmesi ve uygulanması gereken yöntemler kullanıcıya öneri olarak yazılmıştır. Literatür araştırmaları ve sistemlerden öğrenilen dersler birleştirilerek platform çözümlerine etki eden onlarca parametre incelenmiş ve özellikler arasında eleme yapılarak tasarıma etki eden alt kırılımlar toplam 38 alt başlık altında incelenmiştir. Bu başlıklar ile kullanıcının, hem var olan bir elektro-optik sistem ile platform entegrasyonu için sistem gereksinimlerini oluşturabilmesi hem de yeni bir elektro-optik sistem ihtiyacı oluştuğunda göz önünde bulundurması gereken teknik parametreleri dikkate alarak gereksinimlerini oluşturması amaçlanmıştır.

Literatür araştırmaları ve projelerden elde edilen bilgilerin birleştirilmesi ile sistem tasarım ve entegrasyonunda uygulanması gereken mekanik gereksinimler ve mekanik parametreler toplam 7 alt başlık altında incelenmiştir. Deniz-kara platformları için yapılacak olan ya da yapılmış olup platforma entegre edilecek sistemler için, mekanik gereksinim maddelerinin oluşturulmasını sağlayacak teknikler bu alt başlıklar içerisinde toplanmıştır. Yapılan program kapsamında, deniz veya kara platformunda çalışacak tasarımlarda en sık kullanılan metal alaşımların, tasarımları etkileyen mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılarak kullanıcının ihtiyacına göre nerede hangi malzemeyi kullanması gerektiği önerilerle belirtilmiştir. Malzeme kaplamalarının, sökülebilir bağlantı elemanlarının, boya sistemlerinin ve askeri konektörlerin platforma, ortam koşullarına, tasarım ve montaj gereksinimlerine göre seçiminin yapılabilmesi için gerekli tüm açıklamalar oluşturulmuştur. Özellikle deniz platformları için korozyona yönelik alınması gereken tasarım ve entegrasyon önlemleri, en az hata ile entegrasyon yapılabilmesi amaçlanarak oluşturulmuştur. Ek olarak platform entegrasyonda sistem performansını etkileyen hizalama konusu literatür araştırmaları ile kullanıcıya sunulmuştur. Program kullanıcısının, açıklamalar ve verilen tasarım önerileri ile sistem tasarımı veya platform entegrasyonu için mekanik gereksinimleri oluşturabilmesi amaçlanmıştır.

Çalışma devamında askeri sistemlerin maruz kalabilecekleri çevre şartları ve bu şartlara ait test prosedürlerini belirleyen MIL-STD-810 standardı incelenmiştir. Bu standart içerisinde yaklaşık olarak 29 alt test prosedürü bulunmakta olup bu testler oldukça fazla detay içermektedir. Deniz veya kara platformlarında kullanılacak olan sistemler için maruz kalınan ortam ve koşullar hem literatürde hem de yapılmış ilgili projelerden araştırılmıştır. Bu araştırmalar, standardın uygun gördüğü yöntemler ve projelerden alınmış dersler birleştirilerek gereksinim alt kırılımları 13 alt test başlığı altında incelenmiştir. Başlıklar altında, ilgili testin ne amaçla yapıldığı, testin koşulları, uygulama yöntemlerinin neler olduğu, hangi cihazlara uygulanabildiği gibi bilgilere yer verilmiştir. Program kullanıcısının, verilen test önerileri ile kendi sistemine uygun testi seçebilmesi, uygulama yöntemlerini ayırt edebilmesi ve SGÖ dokümanına çevre koşul maddelerini örnek maddelerden uyarlayarak yazabilmesi amaçlanmıştır.

Tasarım rehber programına, sistemlere ait mekanik ve elektronik bileşenlerinin arızalanma sıklığını ifade eden ve MTBF olarak adlandırılan ortalama hata süresinin literatür araştırması yapılarak MTBF hesaplama methodları alt kırılımlar halinde eklenmiştir. Buna göre en sık kullanılan mekanik elemanlar için araştırma aralığı daraltılarak dişli bağlama elemanları, rulmanlar, şaftlar, yaylar, pim ve kamalar için MTBF hesaplama yöntemi belirlenerek formülasyon ve açıklamaları eklenmiştir. Ayrıca genel elektronik ekipmanların MTBF hesaplama yöntemleri hakkında da bilgiler verilmiştir. Askeri sistemden alınmış örnek bir durum için mekanik MTBF değeri hesaplatılmıştır. Kullanıcının, verilen hesaplama yöntemlerini ve tabloları kullanarak birim için mekanik MTBF değerini hesaplayabilmesi ve müşteriden gelen talebi kendi tasarımıyla karşılayıp karşılayamadığını öğrenebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, platform entegrasyonda önemli rol oynayan titreşim ve şok izolatörleri hakkında bilgiler verilip ön tasarım için hesaplama methodları eklenmiştir. Yine örnek bir sistem durumu için çözümleme yapılarak kullanıcıya yol gösterilmesi amaçlanmıştır.

Araştırma çalışmaları sonunda literatürde taranan tüm bilgiler, gerçek uygulamalardan alınan hatalar ve dersler birleştirilerek bir tasarım rehber programı oluşturulmuştur. İlgili program arayüzünün tasarlanabilmesi için Microsoft Excel seçilmiştir. Program, Excel macro arayüzü üzerinden kodlama yapılarak oluşturulmuştur. Tasarım rehber programı kullanıcıya rehber olma niteliğinde olan kütüphane bölümü ve kullanıcı arayüzü olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Kütüphane bölümü, literatürde taranan bilgileri ve MTBF

hesaplama yöntemlerini içeren bir el kitabı niteliği taşımaktadır. Kullanıcı arayüzü bölümü ise, kullanıcıya sorular sorup tasarımın temellerini oluşturan, sorulara verilecek cevaplar için yol gösterici bilgiler veren ve seçilen cevaplara yönelik örnek sistem gereksinim maddeleri sunan kısımdır. Bu bölüm ile kullanıcı, sorulan soruyla ilgili tasarım önerilerine ulaşabilecek, gereksinim dokümanı için yazılabilecek cümle formatlarını bulabilecek, kendi sistemi için uygun cümleleri ve tasarım girdilerini oluşturabilecektir. Bu referans ile sistem mühendislerinin hazırladığı nihai gereksinim dokümanlarına ister maddeleri olarak girdi sağlanmaktadır. Program ile tasarım ve entegrasyonlara ait temel-detay gereksinimlerin atlanmadan oluşturulması ve verilen entegrasyon önerileri sayesinde standartlaştırılmış entegrasyonların yapılması ile hedeflenen amaçlar sağlanabilecektir.



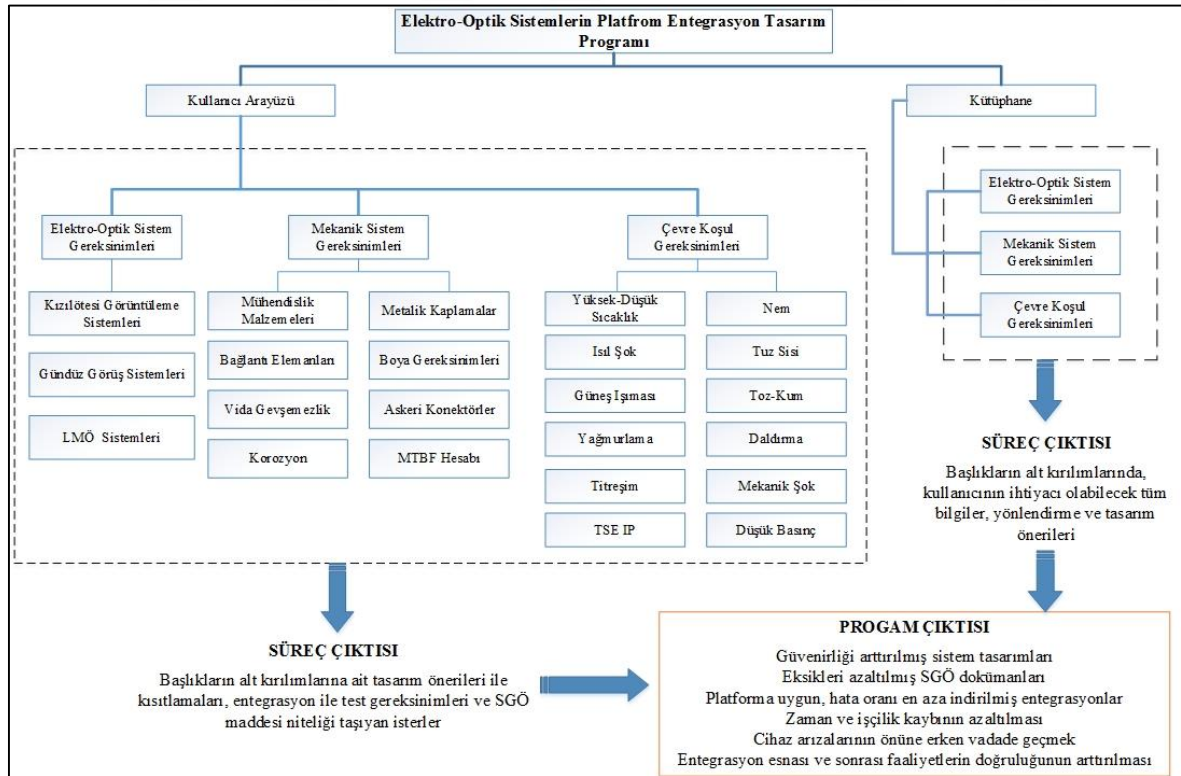


2. PROGRAM ALTYAPISI VE TARANAN TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde; tasarlanan rehber tasarım programı ve tez çalışması boyunca kullanılan bilgilerin teorik açıklamaları bulunmaktadır.

2.1. Program Kapsamı

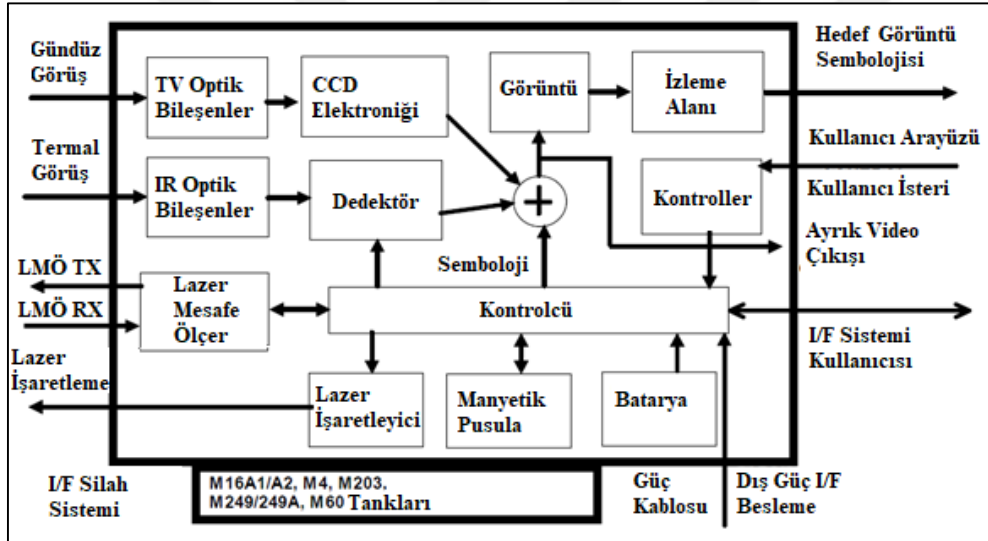
Program, kütüphane ve kullanıcı arayüzü olmak üzere iki ana başlık altında hazırlanmıştır ve tasarımların ana hattını oluşturan gereksinimlerden yola çıkılarak alt başlıklar belirlenmiştir. Programın alt yapı mimarisi Şekil 2.1’ de gösterilmiştir. Bu mimariye göre, kullanıcı arayüzü bölümü, tasarımı etkileyen bağlayıcı alt kırılımları içermektedir. Kullanıcı arayüzünde kırılımlara ait; tasarım önerilerini, kullanıcıya yöneltilen soru cümlelerini ve cevap seçeneklerini, sorulan sorunun konu içeriği hakkında pratik seçim önerilerini ve verilen cevaplara yönelik tasarım çıktıları oluşturur. Kütüphane bölümü ise, belirlenen her alt başlık için birçok kaynaktan taranan bilgileri ve uygulanmış projelerden alınan derslerin birleştirilmesine bazı hesaplama yöntemlerini içermektedir.



Şekil 2.1. Tasarım programı blok şeması

2.2. Elektro-Optik Sistemler

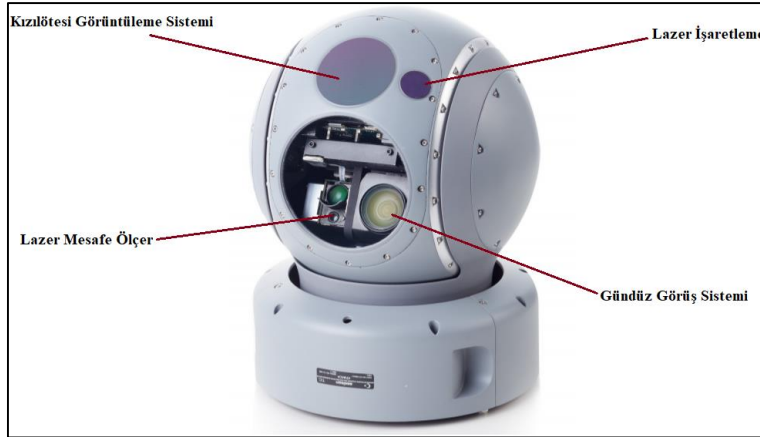
Sistemler, amacayönelik oluşturulan ve verilen görevi yerine getirmek için gerekli olan alt öğelerin birleştirilmiş halidir. Sistemler çoğu zaman birbirinden bağımsız da çalışabilen alt sistem veya birimlerden oluşmaktadır. Üst sistem seviyesi cihazlar, bağımsız çalışan alt sistemlerin bir araya getirilerek birbirleriyle entegre bir biçimde doğru, güvenilir ve hatasız çalışması sonucu oluşmaktadır. Elektro-optik sistemler, kızılötesi görüntüleme sistemlerini, gündüz görüş sistemlerini, lazer mesafe ölçeri (LMÖ) ayrıca lazer işaretleyicileri, lazer uyarı sistemlerini içeren ve bu gibi fonksiyonları yerine getirebilen sistem veya birimlerin birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Şekil 2.2’de örnek verilmiş bir elektro-optik sistem mimarisi verilmiştir.



Şekil 2.2. Örnek bir elektro-optik sistemin mimarisi [1]

Bir elektro-optik sistem çok sayıda alt bileşenden ve bu bileşenlerin kendi gereksinimleri ile bileşenlerin bağlayıcı faktörlerinden oluşmaktadır. Şekil 2.3 ile verilen örnek bir elektro-optik sistem için alt birimler kızılötesi görüntüleme sistemi, gündüz görüş sistemi, lazer mesafe ölçer sistemi ve lazer işaretleme birimidir. Bu sistemlerin bir arada çalışarak beklenen görev tanımlarını yerine getirmesi gerekmektedir. Sistem tasarımı, birbirine bağımlı birden çok gereksinimi gerektirmektedir. Çalışma senaryosuna ve sistem sınırlamalarına göre gereksinimler ayrıca detaylandırılmaktadır. Her sistem çalışma koşullarına, entegrasyon alanına ve kullanım yöntemlerine göre özelleşmektedir. Sistem alt bileşenleri çoğunlukla farklı spektral bantlarda, farklı lens açıklıklarında, farklı tasarım parametrelerinde ve farklı tasarımsal kısıtlamalarda kullanılmaktadır. Bu nedenle tüm

bileşenlerin bir arada çalışabilmesi, üst sistem başarısı olarak anılmaktadır. Çizelge 2.1 içerisinde örnek bir elektro-optik sistemin alt bileşenlerinin çalışma dalga boyları verilmiştir. Çizelgede verildiği gibi tüm alt bileşenler farklı dalga boylarında çalıştığından farklı optik elemanlara, geçirgenliklere, kaplama bilgisine veya güç ihtiyaçları gibi birbirinden farklı kısıtlama ve gereksinimlere ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 2.3. Örnek bir elektro-optik sistem alt bileşenleri [2]

Çizelge 2.1. Örnek bir EO sistem alt bileşenleri çalışma dalga boyu farklılıkları

Elektro-Optik Sistem Alt bileşeni	Dalga Boyu (μm)
LWIR	8-12
MWIR	3-5
CCD TV	0,6-1,0
Lazer Mesafe Ölçer (Göze zararsız)	1,54
Lazer İşaretleyici	1,06

Kara ve deniz platformlarının en önemli sistem bileşenlerinden olan elektro-optik sistemler, gözetleme, nişan alma, mesafe ölçme, hedef işaretleme, hedef tespit, teşhis ve tanıma gibi birden fazla fonksiyonu ile görevlerin başarıyla sonuçlanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

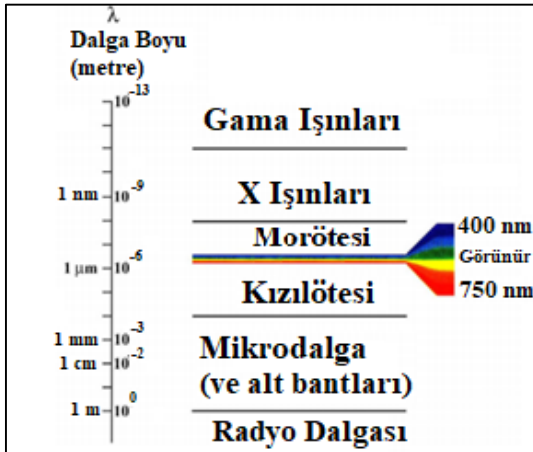
Savunma sanayiindeki askeri sistemlerde, elektro-optik görüntüleme sistemlerinin yeri oldukça önemlidir. Örneğin, termal kamera içeren bir elektro-optik sistem, özellikle gün ışığının bulunmadığı vakitlerde kullanıcıların gören gözleri sayılmaktadır. Gündüz kameraları ve entegre yazılımların geliştirilmesi ile birçok güvenlik açığı önlenmektedir. Görüntüleme sistemlerinin yanısıra mesafe bulma, hedef işaretleme gibi fonksiyonlar, birçok askeri sisteme de kaynak sağlamaktadır. Bu duruma örnek olarak; entegre bir şekilde çalışan kızılötesi görüntüleme sistemleri, gündüz görüntüleme sistemleri ve lazer sistemleri;

hedef takip algoritmalarının ve atış kontrol sistemlerinin temelini oluşturarak amaca ulaşmayı sağlamaktadır.

2.3. Elektromanyetik Spektrum ve Kızılötesi Bölge

İnsan gözünün görebildiği ışık, görünür ışık olarak adlandırılır ve kırmızı ile morrenkleri arasındaki tüm renkleri kapsamaktadır. Görünür ışık haricindeki ışığı insan gözü algılayamaz. Dolayısıyla insan gözü ile görünmeyen ışık, renklerle ifade edilememektedir. Bu nedenle ışığın tanımlanması için dalga boyu, frekans veya enerji kullanılır. Işığın var olan tüm dalga boy, frekans ve enerji aralıkları elektromanyetik spektrum olarak adlandırılmaktadır [3].

Elektromanyetik spektrum, fiziksel olarak üretilebilen en kısıdan en uzun dalga boyuna kadar elektromanyetik radyasyonun toplam dalga boyu aralığını kapsamaktadır. Bu dalga boylarının aralığı pratik olarak sıfırdan sonsuza kadar uzanır ve radyo dalgaları, kızılötesi, görünür, ultraviyole, X-ışınları ve gama ışınlarını içeren Şekil 2.4'te gösterildiği gibi geniş bir şekilde bölgelere ayrılmaktadır [4].



Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum [3]

Elektromanyetik spektrumda, Şekil 2.4'te de gösterildiği üzere 400 ile 750 nm arası aralık, görünür ışık bölgesi olarak adlandırılır. Görünür bölge, daha önce de bahsedildiği gibi insan gözünün algılayabildiği, gördüğümüz renklerden oluşan aralıktır. Spektrumda bulunan diğer dalga boyu aralıklarındaki ışımaları gözlerimiz algılayamaz. Mutlak sıfır (0K=-273,15°C) üzerinde herhangi bir sıcaklıkta olan tüm cisimler kendi kendine ışıma (radyasyon) yapar.

Oda sıcaklığı veya bu sıcaklığa yakın sıcaklıktaki cisimlerin yaptığı ısıma, elektromanyetik spektrumda 0.75 ile 1000 μm ile belirlenen “kızılötesi” olarak adlandırılan aralığa denk gelmektedir ve bu aralık kızılötesi bölge olarak adlandırılmaktadır.

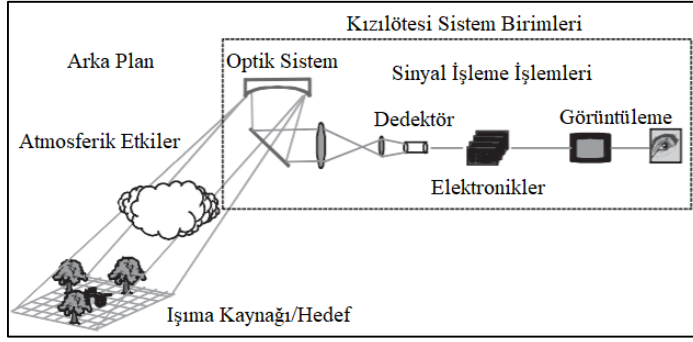
2.4. Kızılötesi Görüntüleme Sistemleri

Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesine yanıt veren görüntüleme sistemleri kızılötesi sensör olarak adlandırılır. Kızılötesi görüntüleme sistemleri genellikle gece koşullarında hedeflerin görüntülerini oluşturmak için kullanılmaktadır. Bunun sebebi, kızılötesi görüntüleme sistemlerinde hedefin görüntülenebilmesi için hedefe ulaşan ve sonrasında yansıyan ışımanın kullanılması veya hedefin kendi kendine yaptığı ışımanın kullanılmasıdır [5]. Kızılötesi bölge, çok geniş bir dalgaboyu aralığını kapsamaktadır. Ancak çoğu dalgaboyu kara veya deniz platformlarındaki görüntüleme sistemleri için kullanışlı değildir çünkü nesnelerin yaptığı ısıma atmosferde bulunan gazlar tarafından engellenir. Bu nedenle, kızılötesi görüntüleme yapılabilmesi için atmosferin geçirgen olduğu aralıktaki bir dalga boyunda algılama yapmak gerekmektedir. Çizelge 2.2’de kızılötesi spektrum bölgeleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Kızılötesi bölge tanımları

Kızılötesi Bölgeler	Dalgaboyu Aralığı (μm)
Yakın Kızılötesi (NIR)	0,8-1,1
Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)	0,9-2,5
Orta Dalga Kızılötesi (MWIR)	3,0-5,0
Uzun Dalga Kızılötesi (LWIR)	8,0-14,0
Çok Uzun Dalga Kızılötesi (VLWIR)	12-25,0
Uzak Kızılötesi (FIR)	> 25,0

Bir kızılötesi sistem Şekil 2.5’te verildiği gibi; hedef, arka plan, araya giren ortamın özellikleri, optik elemanlar, dedektör (dönüştürücü), elektronikler ve ekrandan oluşur. Elektro-optik (EO)sistemlerin ilk bileşeni, fotonları hedeften ve arka plandan toplayan optiktir. Daha sonra optik, sahneyi bir dedektör düzlemi üzerinde görüntüler. Kızılötesi dedektörler cisimlerden yayılan kızılötesi radyasyonu algılayansensörlerdir. Elektronikler; yükselticilerden, filtrelerden, sayısallaştırıcılardan ve sayısal sinyal işlemcilerinden oluşmaktadırlar. Elektroniklerin birincil amacı, dedektör sinyalini ya görüntüleme ya da görüntü işleme için hazırlamaktır [6].



Şekil 2.5. Kızılötesi sistem bileşenleri [6]

SWIR, görünür ışığa benzer şekilde, esas olarak nesnelerin kendi kendine yaptığı termal ışımadan ziyade, nesnelerden yansıyan ışığa tepki veren bir aralıktır [7]. SWIR'ın kullandığı temel ışıma kaynağı, dünya atmosferi tarafından yayılan, termal (cisimlerin kendi kendine yaydığı ışıma olarak düşünülebilir) olmayan radyasyondur. Bu ifade aynı zamanda hava parlaması olarak da bilinen ortamdaki yıldız ışığı ve arka plan parlaklığıdır.

Kullanım Karşılaştırmaları

Dedektörün spektral dalgaboyu aralığı seçiminde görüntülemek istenen nesnenin sıcaklık aralığı önemli bir rol oynar. Bunun nedeni farklı sıcaklıklardaki nesnelerin ışıma miktarının farklı oluşudur. Nesnelerin yaptığı ışmanın dalgaboyu, nesne sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Bu durum sonucunda, oda sıcaklığındaki (yaklaşık 300K) bir nesnenin yaptığı ışıma dalgaboyu maksimum 10 mikrometre seviyesinde çıkmaktadır. Örneğin, bir insanın sıcaklığı normalde yaklaşık 310 K'dır ve bu; 9,3 μm 'lik bir dalga boyunadenk gelmektedir [8]. Bu nedenle oda sıcaklığı civarındaki sıcaklığa sahip nesnelerin görüntülenmesinde LWIR bandı kullanılabilir. Öte yandan daha sıcak nesnelerin görüntülenmesinde nesnenin yaptığı ışıma dalgaboyu kısılacağından MWIR dalga boyu seçimi daha uygun olacaktır.

MWIR ve LWIR alt bantları, farklı hava koşullarında atmosferik iletim açısından büyük ölçüdefarklılık göstermektedirler. MWIR banttaki sensör performansı neme daha az duyarlıdır ve bu durumMWIR sensörlerin deniz ortamları gibi nemli/tropikal alanlarda, kıyı gözetimi, gemi trafiği gözetimi veya liman koruması gibi kullanılmasını uygun hale getirmektedir. MWIR sensörler, düşük ortam sıcaklığında çok hassas değildir, bu nedenle daha kuzey ve güney enlemlerde çok etkili değildirler [9]. Dalga boyu daha kısa olduğunda fotonlar daha fazla enerjiye sahiptir. Bu sayede 10 km veya daha fazla mesafede çok uzun

menzilli hedef tespiti için 3-5 μm dalga boyundaki MWIR, çoğu iklimde LWIR banda göre daha fazla atmosferik iletim sağlamaktadır. Bu nedenle, MWIR genellikle çok daha uzun menzilli gözetim uygulamaları için tercih edilmesi önerilen bir seçim olmaktadır.

LWIR spektral bandında, genellikle yere dayalı hedeflerin gözlemlenmesi için kullanılır. Yer hedeflerinin sıcaklığı yaklaşık 300 K civarındadır, bu da en yüksek kızılötesi çıkışa ve bu atmosferik pencerede güçlü sinyallere sahip olması anlamına gelir. Bu banttaki sensör performansı neme duyarlıdır, bu nedenle çoğunlukla daha soğuk, yüksek nemli olmayan ve daha kuru iklim koşullarında kullanılırlar [9]. Daha uzun bir dalga, bir fotonun daha büyük parçacıklarla (örneğin, toz veya sis) bir ortamda seyahat etmesini sağlar. Bu nedenle LWIR spektral bandında çalışan cihazlar, tozlu veya sisli ortamlar için daha uygun olmaktadır.

Her iki bant da sis ve yağmurdan olumsuz etkilenmektedir, ancak LWIR bandı sis koşullarında MWIR bandından daha iyi performans göstermektedir. LWIR bandı, duman veya aerosoller yoluyla görüntüleme için MWIR'den daha iyi performans göstermektedir. Bu nedenle LWIR bant kameralar genellikle yangınla mücadele uygulamaları veya askeri uygulamalar için seçilen teknolojidir.

Termal kontrast, MWIR spektral aralıkta LWIR aralığına göre iki kat fazladır. Termal kontrast fazla olduğu zaman, nesne yüzeyindeki sıcaklık değişimi daha rahat gözlemlenir. Örneğin, uçakların veya füzelerin tespit edileceği bir uygulama söz konusu ise sıcak egzoz dumanları MWIR bant kamerada LWIR banttan önemli ölçüde daha fazla görünür olacağından MWIR daha iyi bir seçenek olacaktır. Eğer kontrast, çözünürlükten daha önemli ise MWIR bant, sıcak nesneler için daha uygun olacaktır. Ayrıca MWIR, yüksek atmosferik iletim, yüksek nemde daha yüksek geçirgenlik ve daha yüksek çözünürlük ihtiyacı duyulan uygulamalarda kullanılırken; LWIR, atmosferik türbülans daha yüksek dayanım ve güneş yansımaları ile ısı fişeklerine karşı düşük hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Çizelge 2.3 içerisinde belirli hava şartlarına yönelik önerilen kızılötesi görüntüleyiciler için spektral bant aralıkları verilmiştir.

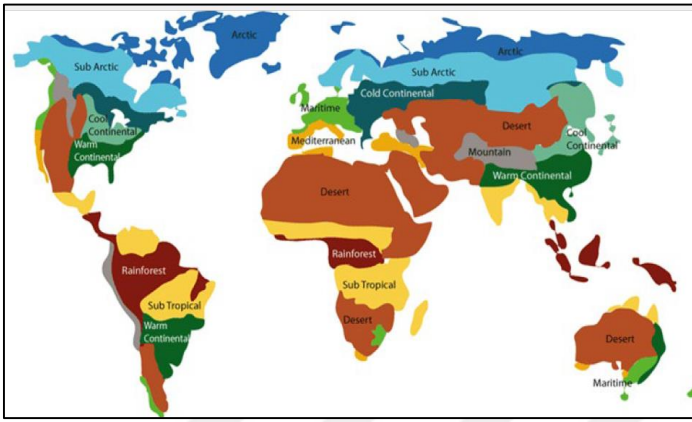
Çizelge 2.3. Spektral bant kullanım önerileri [10]

Koşul	Önerilen Spektral Aralık
Yüksek Nem	LWIR (<2,5 km), MWIR(>2,5km)
Sis	LWIR
Arktik, arktik altı	LWIR

Çizelge 2.3 (Devam) Spektral bant kullanım önerileri [10]

Normal, ortalama mevsim	MWIR
Duman, Pus, aerosoller	LWIR
Yüksek sıcaklıklı hedefler	MWIR
Çok uzun menziller	MWIR

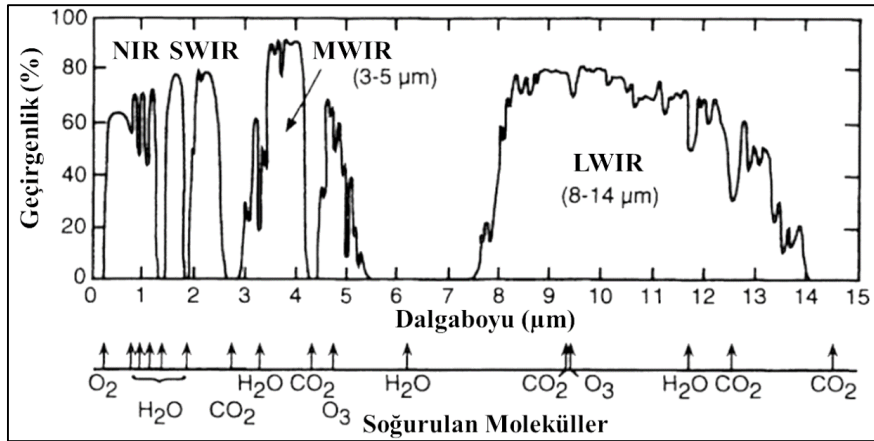
Çizelge 2.3'e ek olarak Şekil 2.6'da coğrafya sıcaklıklarının dünya üzerindeki dağılımları da verilmiştir. Bu şekle göre soğuk bölgeler için LWIR bant, sıcak bölgeler için MWIR spektral bant önerilmektedir.



Şekil 2.6. Coğrafyasal sıcaklıklar [10]

2.5. Atmosferik Geçirgenlik

Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde atmosferik iletim ve emisyon çok önemlidir. Görünür bölgede, atmosfer esas olarak emici değildir, bu nedenle iletim eksikliği neredeyse tamamen dağılmadan kaynaklanmaktadır. Kızılötesi bölgede ise, soğurmanın neredeyse tamamen var olduğu ve oldukça düşük olduğu bölgeler vardır. Atmosfer temelde azot, oksijen, karbondioksit, su buharı ve diğer gazlardan oluşur. Bu elementlerin moleküler titreşimlerinden dolayı kızılötesi spektrumun farklı kısımlarında yüksek soğurma meydana gelir. Kızılötesi bölgede atomik nitrojen ve oksijen, moleküllerini oluşturan iki atomunda aynı elementten oluşması nedeniyle aktif değildir; bu nedenle soğurma yapmazlar. Şekil 2.7 incelendiğinde 3 ana aralığın (bölgenin) var olduğu görülmektedir. Yakın kızılötesi NIR ve yakın dalga kızılötesi SWIR, su buharından büyük ölçüde etkilenmektedir. Orta dalga kızılötesi MWIR, karbondioksit ve ozon nedeniyle iki düşüşe sahiptir. Uzun dalga kızılötesi LWIR, büyük pencere kısa dalga tarafında su buharı ile uzun dalga tarafında ise su buharı ve karbondioksit kombinasyonu ile sınırlanmıştır [11].



Şekil 2.7. Atmosferik geçirgenlik [12]

2.6. Termal Kamera Alt Birimleri

2.6.1. Dedektör

Kızılötesi dedektörler genel olarak, tüm nesnelerin yaydığı termal ısı radyasyonunu tespit etmek, görüntülemek ve ölçmek için kullanılmaktadır. Dedektör, optik sinyali elektrik sinyaline dönüştüren bir optik sistemin bileşenidir. Dedektör genellikle kızılötesi sistemin kalbi olarak adlandırılır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, sistemin kendisinin dedektörün performansına bağımlı olmasıdır.

Dedektörler iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar; termal dedektörler ve foton (kuantum) dedektörleridir. Termal ve foton dedektör arasındaki ana fark, gelen ışımanın dedektör malzemesini nasıl etkilediğidir.

Termal dedektörler; en basit anlamda üzerlerine gelen kızılötesi enerjiyi ısı kaynağı olarak kullanılırlar. Dedektör malzemesi kızılötesi enerjiyi emdiğinde, malzemenin sıcaklığında meydana gelen değişimi ve değişimden dolayı oluşan etkileri ölçerek algılama yapar. Bu nedenle termal dedektör sistemlerinde elektromanyetik ışımanın hangi dalga boylarında algılanacağı, dedektör malzemesinin fiziksel yapısına ve gelen enerjiyi emme özelliğine göre değişmektedir.

Termal dedektörler tipik olarak oda (ortam) sıcaklığında çalışır ve kriyojenik soğutma gerektirmez. Karmaşık soğutma mekanizmasının olmayışı termal dedektörleri, hafif,

hacimsel olarak küçük, düşük güç tüketimine sahip ve tüm bunların neticisinde düşük maliyetli dedektörler haline getirmektedir. Bu sebepler nedeniyle termal dedektörler, sivil uygulamalarda, endüstriyel uygulamalarda, gece görüş ve sürücü görüş sistemleri gibi askeri uygulamalar için uygun olmaktadır. Oda sıcaklığında çalışması gibi çok önemli bir avantajı olsa da bu dedektör grubunun en büyük dezavantajı, enerjiye verilen tepki süresinin uzun olması ve algılama duyarlılığın az olmasıdır.

Foton dedektörleri ise, fotona duyarlı piksellere sahip algılayıcılardır. Bu tip dedektörlerde asıl amaç dedektör üzerine düşen fotonların elektronlara çevrilmesi veya serbest yük taşıyıcılarının oluşmasını sağlamaktır. Serbest yük taşıyıcısı durumundaki değişiklik, malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirir. Artan serbest yük taşıyıcılarının yoğunluğu, dedektörün iletkenliğinde (ve direncinde) değişime sebep olur. Foton dedektörleri, elektron-foton etkileşiminin doğasına bağlı olarak birkaç alt gruba ayrılabilir. Elektrik veya manyetik alanların nasıl geliştirildiğine bağlı olarak, fotoiletken, fotovoltaiik, fotoelektromanyetik ve fotoemissif olanlar gibi çeşitli modları vardır [13].

Foton dedektörleri yüksek hassasiyete, çok yüksek sinyal-gürültü oranlarına ve hızlı tepki sürelerine sahiptir. Bu nedenle yüksek performans istenen sensörler için idealdirler. Ancak, hızlı tepki süresi ve yüksek duyarlılığa rağmen foton dedektörlerinde yüksek termal gürültü vardır bu nedenle foton dedektörleri, düşük termal gürültülü çalışma için kriyojenik sıcaklıklara yani 77 K (-196 °C) veya daha da düşük sıcaklıklara soğutulmalıdır. Yüksek performanslı foton dedektörleri kriyonejik soğutma ihtiyacı nedeniyle pahalı olabilmektedir. Soğutma mekanizması, güç tüketiminin fazla ve kızılötesi görüntüleme sisteminin boyutlarının daha büyük olmasına neden olmaktadır. Şekil 2.8’de soğutmalı bir dedektör yapısına örnek verilmiştir.



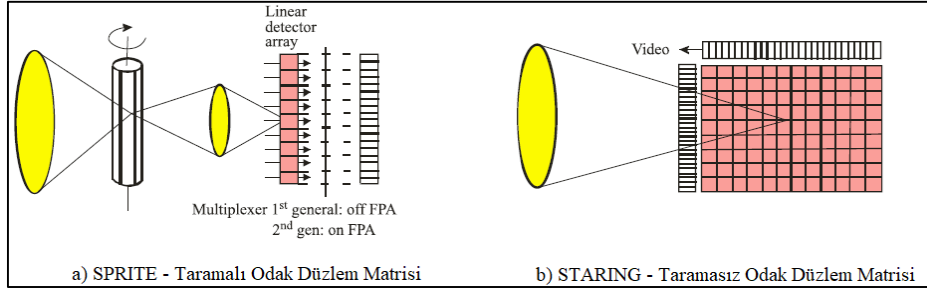
Şekil 2.8. Soğutmalı dedektör görseli [14]

Soğutmalı sistemler oldukça hassastır ve en küçük sıcaklık değişimlerini (<20 mK) tespit edebilir. Tipik olarak orta dalga kızılötesi ($3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$) dalga boylarında (MWIR) çalışırlar, ancak spektrumun uzun dalga kızılötesi (LWIR) bandında görüntüleme sağlamak için tasarlanabilirler [15].

Soğutmalı (foton) kızılötesi dedektörler de kendi içerisinde görüntünün odak düzlem matrisi üzerinde oluşturulmasına göre genel olarak taramalı ve taramasız olarak iki ana gruba ayrılabilirler. Odak düzlemi dizisi (FPA) terimi, bir görüntüleme sisteminin odak düzleminde bulunan piksellerin bir birleşimini ifade eder. Taramalı soğutmalı dedektörler “SPRITE (Signal Processing In The Element)” olarak, taramasız soğutmalı dedektörler “STARING (Hareketsiz-taramasız)” olarak adlandırılır. Şekil 2.9 taramalı ve taramasız dedektör yapılarını göstermektedir.

Tarama sistemlerindeki kural olarak, mekanik bir tarayıcı kullanılarak şerit boyunca sahne taranarak görüntü oluşturulmaktadır. Şekil 2.9 (a) taramalı bir diziyi göstermektedir. Bir sistemde dedektör, lineer bir dizi eleman içerdiğinde tarama sadece bir yönde gerçekleştirilir (60×1 , 120×1 , 288×4 , 480×6 , 576×7 piksel gibi). Bu tür dedektör yapıları birinci nesil sistemler olarak da anılmaktadır. Taramalı dedektör dizileri, hacimli mekanik tarama sistemleri gerektirir ve genellikle geniş formatlı, tek tip 2-D dedektör dizileri üretmenin kolay olmadığı durumlarda kullanılır [16].

Taramasız dedektör yapıları, 2 boyutlu bir piksel dizisinden oluşur ve bu diziler dizilerle entegre edilmiş devreler tarafından elektronik olarak taranır. Dolayısıyla bu tür dedektör yapıları mekanik tarama gerektirmez. Şekil 2.9 (b) taramasız bir diziyi göstermektedir. Taramasız dizilerin odak düzleminde birinci nesil sistemlere göre en az üç kat daha fazla öğeye (> 106) sahiptir [13]. Taramasız dizilerin boyutları taramalı dizilere göre çok daha büyük olduğundan üretilmesinde büyük alanlı tabanlar kullanılması gerekmektedir. Yüksek kalitede, hatasız büyük alanlı taban üretimi oldukça zordur. Yeterince büyük taban alanı olsa dahi FPA malzemesini bu tabanlara yeterli homojenlikte büyötmek günümüzde dahi çok zor olmaktadır. Taramasız dedektörlerde görüntü çözünürlüğü FPA formatına eşittir. Örneğin 640×512 .



Şekil 2.9. a) Taramalı FPA b) Taramasız FPA [13]

Taramasız dizinlerde kullanılan mercek büyüklüğü taramalılara göre daha küçük olduğundan sistemler daha küçük yapılabilmektedir. Ayrıca taramasız dizinlerde mekanik bir tarama sistemi olmadığından taramalı sistemlere göre daha hafif olabilmektedirler.

Buna ek olarak, taramalı dizinlerde sahne, algılayıcı dizin üzerinde ardışık olarak oluşturulduğundan bütün kolonlar üzerindeki görüntü aynı anda elde edilememektedir. Bu nedenle çok hızlı değişen sahneler sahip uygulamalarda görüntüde bulanıklık meydana gelebilmektedir. Hızlı manevralar gerektiren füze arayıcı başlık uygulamaları gibi sahnenin aniden değiştiği koşullarda taramasız dizinler tercih edilmelidir. Diğer bir yandan kara araçlarında, nişancının veya komutanın termal görüş sistemi gibi çok hızlı hareket eden cisimlerin takip edilmediği, tüm sahnenin aniden değişmediği durumlarda taramalı dizinler yeterlidir.

2.6.2. Kızılötesi bölge optik malzeme çeşitleri

Optik malzemeler, kızılötesi sistemlerin en kritik bileşenlerinden biridir. Bu sebepten, optik malzemelerin seçimi, birçok konunun dikkate alınmasını gerektirir. Sistemlerin çalışma dalga boyu, optik malzeme seçimindeki ilk sayılabilecek belirleyici faktördür. Kızılötesi bölgeye ait spektral aralıklarda, kabul edilebilir iletimler elde etmek için özel malzemeler gerekmektedir. Spektrumun kızılötesi bölgesinde çok sayıda optik malzeme vardır. Fakat fiziksel özellikler, işlenebilirlik ve maliyet göz önünde bulundurulduğunda malzeme listesi oldukça sınırlıdır [17]. Kızılötesi ışık, görünür ışıktan daha uzun dalga boylarından oluştuğundan, aynı optik ortamda ilerlerken iki bölge birbirinden farklı davranmaktadır. Bazı malzemeler hem kızılötesi hem de görünür uygulamalar için kullanılabilir ancak, bir optik sistemin performansı, tasarlanan sistem için seçilmiş uygun malzemeler kullanılarak optimize edilebilmektedir. Kızılötesi bölgenin 3-5 μm ve 8-12 μm pencerelerindeki optik

sistem tasarımlarında kullanılan en popüler dört malzeme germanyum, silikon, çinko sülfür ve çinko selenittir.

Germanyum (Ge), IR enerjisini 3–5 μm veya 8–12 μm spektral bantlarda iletmek için tasarlanmış pencere ve camlar için popüler bir malzemedir. Görünür bölge ışımalarını geçirmemektedir. Kaplanmamış bir germanyum penceresi, tüm yansımalar dâhil olmak üzere yalnızca %47 geçirgenliğe sahiptir. Bu nedenle, germanyum geniş bant yansıtmasız kaplamalar ile birlikte kullanılmaktadır. Yansıtmasız kaplamalar ile tek bir elemanın iletimini 3-12 μm aralığında yaklaşık %93'e; 3–5 μm veya 8–12 μm spektral bantlar için tasarlanmış kaplamalar ile eleman iletimini yaklaşık %98'e çıkarmaktadır. Germanyum, camdan çok metale benzeyen mekanik özelliklere ve görünümüne sahiptir. 5.32 g/cm^3 yoğunluğa sahip germanyum, camın yaklaşık iki katı ağırlığındadır [18]. Bu özelliklerin yanı sıra germanyum, çinko selenit veya çinko sülfürden daha ucuzdur [17]. Bu nedenle maliyetin etken olduğu tasarımlarda sıklıkla tercih edilmektedir.

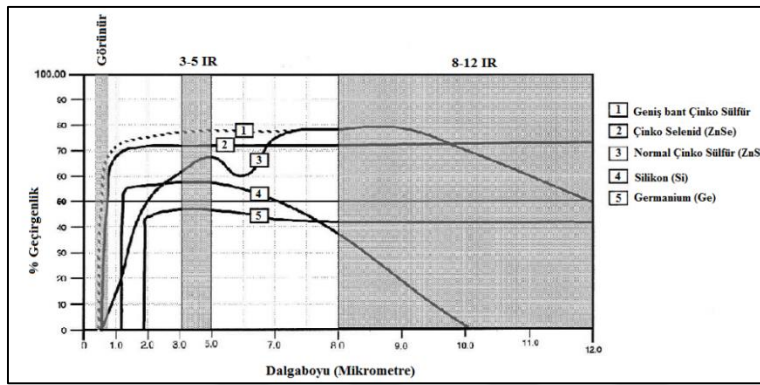
Silikon (Si), 3–5 μm spektral bantta kızılötesi bölge enerjisini iletmek üzere tasarlanmış optik sistemler için kullanılan popüler bir malzemedir. Kaplanmamış bir silikon pencere, tüm dâhili kayıplar dâhil olmak üzere yaklaşık %54 geçirgenliğe sahiptir. Yaygın kızılötesi malzemelerin en düşük yoğunluklarından birine sahip olduğundan, ağırlık kısıtlamaları olan sistemler için ideal olmaktadır. Silikon, germanyumdan daha serttir ancak daha kırılkan değildir. Tüm kızılötesi malzemelerin en düşük malzeme maliyeti seçeneği sayılabilmektedir [18].

Çinko sülfür, kızılötesi enerjisini 3–5 μm veya 8–12 μm spektral bantlarda iletmek üzere tasarlanmış optik sistemler için popüler bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Kaplanmamış bir hava-çinko sülfür penceresi, tüm dâhili kayıplar dâhil olmak üzere yaklaşık %75 geçirgenliğe sahiptir. Çinko sülfür, optik cama benzer mekanik özelliklere ve görünümüne sahiptir. 4.1 g/cm^3 yoğunluğa sahip çinko sülfür, ortalama camın neredeyse iki katı ağırlığındadır. Çinko Sülfür yüksek sertlik ve dayanıma sahiptir. Yüksek hızlı hava araçlarında ve vakum uygulamalarında kızılötesi pencereler için kullanılabilir [18].

Çinko selenid (ZnSe), kızılötesi enerjisini 3–5 μm veya 8–12 μm spektral bantlarda geçirmek için tasarlanmış optik sistemler için bir başka popüler malzemedir. Kaplanmamış bir çinko selenid penceresi, tüm dâhili kayıplar dâhil olmak üzere yaklaşık %71 geçirgenliğe sahiptir.

Çinko selenid, optik cama benzer mekanik özelliklere ve görünümüne sahiptir. $5,27 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip çinko selenid, ortalama optik camın neredeyse iki katı ağırlığındadır [18]. Çinko Selenid nispeten yumuşak bir malzemedir ve oldukça kolay çizilmektedir.

Şekil 2.10 Germanyum, silikon, çinko sülfür ve çinko selenid için geçirgenlik eğrilerini vermektedir. Bu malzemeler haricinde tercih edilen diğer kızılötesi bölge optik elemanları; AMTIR-1, baryum florür (BaF_2), potasyum klorür (KCl), talyum boromiyodid (KRS5), galyum arsenit (GaAs)’dır.



Şekil 2.10. En çok kullanılan kızılötesi bölge optik malzemeleri geçirgenlik eğrileri [18]

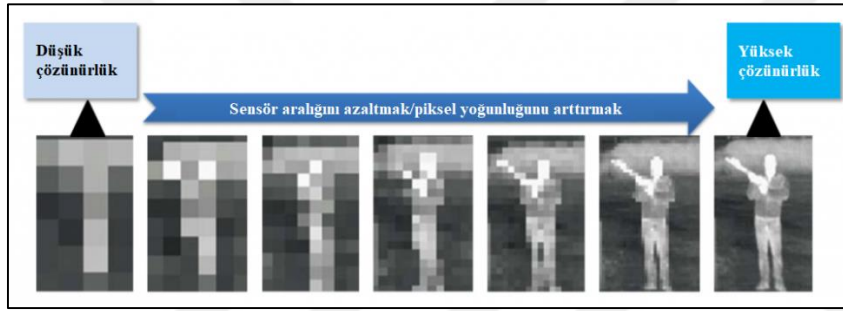
2.7. Kızılötesi Görüntüleme Sistemine Etki Eden Temel Parametreler

Kızılötesi görüntüleme sistemlerindeki bileşenler daha önce belirtildiği gibi optik sistem, dedektör, elektronikler, görüntüleme birimleri yani ekran veya ekranlardan oluşmaktadır. Genel olarak elektronik elemanlar ve ekranlar, sistem tasarımı iyi yapılmış ise alınan görüntü üzerinde olumsuz bir etki yaratmamaktadır. Dolayısıyla görüntü kalitesine etki eden temel parametreler optik sisteme ve dedektöre ait özelliklerdir. Hedeften alınan görüntünün kalitesi, görüntüleme sistemindeki optik elemanların kusurlarına ve dedektör performansına doğrudan bağlıdır. Optik elemanlardaki kusurlar, kaplama çeşitleri ve seçimleri dedektöre iletilen enerji miktarını değiştirdiğinden görüntü kalitesini değiştirmektedir. Dedektör performansı ise oluşturulan görüntü çözünürlüğünü belirleyen bir parametredir.

2.7.1. Çözünürlük

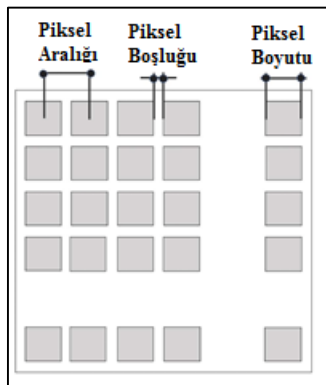
Çözünürlük, bir görüntüleme sisteminin nesne ayrıntılarını yeniden oluşturma yeteneğidir. Kızılötesi görüntüleme sisteminin kırınım veya optik hatalarının olmadığı mükemmel bir

dünyada olduğu varsayıldığında, çözünürlük yalnızca görüntülenen nesnenin boyutuna ve bir pikselin boyutuna bağlı olacaktır. Bu nedenle piksel boyutu, ayrıntı düzeyinden sorumlu olan boyuttur. Pikseller genellikle mikrometre veya mikron cinsinden ölçülmektedir. Dolayısıyla dedektörün çözünürlüğü, görüntüleme sisteminin yüksek kaliteli bir görüntü oluşturma yeteneğini belirlemedeki ilk unsurdur. Bir dedektör ne kadar çok dedektör elemanına (piksel) sahipse, o kadar fazla enerji toplayacak ve görüntüde o kadar fazla ayrıntı görülebilecektir. Bunun sonucu olarak görüntüleme sisteminin çözünürlüğü de o kadar yüksek olacaktır. Daha yüksek çözünürlüklü kızılötesi görüntüleme sistemleri, daha küçük nesneleri uzaktan algılayabilmektedir. Şekil 2.11’de piksel sayısının artışı ile görüntü çözünürlüğünün iyileşmesi görülmektedir.



Şekil 2.11. Çözünürlük [19]

Piksel aralığı bir pikselin merkezinden bitişik pikselin merkezine olan mesafedir. Daha küçük bir piksel aralığı, daha yüksek piksel yoğunluğu ve dolayısıyla daha yüksek çözünürlüğü gösterir. Piksel boşluğu iki bitişik piksel arasındaki mesafeyi, piksel boyutu ise bir pikselin fiziksel boyutu ifade eder. Şekil 2.12’de ifadelerin görsel gösterimi verilmiştir. Günümüzde genel kullanılan piksel boyutları 50 μm ’den 17 μm ’ye kadar bulunmaktadır.



Şekil 2.12. Piksel tanımları [20]

Görüntüleyici çözünürlük formatı dedektör dizisindeki piksel sayısı olarak ifade edilmektedir. Bir kameranın görüntüleyici formatını belirlemek için tipik olarak standart iki boyutlu matris kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan kızılötesi görüntüleme sistemlerinde genellikle 640×480 çözünürlüklü dedektör bulunmaktadır. Bu ifade dedektörün 307.200 piksel barındırdığını ifade eder. Bu değer 320×240 dedektörlü bir termal görüntüleme cihazındaki 76.800 piksel sayısı ile karşılaştırıldığında çözünürlük farkı daha net anlaşılabilecektir. Standart görüntüleyici çözünürlük formatları genellikle 160×120 (19.600 piksel), 384×288 (110.592 piksel), 640×480 (307.200 piksel), 1024×768 (786.432 piksel)'dir [19].

2.7.2. Kare hızı (frame rate)

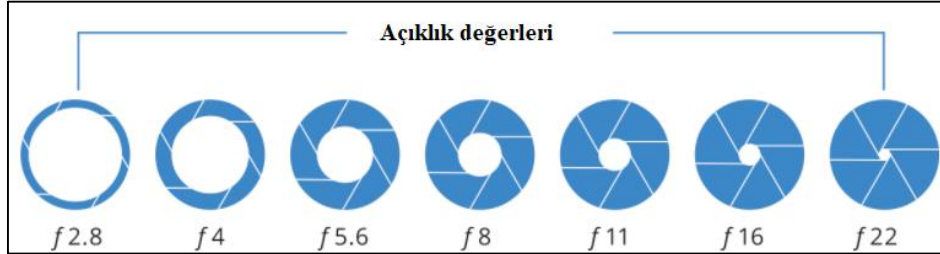
Kare hızı, bir görüntüleme sisteminin ekranda görüntülenmek üzere çıktı bilgilerini güncelleme hızıdır. 9 Hz kamera bu güncellemeyi saniyede 9 kez yaparken 60 Hz kamera saniyede 60 kez yapmaktadır. Daha yüksek kare hızı, daha hızlı görüntü güncelleme anlamına gelmektedir. Daha hızlı kare hızları, özellikle hedeflerin daha yüksek hızlarda hareket edebildiği uygulamalarda örneğin araçlar veya insansız hava araçları gibi sistemlerde önemlidir. Daha yüksek yenileme hızları, daha doğru algılama anlamına da gelmektedir [19].

2.7.3. f Sayısı

“f” sayısı bir optik sisteme girebilecek ışık miktarını belirten bir değerdir ve f # şeklinde gösterilir. “f” sayısı (veya f #), görüntüleyicinin odak uzaklığının ön lensin çapına oranıdır. Eş. (2.1) ile gösterilmektedir. Odak uzaklığı, optik ve odak noktası arasındaki mesafedir. Aynı odak uzaklığı için, f # ne kadar düşükse, optikler o kadar büyük olur ve dedektöre daha fazla ışık/enerji ulaşır. Bu durum, daha ayrıntılı görüntü oluşması anlamına gelir. Ayrıca düşük f sayısı daha parlak görüntü verir. Ancak bu durumda merceğin boyutu büyüdüğünden cihaz büyür ve hem maliyet hem de ağırlık artar.

$$f = \frac{\text{Odak Uzaklığı}}{\text{Lens Çapı}} \quad (2.1)$$

Yüksek $f\#$, sistemde daha küçük çaplı mercekle kullanıldığı anlamına gelir. Şekil 2.13, çap ile f sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Küçük çaplı lens kullanımı cihazı daha kompakt hale getirmektedir.



Şekil 2.13. f sayısı ve lens açıklığı [21]

2.7.4. NETD

Bir termal dedektörün hassasiyeti, “Gürültü Eşdeğer Sıcaklık Farkı (NETD)” ile tanımlanmaktadır. NETD birimi mK'dır. Termal çözünürlük olarak da bilinen NETD değeri, bir nesne ile çevresi arasındaki tespit edilebilen minimum sıcaklık farkıdır. Örneğin, 30 mK NETD'ye sahip bir kamera, çevresinden 30 mK daha sıcak veya daha soğuk olan bir nesneyi algılayabilmektedir. NETD değeri ne kadar düşükse o kadar iyidir ve çok daha uzaktaki nesneler görüntüleme sistemi ile görülebilir demektir. Tipik olarak, soğutulmamış bolometrik dedektörler 30-200 mK NETD'ye sahiptir. Soğutulmuş foton algılayıcı IR dedektörleri 10 mK NETD değerine kadar yaklaşabilmektedir [22,23]. Bir termal görüntüleme kamerası için NETD değerini belirtirken dikkate alınması gereken önemli bir parametre, f sayısıdır. Görüntüleme sistemleri için farklı dedektörlerin NETD değerleri genellikle aynı f sayısına sahip bir lens kullanılırsa karşılaştırma yapılabilmektedir.

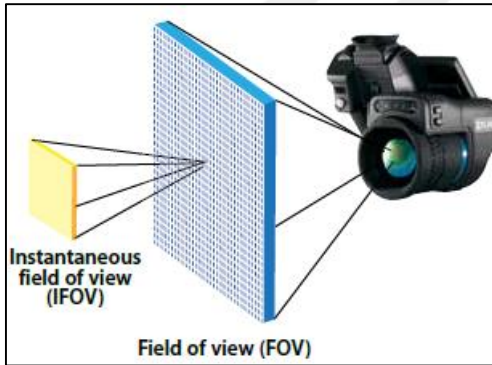
2.7.5. Görüş alanı (field of view (FOV))

Bir optik sistemin görüntüleyebileceği alanın derece cinsinden ifadesi görüş alanı (yani FOV) olarak adlandırılır. Kızılötesi görüntüleme sisteminin belirli bir mesafede görebileceği en büyük alandır. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde genellikle üç aşamalı yakınlaştırma/büyütme kullanılır. Bunlar; geniş, orta ve dar olmak üzere sınıflandırılır. Eğer iki aşamalı büyütme var ise bunlar geniş ve dar olacak şekildedir. Geniş görüş alanı veya başka bir tabirle düşük büyütme modu, geniş bir sahne alanını gözlemlemek ve olası ilgilenilen hedefleri aramak için kullanılır. Orta görüş alanında büyütme oranına göre

ayarlanmış derece büyütme için kullanılır. Dar görüş alanı veya yüksek büyütme modu, hedefin yakından veya yüksek oranda büyütülmüş görüntüsünü görmek ve genellikle nihai hedef tanıma ve tanımlama için kullanılır. Bu görüş alanları, kullanıcı gereksinimi için üç farklı çalışma modu sağlayarak sistemin etkinliğini artırmaktadırlar.

2.7.6. IFOV

Termal görüntüleme sistemlerinde genellikle ürünlerin uzamsal çözünürlüğünü tanımlamak için anlık görüş alanı (IFOV) olarak adlandırılan tanımlama kullanılmaktadır. IFOV, kameranın dedektör dizisinin tek bir dedektör elemanının görüş alanı olarak tanımlanmaktadır. Bunun anlamı, FOV içindeki belirli bir mesafede tespit edilebilen veya görülebilen en küçük ayrıntıdır. Teorik olarak IFOV, hesaplanabilir bir değerdir ve bir termal görüntüleme sisteminin piksel boyutunun odak uzaklığına oranı olarak belirlenmektedir. IFOV genellikle miliradyan olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.14. IFOV görünüşü [24]

2.7.7. MRTD

Minimum çözömlenebilir sıcaklık farkı (MRTD), bir termal kameranın yeteneklerini ve performansını belirlemek için kullanılan bir başka metriktir. MRTD, ABD Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilen bir testtir ve şu anda bir kızılötesi görüntüleme sisteminin performansını ölçmek için en yaygın kullanılan parametredir. Kameranın, bir kamera operatörünün görebileceği minimum termal hassasiyet seviyesini ayırt etme yeteneğini belirlemektedir [19]. MRTD ölçümleri kamera, monitör (hedef çubukları) ve insan gözünün hassasiyetiyle derece (°C) cinsinden yapılan ölçümdürve MRTD ne kadar düşükse o kadar iyidir. Günümüzde klasik MRTD, termal görüntüleyicilerin en önemli parametresi olarak

kabul edilmektedir ve MRTD tipik olarak gerçek hedeflerin menzil tahminleri için kullanılmaktadır [25].

MRTD genellikle termal sistemlerde sistem seviyesi bir testtir. Görüntüleyici operatörün, gözlemlenen nesnenin düşük kontrastlı ayrıntılarını algılama yeteneğini tanımlayan öznel bir parametredir. Genel olarak MRTD, standart 4 çubuklu hedefin çubukları arasındaki minimum sıcaklık farkını ve farklı boyutlardaki (uzamsal frekans) 4 çubuklu hedefler için bir gözlemci tarafından çubukların termal görüntüsünü çözmek için gereken arka plan ile hedef çubukların arasındaki minimum sıcaklık farkını belirleyerek ölçülür [25]. MRTD, NATO STANAG 4349'da tanımlanmıştır. Ölçümlerin insan gözlemciler tarafından yapılması sebebiyle literatürde açıklanan birden fazla ölçüm methodu bulunmaktadır ancak en yaygın kullanılan method STANAG 4349'dur. Temel olarak, tek tip bir arka plan üzerinde standart bir periyodik dört çubuklu model (Şekil 2.15'de gösterilmiştir), test edilen kamera kullanılarak bir gözlemciye sunulur. Gözlemci, dört çubuğun çözülebileceği en düşük kontrastı ayarlar. Prosedür farklı boyutlardaki (uzamsal frekans) 4 çubuklu hedefler için tekrarlanır [25,26].

STANAG 4349'a göre, Şekil 2.15 ile verilmiş olan görünmez bir desenden başlayarak, termal kontrast artırılır. Gözlemcinin test modelinin dört çubuğunu ("Evet"olarak bildirilen) çözebildiğini bildirdiği termal kontrast DT^+ kaydedilir. Ardından, kontrast azaltılır, bu da desenin kaybolmasına ve negatif kontrastta yeniden görünmesine neden olur. Yine, gözlemcinin test modelinin (DT^-) dört çubuğunu çözebildiğini bildirdiği kontrast kaydedilir. MRTD değeri, bildirilen pozitif ve negatif kontrastın ortalamasıdır ($= [DT^+ + DT^-] / 2$). Ölçümlerin, her gözlemci için en az üç kez tekrarlanması önerilmektedir. Prensip olarak, tek bir gözlemci yeterlidir, ancak daha fazlası önerilmektedir [25].



Şekil 2.15. MRTD ölçümleri için kullanılan standard periyodik dört çubuk hedefi [26]

2.7.8. Hedef tespit/teşhis/tanıma

Askeri uygulamalarda kızılötesi görüntüleme sistemlerinin karşılaştırılması ve seçilmesi için ana kriter, nominal aralıkta gösterdikleri performanslarıdır. Nominal aralık performansı, tanımlanmış bir görev ve standartlaştırılmış hedef ve çevre koşulları için hesaplanmaktadır. Bugüne kadar mevcut olan tek standardizasyon STANAG 4347'dir [27]. STANAG 4347, NATO Savaş Komitesi tarafından 1995 yılında hazırlanmış olan ve termal görüntüleme sistemleri için nominal statik menzil performansının nasıl tanımlanacağını belirleyen en önemli standarttır.

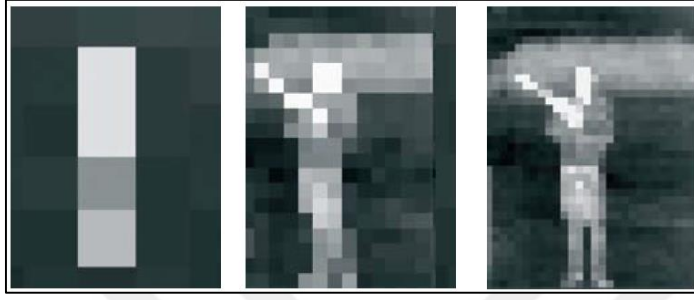
Kızılötesi görüntüleme sistemleri kullanımlarındaki asıl amaç, görüntülenen alan içerisinde hedef olarak belirlenen nesne hakkında bilgi edinmektir. Kullanılan görüntüleme sisteminin performansı bu amacı ne kadar iyi yaptığı ile doğrudan bağlantılıdır. Menzil performansı STANAG 4347 kapsamında üç kategori altında ele alınmaktadır. Bunlar sırasıyla “tespit” (detection), teşhis (recognition) ve “tanıma” (identification) olarak adlandırılmaktadır.

Tespit (Detection); bir hedefin varlığının farkedilmesi anlamına gelir. Ancak bu bir özellikten biraz daha fazla anlam içermektedir. Spesifik olarak, hedefin en az iki piksel üzerinde görülebildiği ve hedefin aslında şüphe uyandıran bir şey olma ihtimalinin yüksek olduğu anlamına gelir. Örneğin, tespit özelliği ile hedefin ne tip bir araç olduğunu ayırtmaz. Şekil 2.16 (a) hedef tespiti ifade etmektedir ve orada bir şey olduğunu anlatmaktadır.

Teşhis (Recognition); hedef tipinin ayırtılabilmesidir örneğin hedefin bir tank olduğunun anlaşılmasıdır. Teşhis, basitçe bir nesnenin sınıfının tanınabildiği anlamına gelir. Araçlar ve silah platformları için, nesne bir sınıf içinde kategoriye göre ayırt edilebilir (örneğin, paletli veya tekerlekli hava savunmaları veya personel taşıyıcı; topçu veya tanklar veya yardımcı araçlar gibi). Şekil 2.16 (b) hedef teşhisi ifade etmektedir ve orada olan varlığın insan olduğunun algılanmasını anlatmaktadır.

Tanıma (Identification); bir nesnenin tanımlanması, nesneler arasında ayırım yapabilmesi anlamına gelmektedir. Askeri araçlar ve silah sistemleri için, nesne modele göre ayırt edilebilir (örneğin, Leopard 2A4 tankı). Ticari araçlar için nesne, model tiplerine göre ayırt edilebilir (örneğin, dört kapılı ticari araç veya iki kapılı kamyonet, dört kapılı bir sedan veya

iki kapılı bir coupe). İnsanlar için, insanın silahlı veya potansiyel olarak savaşçı olarak belirlendiği ölçüde ayırt edilebilen giysi, ekipman, elde tutulan nesneler, duruş ve/veya cinsiyet gibi bireysel unsurların algısı yapılabilir. Şekil 2.16 Şekil 2.16 (c) hedef tanımayı ifade etmektedir ve orada olan varlığın insan olduğunun ve elinde tehlikeli bir varlık tuttuğunun algılanmasını anlatmaktadır.



(a) (b) (c)

Şekil 2.16. (a) hedef tespit, (b) hedef teşhis, (c) hedef tanıma [28]

STANAG 4347'ye göre hava şartları

STANAG 4347'ye göre ilgili spektral aralıklar içerisindeki birim km'de atmosferik kızılötesi iletim Eş. (2.2)'de verildiği üzere Beer Kanununa göre hesaplanmaktadır;

$$T = e^{-\epsilon R} \quad (2.2)$$

Eşitlikte verilen T: Toplam iletilen enerji oranı (%), ϵ : Atmosferik zayıflatma katsayısı, R: Mesafe (km)'dir. STANAG 4347'de Atmosferik zayıflatma katsayısı (ϵ); İyi hava koşullarında "0,2"; kötü hava koşullarında "1" olarak belirlenmiştir [29]. Dolayısıyla 1 km mesafede toplam iletilen enerji oranı hava şartlarına göre belirlenebilmektedir. İyi hava koşullarına göre toplam iletilen enerji yaklaşık olarak %82; kötü hava koşullarında yaklaşık %37 hesaplanmaktadır. Şekil 2.17 (a), MWIR spektral bantta çalışan bir kızılötesi görüntüleme sisteminin görüş mesafesinin yaklaşık 1 km olduğu, %94 nem ve 16°C sıcaklık değerinde izlenen görüntüyü göstermektedir. Şekil 2.17 (b) görseli ise aynı görüntüleme sisteminin, görüş mesafesinin yaklaşık 10 km olduğu, %64 nem seviyesinde ve 18 °C sıcaklık değerinde izlenen görüntüyü göstermektedir. Şekil 2.18 (a), LWIR spektral bantta çalışan bir kızılötesi görüntüleme sisteminin görüş mesafesinin yaklaşık 1 km olduğu, %94 nem ve 16°C sıcaklık değerinde izlenen görüntüyü göstermektedir. Şekil 2.18 (b) görseli ise

aynı görüntüleme sisteminin, görüş mesafesinin yaklaşık 15 km olduğu, %44,5 nem seviyesinde ve 11,5°C sıcaklık değerinde izlenen görüntüyü göstermektedir.



(a)

(b)

Şekil 2.17. MWIR kamera görüş mesafesi, nem ve sıcaklık farkları [30]



(a)

(b)

Şekil 2.18. LWIR kamera görüş mesafesi, nem ve sıcaklık farkları [30]

Bir hedefin ne kadar uzak mesafeden tespit, teşhis ve tanımlanabildiğine yönelik tahminler, beyin/göz resim yorumlama işlemini modelleyebilen bir matematiksel denkleme ihtiyaç duymaktadır. Johnson kriterleri metodolojisi günümüzün standart olarak kullanılan belli başlı modelidir. Johnson, varsayılan çözünürlükle nesne algılama olasılığını ölçmeyi amaçlamıştır. İnsanların gözlemleriyle görsel veri algısı üzerine yapılan deneysel araştırmanın sonuçlarını takiben Johnson, ilgili bir görsel algı seviyesi (tespit, teşhis ve tanıma) sağlayan bir hedef kritik boyut üzerindeki periyodik çizgi çiftlerinin sayısını belirlemiştir [31]. Bu model, bar deseni yaklaşımı olarak da bilinmekte ve laboratuvar ortamında ayrıştırılabilen barların saha ortamındaki performansı yansıttığı görüşünden doğmaktadır. Model dâhilinde, minumum hedef boyutu başına düşen çizgi çifti miktarı artırılarak her bir çizgilerin ayrıştırılabildiği değerler bulunmaktadır. Tespit, teşhis ve tanıma

mesafesi gibi insan algısına dayalı ölçütler verilirken kesin sonuçlar yerine istatistiksel olarak bilgi verilmesi gerekmektedir. Analiz programları veya kolimatör testleri kullanılarak elde edilen MRTD eğrileri (veya menzil kriterleri) gözlemci topluluğu içerisinde elde edilen ortalama eşik değerleridir. Örneğin eşik tespit, tanım olarak %50 olasılık ile ifade edildi ise bunun anlamı gözlemcilerin %50'si görebiliyorken diğer %50'sinin hedefi göremediğidir. %90 olasılıkla teşhis basit olarak gözlemcilerin %90'nın hedefi teşhis edebildiğidir.

STANAG 4347'ye göre, kızılötesi görüntüleme sistemlerinin nominal statik menzil performansı, ortalama MRTDdikkate alınarak ve aşağıdaki sıralanan koşullar altında tanımlanmaktadır [29]:

- Hedef boyutu: 2.3m x 2.3m;
- Hedef ile arka plan arasındaki sıcaklık farkı ΔT : 2K

Buna göre standarda göre %50 olasılığa göre çözünürlük kriteri aşağıda sıralanan çizgi çiftlerinin ayrıştırılabilmesi olarak tanımlanır:

- Tespit (detection): 1 çizgi-çifti,
- Teşhis (recognition): 3 çizgi-çifti
- Tanıma (identification): 6 çizgi-çifti

2.7.9. Optiklerde kaplama

Optik sistemlerin toplam iletimi, büyük ölçüde yüzeylerin sayısına ve bunların kaplamalarına bağlıdır [32]. Optik malzemeler çalışılan dalga boylarında geçirgen olsa bile, ilgili dalga boyunda %50' den fazlasını geçiremeyebilmektedir. Işığın belirli bir optik bileşenle nasıl etkileşime girdiğini etkileyen bir veya birden fazla ince malzeme katmanı optik kaplama olarak adlandırılır. Optik kaplamalar genellikle, bir optik bileşenin geçirgenlik, yansıma veya polarizasyon özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır.

Optik bileşenler en yaygın kullanılan kaplama türleri yansıma önleyici (AR) kaplamalar, yüksek yansıtıcı (ayna) kaplamalar, ışın ayırıcı kaplamalar ve filtre kaplamalarıdır. Kızılötesi bölgede çalışan malzemeler genellikle yüksek kırma indisine sahiptir ve bu malzemeler, hava-malzeme arayüzündeki büyük kırılma indisi farkından

dolayı oldukça yansıtıcı hale gelmektedir. Bu nedenle kızılötesi görüntüleme sistemlerinde yansıma önleyici kaplamaları kullanmak kaçınılmaz hale gelmiştir.

2.8. Normalizasyon (NUC)

Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde sıcaklığın etkisi veya piksel imalat kusurları nedeniyle, dedektör odak düzlem matrisindeki (FPA'daki) pikseller birbirleriyle aynı yanıt verememektedir. Bu durum, görüntüleme sisteminde homojen olmayan, sabit model gürültüsüne (FPN) neden olmaktadır. Piksel yanıt hassasiyetinin homojen olmaması sistemden alınan görüntüyü bulanıklaştırmakta ve kamera sisteminin, arka planı ön plandan ayıramamasına sebep olmaktadır. Örneğin, daha uzun pozlamalı görüntülemelerde belirli pikseller daha parlak yoğunluklar verebilmektedir. Bu nedenle, kızılötesi görüntüleme sistemlerinde net görüntülerin elde edilmesi için belirli yöntemlerle homojenlik dışı düzeltme yani normalizasyon yapmak gerekir. Bir kameranın tekdüzelik olmayan düzeltme özelliği (NUC), bu düzeltmeyi yaparak piksel homojenliğinin ayarlanmasını sağlamaktadır. Normalizasyonun asıl amacı, tüm pikseller aynı referans sıcaklığa baktığında aynı çıkış değerini vermesi için gerekli düzeltmeleri (kazanç ve ofset) uygulamaktır. NUC gerektiren gürültüler, sistemde rastgele veya rastgele olmayacak şekilde oluşabilir. Eğer rastgele oluşuyorsa bu durum kamera çalışma koşullarından ve tahmin edilmesi imkânsız olan ölçüm ortamının rastgele varyasyonlarından kaynaklanmaktadır. Eğer sistemde oluşan gürültü rastgele değilse, okuma elektroniklerindeki varyasyonlar gibi rastgele olmayan bir kaynak tarafından oluşturulmuş bir gürültü söz konusudur ve bu gürültü daha sonrasında şeritleme gibi doğal olmayan görüntü bozuklukları oluşturabilmektedir. Temel olarak, FPN'yi azaltmak için önerilen yöntemler, kalibrasyon tabanlı düzeltme ve sahne tabanlı düzeltme olarak ikiye ayrılabilir. Kalibrasyona dayalı olan teknik, normalizasyon yapabilmek için kullanılan en basit, en doğru ve en yaygın NUC yöntemidir. Kalibrasyona dayalı yöntemler kendi arasında tek nokta düzeltme (SPC veya one point nuc), iki nokta düzeltme (TPC veya two point nuc), çoklu nokta düzeltme (parçalı doğrusal düzeltme olarak da bilinir) ve geliştirilmiş iki nokta düzeltme algoritması olarak ayrılmaktadır. Kalibrasyona dayalı yöntemler, FPN'yi tahmin etmek için bir kara cisim radyasyon kaynağı veya tek tip sıcaklıklı bir deklanşör (shutter) gibi bir tür mutlak sıcaklık referansı kullanır. Deklanşör, dedektörün kendisini kalibre etmesi ve termal olarak stabilize etmesi için düz bir referans kaynağı görevi görür. Kazanç ve ofset gibi parametreler, FPA'yı bir veya daha fazla sıcaklıkta tek tip bir IR radyasyon kaynağına maruz bırakarak tahmin edilir [33]. Bu tekniklerin ana dezavantajı,

FPN'deki kayma nedeniyle, FPA'nın kamera çalışması boyunca dakika sırasına göre yeniden kalibre edilmesi gerekliliğidir. Dolayısıyla bu dönemlerde kamera "kördür" [34]. Kalibrasyona dayalı normalizasyon yapılan bir sistemde, çevre değiştiğinde veya çevredeki stabilite sorunları ortaya çıktığında NUC'un tekrarlanması gerekmektedir.

Kalibrasyona dayalı düzeltme tekniğiyle karşılaştırıldığında, sahne tabanlı NUC tekniği, kalibrasyon için bir kara cisim radyasyon kaynağı gerektirmez. Sahne tabanlı normalizasyon, piksel başına sahne sıcaklığı katsayılarını hesaplamak için gerçek sahne ile ilgili özelliklerdeki veya hareketteki değişikliği kullanarak farklı görüntü işleme algoritmaları kullanır. FPN'den etkilenen sahneden gerçek görüntü, bu sahne tabanlı katsayılar telafi edilerek oluşturulur [34].

2.9. Atermalizasyon

Kızılötesi görüntüleme sistemlerinin sıcaklığı arttığında veya azaldığında sistemde bulunan optik elemanların tüm boyutları değişmektedir. Sıcaklığın değişmesiyle birlikte optik elemanlara ait değişen bir diğer özellik de malzemelerin kırma indisleridir. Örneğin, kızılötesi bölgede optik malzeme olarak sıklıkla kullanılan germanyumun kırılma indisi, sıcaklığın etkisiyle çok büyük bir değişim katsayısına sahiptir. Boyutlarda ve kırma indisindeki değişim kızılötesi görüntüleme sisteminin odak uzaklığında bozulmaya sebep olmaktadır. Sıcaklıkla odak kayması, kızılötesi bölgede önemli bir sorundur. Bu durum, sistemde büyük miktarda bulanıklığa yol açabilmektedir [35].

Kızılötesi görüntüleme sistemlerini sabit bir sıcaklıkta veya toleranssız sınırlar dâhilinde tutmak mümkün değilse, odadaki değişikliği sıcaklıkla telafi eden bazı yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu yöntemler, atermalizasyon olarak bilinir ve atermalizasyon tekniğinin seçimi genellikle doğrudan kızılötesi sistemin kullanılacağı uygulama tipi tarafından kontrol edilmektedir [35]. Atermalizasyon teknikleri genel olarak üç ana gruba ayrılmaktadır, bunlar: mekanik pasif atermalizasyon, mekanik aktif (elektromekanik) atermalizasyon ve optik pasif atermalizasyondur.

Mekanik pasif atermalizasyon, termal bulanıklığı telafi etmek için mekanik bileşenlerin doğal genleşmesi veya daralması yoluyla eksenel lensi veya lens grubunu pasif olarak değiştirmek amacıyla kullanılır [8].

Mekanik aktif atermalizasyon, elektromekanik atermalizasyon olarak da bilinmektedir. Bu yöntem, lenslerin veya lens gruplarının konumunu manuel veya elektromekanik olarak değiştirmek için kullanılır. Bu nedenle sıcaklık sensörleri ve motorlara ihtiyaç vardır [8]. Sistem, en az bir veya daha fazla sıcaklık sensörü, bir elektrik motoru, bir referans tablosu ve bir servo devresi içermektedir. Yöntemin çalışma prensibi, ayrı sıcaklık sensörlerinden gelen bilgilerin kullanarak, geri besleme mekanizmaları ve servolar aracılığıyla atermalizasyon elemanını doğru konumuna yönlendiren motorların harekete geçirilmesine dayanmaktadır [35].

Optik pasif atermalizasyon, optik malzemelerin termal özelliklerindeki farklılıkları kullanarak bir merceğin termal odak kaymasını önemli ölçüde azaltma işlemidir. Bu yöntemde, uygun şekilde seçilmiş termal odak kaymasını birlikte telafi edebilen optik malzemeleri birleştirerek sistemdeki termal odak kayması ortadan kaldırılır. Bu nedenle hareketli parça gereksinimi yoktur. Komple bir sistemin optik pasif atermalizasyonu için, örneğin bir görüntü veya yeniden görüntüye sahip bir afokal sistem için, çok sayıda lense ihtiyaç vardır [35]. Optik pasif atermalizasyon, hareketli parça gerektirmediğinden güvenilirliği artırarak daha kompakt ve daha hafif tasarımların yapılmasını sağlamaktadır. Ancak atermalizasyonu bu yöntem ile yapan sistemlerin, yöntem çalışma prensibi nedeniyle pahalı kızılötesi malzemelerden çok sayıda eleman içermesi gerekmektedir. Ayrıca çok sayıda lens kullanıldığından camların ve yuvaların seçimine de çok dikkat edilmesi gerekmektedir [8].

2.10. Optik Yakınlaştırma ve Elektronik Yakınlaştırma

Optik yakınlaştırma sistemin odak uzunluğunu değiştirerek çözünürlüğü artırır. Sürekli yakınlaştırmalı optik sistemler pahalı olma eğiliminde olduğundan, birçok sistem iki veya daha fazla ayırık görüş alanına sahiptir. Bunlar; çok dar, dar, orta ve geniş bakış açılarını temsil eden VNFOV, NFOV, MFOV ve WFOV olarak adlandırılmaktadır. Sistem odak uzaklığı, optik öğeler eklenerek veya kaldırılarak değiştirilir [36].

Elektronik yakınlaştırma ise, monitöre yaklaştırmaya veya daha büyük bir monitör kullanmaya eşdeğerdir. Ek bir ayrıntı gösterilmez, yalnızca piksel çoğaltmadır. Sistemin göz sınırlı olması durumunda bir miktar performans artışı sağlar. Ancak aşırı elektronik yakınlaştırma

kullanılırsa, görüntü bloklı görünecektir [23]. Elektronik yakınlaştırmının genellikle 2x, 3x, 4x gibi ayırık olduğu bir süreçtir.

2.11. Beyaz Sıcak – Siyah Sıcak Görüntü

Kolaylık sağlamak için görüntülenen hedefler sıcak veya soğuk olarak etiketlenir. Sıcak, yakın arka planından daha sıcak görünen bir hedefi ifade eder ve soğuk, hedefin yakın arka planından daha soğuk görüldüğü anlamına gelir. Beyaz görünen sıcak nesneler ve siyah görünen soğuk nesneler isteğe bağlıdır. “Siyah sıcak” ile sıcak nesneler, nötr bir arka planda koyu gri görünür. Nesne ısındıkça, monitördeki temsili de kararır. Bunun tersi “beyaz-sıcak” için geçerlidir. “Beyaz-sıcak” ile görünen sıcaklığı arka plana göre arttıkça hedef “daha beyaz” hale gelir.

2.12. Kontrast

Kontrast, belirli bir çözünürlükte siyahın beyazdan ne kadar iyi ayırt edilebileceğidir. Bir görüntünün iyi tanımlanmış görünmesi için, siyah ayrıntıların siyah görünmesi ve beyaz ayrıntıların beyaz görünmesi gerekmektedir. Siyah beyaz bilgi ara grilere ne kadar çok eğilim gösterirse, o frekansta kontrast o kadar düşük olmaktadır. Açık ve koyu çizgi arasındaki yoğunluk farkı ne kadar büyükse, kontrast o kadar iyidir. Bu özellik açık görünse dahi, hedef tespiti için kritik derecede önemlidir.

2.13. Görüş Mesafesi ve Hava Koşulları

Görüş mesafesi, hava koşullarına göre bir nesnenin çıplak gözle görülebileceği en uzak mesafe olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, hava şeffaflığının da bir ölçütüdür. Hava, atmosferin özelliklerini değiştirdiğinden, atmosferik bölgelerde değişmekte ve bu nedenle farklı kızılötesi dalga boyları ve ışıma miktarları zayıflamaktadır. Termal görüntüleme sistemleri, görünür dalga boylarının 5 ila 20 katı olan dalga boylarında çalıştığından, termal görüntü pusun (küçük aerosol partikülleri) ürettiği saçılmalardan daha az etkilenmektedir [37]. Buna rağmen özellikle açık alanlarda çalışan kızılötesi görüntüleme sistemleri, atmosferin alt bölgelerinde bulunan çeşitli safsızlıklar nedeniyle yüksek düzeyde aerosol zayıflaması yaşamaktadırlar. Atmosferik zayıflama, sistemin performans seviyesini ciddi şekilde düşürebilmekte ve bu durum hedef takip gibi görevlerin başarısızlığına yol

açabilmektedir. Dolayısıyla toz, duman, sis veya yağmur gibi asılı parçacıkların olmadığı iyi havada bile, atmosferik iletim, büyük ölçüde kızılötesi dalga boyuna, yayılma yoluna, irtifaya, mevsimsel koşullara bağlı olan karmaşık bir işlevdir [38].

Tüm bu ve bahsi geçmeyen diğer önemli sebepler nedeniyle kızılötesi görüntüleme sistemlerinde atmosferik zayıflama faktörünün hesaba katılması gerekmektedir. Örnek verilecek olursa; nemli hava, kızılötesi ışıma için bir "kalkan" görevi görmektedir. Genellikle yaz ayı günlerindeki atmosferler, artan nem seviyeleri nedeniyle kış aylarına göre daha yüksek bir zayıflamaya sahiptir. Bu nedenle, açık bir gökyüzü ve iyi hava koşulları varsayılarak, kışın termal kamera ile yazı göre daha uzak mesafeler görülebilmektedir. Ancak nemli hava dışında kızılötesi görüntüleme sistemlerinin menzili için çok daha zararlı olan başka iklim koşulları da bulunmaktadır. Aerosollerin konsantrasyonu veya parçacık boyutu arttıkça, görüş mesafesi azalmaktadır. Sis ve yağmur, ışığın su damlacıklarından saçılması nedeniyle bir kızılötesi görüntüleme sisteminin menzilini ciddi şekilde sınırlamaktadır. Damlacıkların yoğunluğu ne kadar yüksekse, kızılötesi sinyal o kadar azalmaktadır [38]. Şekil 2.19'da sis varken kullanılan bir termal kamera görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.19. Sisli termal kamera görüntüsüne etkisi [40]

"İyi hava" koşulları optik modellemelerde standart 23 km yer görüş mesafesine sahip bir atmosferik koşula karşılık gelmektedir. "Puslu" sayılan hava koşullarında ise görüş mesafesi 10 km'ye düşmektedir. Çizelge 2.4 uluslararası görüş mesafesi kodlarını göstermektedir. Atmosferik koşullar hem görünürlük aralığıyla hem de açık, puslu, çok açık vb. Gibi atmosferik koşulların genel bir açıklamasıyla tanımlanır.

Çizelge 2.4. Uluslararası görüş mesafesi kodları [37]

Hava Şartı	Görüş Mesafesi
Yoğun Sis	0-50 m
Yoğun (kalın) Sis	50-200 m
Orta Yoğunlukta Sis	200 – 500m
Hafif Sis	500-1 km
Hafif (İnce) Sis	1-2 km
Pus	2-4 km
Hafif Pus	4-10 km
Açık/İyi	10-20 km
Çok İyi	20-50 km
Son derece iyi	>50 km

2.14. Gündüz Görüş Sistemleri

Görünür ışık, dalga boyu 400 ila 700 nm arasında değişen, insan gözü tarafından tespit edilebilen elektromanyetik spektrum bölgesidir. Bu bölge kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi ve mor dalgaların birleşimidir. Her bir renk, belirli bir dalga boyuyla temsil edilir. Nesne görüntüleri bu ana renkler kırmızı, yeşil ve mavi (RGB sistemi) ile renkli görüldüğünden, görünür ışık görüntülemeye RGB (kırmızı, yeşil ve mavi) renkli görüntüleme de denilmektedir.

Görünür bölgede çalışan bir görüş sistemi, görünür ışığı toplayan ve bunu bir elektrik sinyaline dönüştüren, ardından analog veya dijital formatlarda çıkış görüntüsü üreten bir tür görüntüleyicidir. Görünür bölge kameraları, insan gözünün algıladığı aynı spektrum olan 400-700nm arasındaki ışık dalga boylarını kullanmaktadırlar. Görünür bölge kameraları, doğru renk temsili için ışığı kırmızı, yeşil ve mavi dalga boylarında (RGB) yakalayarak insan görüşünü kopyalayan görüntüler oluşturmak üzere tasarlanmıştır. Gündüz kameraları kullanımında video formatı olarak genellikle dijital kameralar önerilmektedir. Görünür ışık görüntülemede kullanılan iki ana dijital kamera türü renkli CCD ve renkli CMOS'tur.

TV kameraları, görünür bir menzile ve yaklaşık 1 μm 'ye kadar yakın kızılötesi radyasyona duyarlıdır çünkü güneş, ay ve yıldızlardan yapılan ışıma yoğunlukla görünür ve yakın kızılötesi spektral bantlarda yayılmaktadır [37].

2.14.1. Görünür ışık optik malzeme çeşitleri

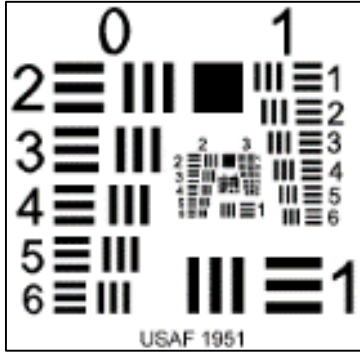
Elektromanyetik spektrumun görünür dalga boyu bölgesi, insan gözünün görüşü ile tanımlanan, nispeten dar bir banttır. Görünür bölgede çalışan optikler üretmek için kullanılabilecek birçok cam türü vardır. Bu camlar kırılma indisine, dağılma ve geçirgenlik özelliklerine göre tanımlanır. Bu spektral aralıkta, camların çoğu hala çok şeffaftır, bu nedenle özel malzemeler kullanmaya gerek yoktur.

Askeri görüntüleme sistemlerinin kayda değer bir bölümünde göze zararsız lazer mesafe ölçer birimi ile gündüz kamerası aynı açıklıktan baktırılarak kullanılmaktadır. Bu durumda görünür bant için optik malzeme seçimi yapılırken kullanılacak olan malzemenin spektral bant geçirgenliğinin lazer çalışma aralığını da desteklemesi gerekmektedir. Örneğin böyle bir entegre sistem bütününde gündüz bant için 400-700 nm arası bant için geçirgenlik sağlayan bir camın, lazer mesafe ölçer için de kullanılabilmesi için 1540 nm dalga boyu aralığındaki dalga boyunu da geçirmesi gerekmektedir. Bütünleşik açıklıklar için en sık kullanılan cam türü N-BK7'dir. Geçirgenliği 380 nm ile 2100 nm arasındadır. Bu sayede hem görünür bölge hemde yakın kızılötesi bölgede çalışılmasına olanak sağlamaktadır. N-BK 7, en yaygın kullanılan borosilikat kireçli camlardan bir tanesidir. Yüksek homojenliği, düşük kabarcık içeriği ve basit üretilirliği, onu geçirgen optikler arasında iyi bir seçim haline getirmektedir. Kırılma indisi 1,517 ve yoğunluğu 2,46'dır. Nispeten serttir ve iyi çizilme direnci göstermektedir [39].

2.14.2. Gündüz kameraları optik hedef tespit/teşhis/tanıma

Gündüz kameraları için menzil doğrulaması "USAF" hedeflerine bakılarak yapılmaktadır. USAF açılımı United States Air Force'dir. USAF hedeflerine bakarak doğrulama MIL-STD-150A'a göre yapılmaktadır. Bu standarda göre testte kullanılan ekipmanlar, kolimatör, optik masa, beyaz ışık ve çözümlenecek hedef olarak tanımlanmaktadır.

USAF hedefleri büyükten küçüğe sıralanan farklı boyutlardaki yatay ve dikey olarak çizgilerden oluşmaktadır. Hedefler standarda göre boyları enlerinin 5 katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Hedef modeli Şekil 2.20'de gösterilmektedir.



Şekil 2.20. USAF hedef çizgileri [41]

İlgili kameranın performansını test edebilmek için hesaplamalar sonucu seçilen hedef çizgilerinin kamera ile bakıldığında çözebildiğinin doğrulanması gerekmektedir. Çizelge 2.5’de çözünürlük değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.5. USAF 1951 Hedefi çözünürlük değerleri [41]

Grup	Element					
	1	2	3	4	5	6
-2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4
-1	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9
0	1.0	1.1	1.3	1.4	1.6	1.8
1	2.0	2.2	2.5	2.8	3.2	3.6
2	4.0	4.5	5.0	5.7	6.3	7.1
3	8.0	9.0	10.1	11.3	12.7	14.3
4	16.0	18.0	20.2	22.6	25.4	28.5

Hesaplama Metodu Eş. (2.3 ile verildiği gibidir ve bu formül kullanılarak yapılmaktadır.

$$\frac{\text{Hedef Boyutu}}{\text{Menzil Bilgisi}} = x * \frac{\text{Tespit Kriteri}}{\text{Kolimatör Odak Uzaklığı}} \quad (2.3)$$

Burada “x” değeri bir çizgi çifti arasındaki mesafedir. Çizelge 2.5’in kullanılabilmesi için x değeri x^{-1} olarak kullanılmaktadır.

2.15. Lazer Sistemleri

Askeri uygulamalarda lazerlerin tüm taktik savaş alanı uygulamalarının en yaygın olanları, gözetim ve yangın kontrol uygulamaları için lazer mesafe bulucular, mühimmat rehberliği için lazer hedef belirleyicileri (designatör) ve özellikle gece operasyonları sırasında hedef nişan almak ve işaret etmek için yaygın bir kullanım bulunan lazer işaretleyiciler (pointer)

olmuştur. Bir lazerin dalga boyu ifade edilirken kullanılan en yaygın birim nanometredir (nm). Lazer tarafından üretilen enerji elektromanyetik spektrumun noniyonize ve ultra mor (100- 400nm), görünür (400-700nm) ve kızılötesi (700nm-1mm) arasında değişmektedir [42].

2.15.1. Lazer mesafe ölçer sistemleri (LMÖ)

Askeri uygulamalarda, amaçlanan hedefe olan mesafeyi belirlemek için bir lazer mesafe ölçer sistemleri kullanılmaktadır. Hem bağımsız bir cihaz olarak hem de elektro-optik sistemlerin bir parçası olarak kullanılabilir. Lazer mesafe ölçerler, kısa bir lazer darbesinin iletilmesine ve bir hedeften geri yansımış sinyallerin alınmasına dayanır. Lazer darbesinin iletimi ve alımı arasındaki zaman (veya uçuş süresi “d”) ölçülür ve mesafe d, c'nin ışık hızı olduğu $d = c \Delta t / 2$ ilişkisine göre hesaplanır [43]. Lazer mesafe bulucular, Nd: YAG, Nd: Glass, Er: Glass ve yarı iletken diyot lazerleri dâhil olmak üzere farklı lazer türleri etrafında yapılandırılmıştır. Belirli LRF seçimi, sistem amacına, mesafe ölçümleri görev dağılımına ve hedef aralığı ölçüm güvenilirliği ve doğruluk gereksinimlerine bağlıdır.

Kara platformlarında bağımsız modda veya entegre bir atış kontrol sisteminin bir parçası olarak kullanılan lazer mesafe bulucular, genellikle dakikada 5-30 darbe (PPM) aralığında lazer darbeleri üreten düşük tekrarlama oranlı sistemlerdir ve Q anahtarlı Nd: YAG veya Nd: glass lazerlerin etrafında geliştirilmiştir. Bunlar, ± 5 m'den daha iyi doğrulukla 25 km'lik bir hedef menzile kadar uzanma kapasitesine sahip olabilmektedir [44].

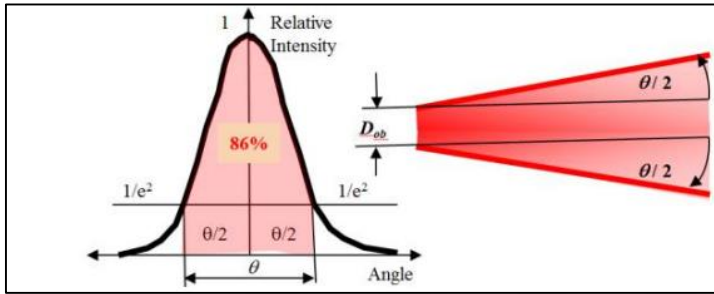
2.15.2. Lazer mesafe ölçüm bilgisi

Hava koşullarının ve hedef yansıma özelliklerinin ölçüm aralığı üzerindeki önemli etkisi nedeniyle, LMÖ tabanlı mesafe ölçüm aralığını doğru olarak tanımlamak zordur. Ölçüm aralığının birkaç tanımı vardır:

- (1) LMÖ sayma elektroniki tarafından belirlenen toplam ölçüm aralığı (genellikle 0,1 ile 20 km arası).
- (2) Belirtilen yansıtıcılık ve meteorolojik görünürlüğe sahip önceden tanımlanmış geniş hedef için tipik ölçüm aralığı.
- (3) Belirtilen hedef (alan ve yansıtma) ve meteorolojik görüş için ölçüm aralığı.

Kullanıcı, LRF üreticisinin belirlediği aralığı ve ölçüm koşulu hakkındaki bilgisini kullanarak, uygulaması için hangi ölçüm aralığının sorumlu olduğunu tahmin edebilmektedir.

Lazer ışını, lazer ışını kesiti boyunca tekdüze yoğunluk dağılımına sahip değildir. Şekil 2.21 ile gösterildiği gibi genellikle sapma/ıraksama açısı “ θ ” olarak adlandırılan açı ile içeriye yayılır. Lazer ışını çapı ve sapması, maksimum olası mesafe ölçüm aralığını belirleyen Lazer mesafe ölçüm işlemi enerji dengesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tipik lazer sapma değerleri 0,2 mRad ila birkaç mrad aralığındadır [45].



Şekil 2.21. Lazer sapma parametreleri [45]

2.15.3. Lazer sistemlerinde dalga boyu bilgileri

En yaygın kullanılan lazer dalga boyu 1.06 μm (Nd: YAG) ve 1.54 μm (Er: Glass)' dir. LRF'nin kentsel ortamda uygulama amaçlı çoklu sensör izleme sistemi için kullanılması düşünüldüğünde, göze zarar vermeyen lazer dalga boyunun seçilmesi önemlidir. 1,4 μm 'nin üzerindeki dalga boyları göz için güvenli kabul edilir, ancak göz güvenliği, ilgili standartta tanımlanan lazer güvenliği değerlendirmesine göre değerlendirilmelidir [45].

2.15.4. Tehlike sınıfı

Lazer yoğun, son derece yönlü bir ışık demeti üretir. Bir nesneye yönlendirilirse, yansıtılırsa veya odaklanırsa, lazer ışığı kısmen emilir, yüzeyin sıcaklığını ve/veya nesnenin içini yükseltir ve potansiyel olarak malzemenin değişmesine veya deformasyonuna neden olur. İnsan vücudu bazı lazerlerin çıkışına karşı savunmasız kalmaktadır ve belirli koşullar altında maruz kalma göz ve cilde zarar verebilmektedir [42]. Lazer güvenlik standartları, ANSI Z136.1 belgelerine göre sağlanmaktadır. Kolaylık sağlamak için lazerler, potansiyel

tehlikelerini gösteren bazı sınıflara ayrılmıştır. Tehlike sınıfları Çizelge 2.6 ile açıklanmaktadır.

Çizelge 2.6. Lazer tehlike sınıflandırması [46]

Lazer Sınıfı	Açıklaması
Sınıf 1	Düşük güçtedir ve tehlikesiz sınıf olarak kabul edilmektedir. Çalışma sırasında zararlı radyasyon seviyeleri üretmeyeceği düşünülür ve her türlü kontrol önleminde veya diğer gözetim biçimlerinden muaf tutulmaktadır.
Sınıf 2	Düşük güçtedir ve tebirlere göz koruması sağlanabilmektedir. Yalnızca anlık pozlamaya izin verilmektedir. Spektrumun görünür kısmında (0.4 ila 0.7 μm) yayılmaktadır ve göz koruması, kaçınma tepkisi ile sağlanır.
Sınıf 3	Orta güçtedir ve doğrudan görüş tehlikesi oluşturmaktadır. Doğrudan ve aynasal yansıma izleme koşulları altında tehlikeli olabilir, ancak normal olarak dağınık bir yansıma veya yangın tehlikesi oluşturmaz.
Sınıf 4	Yüksek güçtedir. Doğrudan alınan ışında göz veya cilt için tehlikelidir ve dağınık yansıma veya yangın tehlikesi oluşturabilmektedir. Ayrıca lazer kaynaklı hava kirleticileri (LGAC) ve tehlikeli plazma radyasyonu üretebilmektedir.

1.54 μm ' ye merkezlenen dar bir dalga boyu bandında, göze zarar vermeyen bant olarak adlandırılan doğrudan görüntüleme için izin verilen maksimum maruz kalma 1 J/cm²'dir. Bu miktar 1.06 μm 'den 2×10^6 kat daha büyüktür [44]. Ayrıca, lazer darbe enerjisi ne kadar düşükse, lazer güvenliği gereksinimlerini karşılamak o kadar kolay olmaktadır. Tipik lazer darbe enerjileri birkaç mJ'den birkaç onlarca mJ'ye kadar ulaşmaktadır.

2.15.5. Hassasiyet

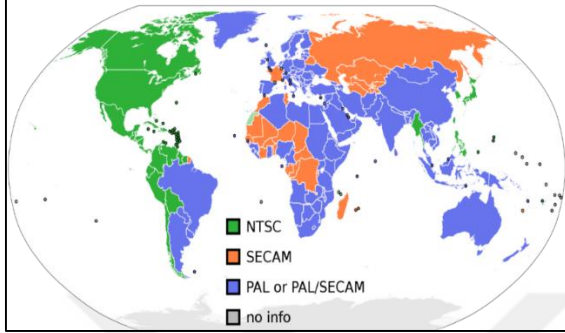
Günümüzde lazer mesafe ölçerler genellikle ± 5 m, mesafe ölçüm doğruluğu sağlamaktadır. Bazı cihaz üreticileribirkaç kilometrelik mesafeler için ± 3 m ve hatta ± 1 m sağlayabilmektedir.

2.16. Genel Video/Görüntü Standardları

2.16.1. Analog görüntü

Dünya çapında üç renkli/siyahbeyazanalog yayın standardı mevcuttur; bunlar NTSC, PAL ve SECAM formatlarıdır. Dünyada yaygın olarak 50 Hz ve 60 Hz olarak kullanılan iki şebeke frekansı vardır. Bu farklılık, tüm dünyayı temelde iki farklı video sisteme bölmektedir: 25 çerçeve/saniye (50 Hz) ve 30 çerçeve/saniye (60 Hz). 60 Hz, görüntü

işaretlerine renk eklendiğinde ufak bir ayar ile 59.94 Hz alan hızına değiştirilmiştir. 60 Hz tabanlı ülkeler orijinal olarak, NTSC olarak bilinen tekniği kullanmaktadır. 50 Hz sistemini kullanan ülkeler PAL veya SECAM sistemlerini kabul etmişlerdir. Şekil 2.22’te verilen görselde dünyada kullanılan video formatları görülmektedir.



Şekil 2.22. Dünyada video standartları [47]

NTSC, PAL ve SECAM’e ek olarak EIA-170, yakın devre televizyon (CCTV) için ABD standardı olarak geçmektedir. EIA-170 ve NTSC 525 satıra sahipken, PAL ve SECAM çerçeve başına 625 satıra sahiptir [37]. Genel olarak görüntü 4:3 oranındadır ve 2:1 geçmeli tarama (interlace) oranına sahiptir. 4:3 en boy oranı, yatay yönde dikey yöne kıyasla 4/3 kat daha fazla piksel olması gerektiğini göstermektedir. Çizelge 2.7 yaygın olarak kullanılan temel renkli görüntü işaretlerine ait özellikler verilmektedir. Tek renk yayın standartlarından EIA-170, NTSC ile CCIR, PAL ile uyumludur.

Çizelge 2.7. Analog video formları temel bilgileri

Standart	Çerçeve/Alan hızı (TV standart)	Görünüm Oranı (Renk Sistemi)	Tarama Satır Sayısı (Alt taşıyıcı Frekansı)
NTSC	29.97/59.94(EIA)	4:3(NTSC)	525(3.58 MHz)
PAL	25/50(CCIR)	4:3(PAL)	625(4.43 MHz)
SECAM	25/50(CCIR)	4:3(SECAM)	625(4.25/4.40 MHz)

2.16.2. Renk modelleri

Renkli görüntünün bir pikseli birçok şekilde tanımlanabilmektedir. En çok kullanılan yöntemler, bağımsız bir parlaklık işaretine ek olarak, “hue” ve “saturation” olarak tanımlanan iki renk işareti ve üç renk işaretidir.

Üç renk işareti tipik olarak kırmızı, yeşil ve mavinin yoğunluk değerlerinden ile oluşturulmaktadır. Her bir işaret parlaklık bilgisini de içermektedir. Beyaz ışık için; %30 kırmızı, %59 yeşil ve %11 mavi karışımı gerekmektedir. Buradan yola çıkarak, parlaklık işareti RGB nin yoğunluk değerlerine göre $Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$ formülü ile ifade edilmektedir.

2.16.3. Görüntü işaret tipleri

Görüntü işaretleri temelde üç ayrı tip olarak ifade edilmektedir ve bunlar komponent görüntü, kompozit görüntü ve S-Video olarak sıralanmaktadır. Komponent görüntü işaretinde, her bir özellik ayrı bir görüntü işareti olarak gönderilmektedir ve toplam olarak üç ayrı işaret ile renkli görüntü tanımlanmaktadır. Bahsi geçen üç işaret tipi, parlaklık ve iki renk fark işaretidir.

Kompozit görüntüde, renk ve parlaklık işaretleri tek bir taşıyıcı dalga üzerinde birleştirilir. Doğal olarak, bu iki bileşen arasındaki bazı girişimler kaçınılmazdır. Bu tip işaret, eşzamanlama ve renk görüntü işaretleri (veya siyah/beyaz görüntü-parlaklık) içerir ve tek kabloya ihtiyaç gösterir.

S-Video örneğin S-VHS, komponent analog görüntü ve kompozit görüntü arasındaki bir noktadadır. Biri parlaklık, diğeri kompozit renk olmak üzere iki bileşen kullanmaktadır.

2.16.4. Sayısal (dijital) görüntü

Dijital videolar sistemden sisteme yeniden iletilip kademeli olarak bozulmadığından ve yüksek oranda sıkıştırılabilir olduğundan sıklıkla sistemlerde tercih edilmektedir. Sayısal görüntü formatlarından SDI, en yaygın olarak üst düzey yayın uygulamalarında kullanılan formattır. SDI, saniyede 270 megabitlik bir seri veri akışıdır ve standart SMPTE 259'dur. Yüksek çözünürlüklü HD videolar için SDI akışı HD-SDI olarak adlandırılmaktadır. HD-SDI saniyede 1.485 gigabit hızında gönderilmektedir ve standart SMPTE 292M'dir. Her iki video için veriler 75 ohm BNC koaksiyel kabloya ile gönderilmektedir.

2.17. Mekanik Sistem Gereksinimleri

Elektro-Optik sistemlerin tasarım ve entegrasyonunda belirlenmesi gereken en önemli mekanik gereksinimler malzeme seçimi, bağlantı elemanı seçimi, kaplamalar, korozyon önlemleri, yapıştırıcılar, konektör seçimleri vb. dir. Bu bölümde sıralanan konulara ilişkin başlıklar altında bilgiler verilmektedir.

2.17.1. Malzeme seçimi

Askeri sistemlerin tasarım ve entegrasyonunda sıklıkla kullanılan en önemli malzemeler alüminyum ve alüminyum alaşımları ile çeliklerdir. Metalik malzemeler haricinde kompozit malzemeler de savunma sanayiinde oldukça fazla alanda kullanılmaktadır.

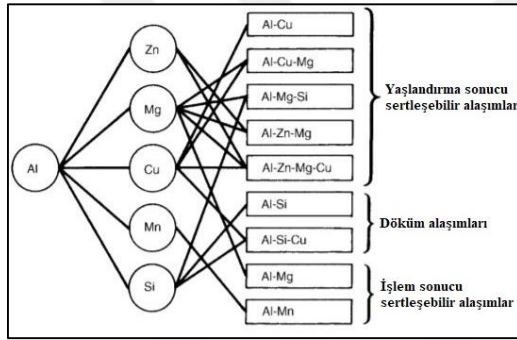
Alüminyum ve alüminyum alaşımları

Alüminyum, yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü element ve en bol bulunan metalik elementtir. Alüminyum alaşımları, yapısal metaller olarak kullanılan çeliklerden sonra ikinci sıradadır [48]. Alüminyum ve alaşımları, mühendislik uygulamalarında veya tasarımlarında özellikle hafif ağırlığa, yüksek mukavemet/ağırlık oranına, korozyon dayanımına ve nispeten düşük maliyetlere sahip olmaları nedeniyle kullanılmaktadırlar. Alüminyum, magnezyum ve berilyumdan sonra en hafif metaldir. Yoğunluğu yalnızca $2,7 \text{ g/cm}^3$ olup, çelik ($7,83 \text{ g/cm}^3$), bakır ($8,93 \text{ g/cm}^3$) veya pirincin ($8,53 \text{ g/cm}^3$) yaklaşık üçte biri kadardır [49]. Ayrıca yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, imalat kolaylığı ve hazır bulunabilirlikleri de kullanım sebepleri arasındadır [50]. Ticari olarak saf alüminyum en az %99 saf metal içermektedir. Saf durumundaki alüminyum nispeten zayıf bir metaldir. Oda sıcaklığındaki saf alüminyumun saflık derecesine bağlı olarak çekme dayanımı yaklaşık 90 Mpa, akma dayanımı ise yaklaşık 10-30 Mpa arasında değişmektedir [49]. Yine saflık derecesine bağlı olarak brinell sertliği 12-20 HB arasındadır. Saf alüminyumun en büyük dezavantajı ergime noktasının $660,4 \text{ }^\circ\text{C}$ gibi düşük sayılabilecek bir sıcaklıkta olmasıdır. Bu nedenle yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılamamaktadır.

Yapısal ürünlerde alüminyumun yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerinden yararlanabilmek için alüminyum genellikle alaşımlı hali ile kullanılmaktadır. Genel olarak alüminyum alaşımlarının mukavemet/ağırlık oranı yüksektir, bazı alüminyum alaşımları ısı

işlem veya haddelenerek sertleştirilebilir, ergime sıcaklıkları düşük olduğundan dökümü kolaydır, elektrik ve ısı iletkenlikleri iyidir, atmosferik korozyona karşı dirençleri yüksektir, zehirleyici özellikleri yoktur ve şekillendirilebilirlikleri iyidir.

Alaşımlamanın en önemli sebebi, mukavemet, sertlik, aşınma veya yorgunluğa karşı direnci arttırmaktır. Alüminyum alaşımlarında daha yüksek mukavemet sağlamak için en çok kullanılan elementler bakır, magnezyum, manganez, silikon ve çinkodur [48]. Şekil 2.23'te sanayide kullanılan başlıca alüminyum alaşımları gösterilmiştir. Ancak alüminyum alaşımlarının korozyon direnci Bakır (Cu) ve Nikel (Ni) esaslı çeliklere ve paslanmaz çeliklere göre daha düşüktür.



Şekil 2.23. Temel alüminyum alaşımları [48]

Alüminyum alaşımları şekillendirme işlemlerine göre işlem ve döküm alaşımları olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Alüminyum alaşımlarını tanımlamada işlem (wrought) ve döküm (cast) alaşımları için farklı adlandırmalar kullanılmaktadır. Dünyada genel olarak en yaygın kullanılan simgeleme Amerikan Standartlar Birliği (ANSI) tarafından belirlenmiştir. Bu simgeleme Alüminyum Birliği (AA) tarafından da kullanılmaktadır.

İşlem alaşımları için en yaygın şekilde dört basamaklı bir numaralandırma sistemi kullanılır. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtmektedir [49]. İşlem alaşımları için alaşım aileleri Çizelge 2.8 içerisinde verilmiştir.

Çizelge 2.8. Alüminyum işlem alaşım aileleri [49]

Sınıf	Özellikler
1xxx	Bu alaşım %99,0 veya daha fazla Al içermektedir
2xxx	Bu alaşımda Bakır (Cu) başlıca alaşım elementidir

Çizelge 2.8. (Devam) Alüminyum işlem alaşımları aileleri [49]

Sınıf	Özellikler
3xxx	Bu alaşımda Manganez (Mn) temel alaşım elementidir
4xxx	Bu alaşımda Silikon (Si) temel alaşım elementidir
5xxx	Bu alaşımda Magnezyum (Mg) temel alaşım elementidir
6xxx	Bu alaşımda Magnezyum (Mg) ve Silikon (Si) temel alaşım elementidir
7xxx	Bu alaşımda Çinko (Zn) temel alaşım elementidir
8xxx	Kalay (Sn) ve çeşitli bileşimleri karakterize eden bazı lityum bileşimleri içeren alaşımlar
9xxx	Gelecekteki kullanımlar için ayrılmıştır

Döküm alüminyum ve alüminyum alaşımlarını tanımlamak için bir ondalık nokta içeren dört basamaklı sayısal tanımlardan oluşan bir sistem kullanılmaktadır. İlk rakam ana alaşım elementini belirlerken son rakam döküm parçasını veya dökümhanede kullanılan ingotu belirtir. 2. ve 3. rakamlar ise alüminyumun saflığını göstermektedir. Çizelge 2.9 döküm alaşımları için alaşım ailelerini içermektedir.

Çizelge 2.9. Alüminyum döküm alaşımları aileleri [49]

Sınıf	Özellikler
1xx.x	Bu alaşım %99,0 veya daha fazla Al içermektedir
2xx.x	Bu alaşımda Bakır (Cu) başlıca alaşım elementidir
3xx.x	Bu alaşımda Silikon (Si) temel alaşım elementidir ancak Bakır (Cu) ve Magnezyum (Mg) gibi diğer alaşım elementleride eklenmektedir
4xx.x	Bu alaşımda Silikon (Si) temel alaşım elementidir
5xx.x	Bu alaşımda Magnezyum (Mg) temel alaşım elementidir
6xx.x	Kullanılmamaktadır
7xx.x	Bu alaşımda Çinko (Zn) temel alaşım elementidir ancak Bakır (Cu) ve Magnezyum (Mg) gibi diğer alaşım elementleri de eklenmektedir
8xx.x	Bu alaşımda Kalay (Sn) temel alaşım elementidir
9xx.x	Kullanılmamaktadır

Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri soğuk işlem sertleşmesinden ve ısıtılmalardan çok etkilendiğinden ısıtılmal işlem özelliklerinin malzeme tanımlamasına eklenmesi gerekmektedir. Temel olarak, ısıtılmal veya soğuk işlem tanımları ayrı ayrı büyük harflerden oluşmaktadır. Isıtılmal veya soğuk işlemlerin önemli alt bölümleri, gerektiği zaman harfin ardından bir veya daha fazla rakamla belirtilmektedir. Bu rakamlar, malzemede belirli özellik kombinasyonları üreten belirli işlem dizilerini belirtmektedir [49]. Alüminyum alaşımlarına uygulanan soğuk veya ısıtılmal işlemin kodlaması, alaşımların tanımlamasını belirten rakamlardan sonra tire çekilerek yazılır. Isıtılmal işlemleri karakterize eden harfler F, O, H, W ve T'dir. Çizelge 2.10 ve Çizelge 2.11 alüminyuma uygulanan ısıtılmal işlemleri ve açıklamalarını içermektedir.

Çizelge 2.10. Al ısıt işlemleri ve özellikleri [49]

Isıl İşlem	Niteliği
F	Üretildiği gibi anlamındadır. Bu ifade, üzerinde hiçbir işlem yapılmamış işlem ve döküm alaşımları için kullanılmaktadır. Döküm alaşımları için mekanik özellikler açısından bir sınırlama getirilmemektedir
O	Isıl işlem görmüş, en yumuşak temper özelliğinde işlem alaşımları ve ısıl işlem görmüş, boyutsal kararlılığı iyi olan mükemmel sünekliğe sahip sahip döküm alaşımları için kullanılmaktadır. Bazı kaynakları 0 (sıfır) olarak göstermektedir ancak doğru gösterimidir “O” harfidir.
H	Isıl işlemle sertleştirilemeyen ve deformasyonla sertleştirilmiş işlem alaşımları için kullanılır. Soğuk işlemle deformasyon sertleşmesi işlemine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarında “H” harfinin ardından her zaman iki veya daha fazla rakam gelir. H1 yalnızca soğuk işlemle sertleştirilmiş alaşımları, H2 soğuk işlemle sertleştirilmiş, kısmen tavlanmış alaşımları, H3 soğuk işlemle sertleştirilmiş, kısmen tavlanmış ve kararlı hale getirilmiş alaşımları temsil etmektedir.
W	Çözeltiye ama ısıl işlemi uygulanmış ancak kararsız bir işlem uygulamasıdır. W işleminden sonra doğal veya yapay yaşlandırma işlemi uygulanması gerekmektedir.
T	Kararlı bir ısıl işlem yapısı elde etmek için alaşıma F, O veya H işlemlerinden başka uygulanan temperleme işlemlerini temsil etmektedir. Kararlı temper durumunu gösteren “T” harfinden sonra ısıl işlemin özelliğini belirten 1 ile 10 arası rakamlar kullanılmaktadır.

Çizelge 2.11. “T” ısıl işlem alt grupları [49]

Isıl İşlem	Açıklaması
T1	Yüksek sıcaklıkta şekillendirilmiş ve soğutulup doğal olarak büyük ölçüde kararlı durumda yaşlandırılmış
T2	Yüksek sıcaklıkta şekillendirilmiş ve soğutulup soğuk işlenmiş ve büyük ölçüde sabit koşullara doğal olarak yaşlandırılmış
T3	Çözelti ısıl işlem görmüş, soğuk işlenmiş ve büyük ölçüde kararlı koşulda doğal olarak yaşlandırılmış,
T4	Çözelti ısıl işlem görmüş ve büyük ölçüde kararlı bir koşulda doğal olarak yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıkta şekillendirilmiş ve soğutulup yapay olarak yaşlandırılmış,
T6	Çözelti ısıl işlem görmüş ve yapay olarak yaşlandırılmış
T7	Çözelti ısıl işlem görmüş ve aşırı yaşlanmış veya stabilize edilmiş
T8	Çözelti ısıl işlem görmüş, soğuk işlenmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısıl işlem görmüş, yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış

Alüminyum 6061-T6, düşük deformasyon ve kirlilik riski, stabilitesi ve mükemmel oksidasyonu nedeniyle CNC işleme için en yaygın malzemedir.

Alüminyum işlem alaşımları ve özellikleri

Alüminyuma ait işlem alaşımlarının özellikleri ve açıklamaları Çizelge 2.12 ile verilmiştir.

Çizelge 2.12. Alüminyum işlem alaşımları ve özellikleri

İşlem Alaşımları	Özellikleri
1xxx Serisi	%99 veya daha yüksek saflıkta alüminyum, özellikle elektrik ve kimya alanlarında birçok uygulamaya sahiptir. Bu alüminyum sınıfları, mükemmel korozyon direnci, yüksek termal ve elektrik iletkenlikleri, düşük mekanik özellikler ve mükemmel işlenebilirlik ile karakterize edilir. Tipik kullanımlar arasında kimyasal ekipman, reflektörler, ısı eşanjörleri, elektrik iletkenleri ve kapasitörler, ambalaj folyosu, mimari uygulamalar ve dekoratif süslemeler bulunur.
2xxx Serisi	Bakır, 2xxx serisi alaşımlarda ana alaşım elementidir ve genellikle ikincil katkı olarak magnezyum içerir. T6 temperlerinde çok yüksek mukavemet özelliği gösterirler. İşlenebilirlikleri çok iyidir. Kaynak özellikleri genelde iyi değildir. 2xxx serisindeki alaşımlar, diğer alüminyum alaşımlarının çoğu kadar iyi bir korozyon direncine sahip değildir [48]. Genellikle havacılık sanayiinde ve mukavemetin önemli olduğu kritik uygulamalarda kullanılırlar [49].
3xxx Serisi	Manganez, 3xxx serisi alaşımların ana alaşım elementidir. Bu alaşımlar genellikle ısıl işlem görmez ancak 1xxx serisi alaşımlardan yaklaşık %20 daha fazla mukavemete sahiptir. Bununla birlikte, iyi işlenebilirlik gerektiren orta mukavemetli uygulamalar için genel amaçlı bir alaşım olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [48]. Bunlar içecek kutuları, otoyol işaretleri, çatı kaplamave diğer mimari uygulamalar bulunur [49].
4xxx Serisi	Silikon 4xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementidir. Silikonun %12'ye kadar eklenmesiyle erime sıcaklığı önemli ölçüde düşürülebilmektedir. Bu nedenle, alüminyum-silikon alaşımları, kaynak telinde ve ana metalinkinden daha düşük bir erime aralığının gerekli olduğu alüminyumun birleştirilmesi için sert lehim alaşımları olarak kullanılır [49].
5xxx Serisi	Magnezyum 5xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementidir. Ana alaşım elementi olarak veya manganez ile birlikte kullanıldığında, sonuç orta ila yüksek mukavemetli işle sertleşebilir bir alaşımdır. Bu serideki alaşımlar iyi kaynak özelliklerine ve deniz atmosferlerinde korozyona karşı iyi bir dirence sahiptir. Bu nednele denizcilik uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar. Bununla birlikte, düşük sıcaklıklarda (kriyojenik) iyi mekanik özellik gösterirler. [49].
6xxx Serisi	Magnezyum ve Silikon 6xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementleridir. Çevre koşullarında kullanıldığında korozyon özellikleri oldukça iyidir. Sıcak şekillendirme için uygundur. Isıl işlem ile mukavemet ve sertlik kazandırılabilir. Kaplama ve boya işlemlerinden sonra yüzey görüntüsü oldukça iyidir. Çoğu 2xxx ve 7xxx alaşımları kadar güçlü olmasada, 6xxx serisi alaşımlar orta kuvvette iyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, işlenebilirliğe sahiptir [49].
7xxx Serisi	Çinko 7xxx serisi alaşımlardaki ana alaşım elementleridir. Seri içerisinde T6 temperi en mukavemetli olanıdır. Yüksek mukavemetin gerektiği kritik uygulamalarda kullanılırlar. 7xxx serisi alaşımlar, gövde yapılarında, mobil ekipmanlarda ve diğer yüksek gerilimli parçalarda kullanılır. Deniz ortamlarında gerekli yüzey kaplama ve boya önlemleri alınarak kullanılabilir. Ancak zorunlu bir durum söz konusu değilse tercih edilmemelidir.

Alüminyum döküm alaşımları ve özellikleri

Döküm alaşımları, döküm amacıyla belirtilen alüminyum alaşımları, herhangi bir elementin maksimum oranı %12'yi geçmeyen bir veya daha fazla alaşım elementi içerir. Döküm için bir alaşımın seçimi büyük ölçüde kullanılacak kalıp tipine bağlıdır. Kullanılacak kalıp türü

(kum, kalıcı veya kalıp), tasarımın karmaşıklığı, boyut, enine kesit, tolerans, yüzey kalitesi ve üretilecek bir dizi döküm gibi faktörlerle belirlenir [50]. Bu nedenle alüminyum döküm alaşımlarının seçiminde dikkat edilecek en önemli nokta alaşımın hangi döküm prosesinde kullanılacağıdır. Alaşım, kullanılacak döküm yöntemine uygun olarak belirlenmelidir.

Birincil alaşım elementlerinin etkilerine bağlı olarak, alüminyum döküm alaşımlarının ana sınıflarının birkaç özelliği hakkında bazı genellemeler yapılabilir. Bu tür en önemli özellikler arasında, 1'den (en yüksek veya en iyi) 5'e (en düşük veya en kötü) derecelendirmelerle, Çizelge 2.13'te gösterildiği gibi dökülebilirlik ve son ürün özellikleri ve karakteristikleri ile ilgili özellikler bulunmaktadır. Bu tür derecelendirmeler genellemedir ve gruplardaki bazı bireysel alaşımlar biraz farklı davranışlar sergileyebilmektedir [51].

Çizelge 2.13. Dökme alüminyum alaşımları için karakteristik değerler [51]

Sınıfı	Akışkanlık	Çatlama	Sızdırmazlık	Korozyon	İşlenme Kabiliyeti	Kaynak Kabiliyeti
1xx.0	-	-	-	1	1	1
2xx.0	3	4	3	4	1-3	2-4
3xx.0	1-2	1-2	1-2	2-3	3-4	1-3
4xx.0	1	1	1	2-3	4-5	1
5xx.0	5	4	4-5	3	1-2	3
7xx.0	3	4	4	4	1-2	4
8xx.0	4	5	5	5	3	5

Çelikler

Çelikler, %0,02 ile %2,11 aralığında karbon içeriği değişen ve genel kullanımlarında en fazla yaklaşık olarak %1,1 karbon içeren demir alaşımlarıdır. Çelikler içerisinde az miktarda manganez, fosfor ve kükürt bulundursa da karbon elementi çeliklerinin temel bileşenidir. En genel anlamda karbon çelikleri ve alaşımlı çelikler olarak iki geniş gruba ayrılmaktadırlar. Karbon çelikleri aynı zamanda düz karbonlu çelikler olarak da adlandırılmaktadır ve kendi içerisinde düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu çelikler olarak ayrılmaktadır. Düşük karbonlu çelikler yumuşak çelik olarak da anılmaktadır ve en fazla %0,20'a kadar karbon içermektedirler. Orta karbonlu çelikler %0,20 ile %0,50 arası karbon içermektedir. Yüksek karbonlu çelikler ise %0,50'den fazla karbon içermektedir. Sınıflandırmanın temelini oluşturan karbon miktarı değişikliği, karbon çelikleri sınıflarının arasındaki özellik farklarının ana sebebidir. Buna göre, karbon miktarının artışıyla mukavemet ve sertlik özellikleri artarken süneklik özelliği azalmaktadır. Diğer bir çelik

sınıfı olan alaşımlı çelikler ise kendi içerisinde düşük alaşımlı çelikler, alaşımlı çelikler ve yüksek alaşımlı çelikler olarak sınıflandırılmaktadırlar [52].

Düşük alaşım çelikleri içerisinde, yaklaşık olarak %5'ten daha az miktarlarda ek alaşım elementlerinden barındıran demir-karbon alaşımlarıdır. Bu eklemeler sayesinde, bazı uygulamalar için karbon çeliklerinden daha yüksek mukavemet, sertlik, aşınma dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Bu gelişmiş özellikleri elde edebilmek için genellikle çeşitli ısıt işlemler uygulanmaktadır. En yaygın eklenen yaygın alaşım elementleri, krom, manganez, molibden, nikel ve vanadyumdur. Alaşıma krom (Cr) eklenmesi mukavemeti, sertliği ve aşınma direncini iyileştirmektedir. Manganez (Mn) eklenmesi çeliğin mukavemetini ve sertliğini arttırmaktadır. Molibden (Mo) eklenmesi, tokluğu ve sertleşebilirliği artırmaktadır. Ayrıca aşınma direnci için karbür yapısı oluşturmaktadır. Nikel (Ni) eklenmesi çeliğin mukavemetini ve tokluğunu artırmaktadır. Nikel, korozyona karşı dayanımı kritik düzeyde artırmaktadır ve bazı paslanmaz çelik türlerinde (krom haricinde) ana bileşen olarak rol oynamaktadır. Vanadyum (V) eklenmesi, yüksek sıcaklıkta işleme ve ısıt işlem sırasında tane büyümesini engellediğinden çeliğin mukavemetini ve tokluğunu artırmaktadır. Ayrıca aşınma dayanımını artıran karbürlerin oluşmasını da sağlamaktadır [52].

Paslanmaz çelikler, korozyona karşı dayanımları olan, geniş ve yaygın olarak kullanılan yüksek alaşımlı demir-krom alaşım ailesidir. Paslanmaz çelikteki ana alaşım elementi, genellikle %15'in üzerinde olan kromdur. Korozyona dayanım özelliği, oksijen ile girilen tepkime sonucunda oluşan bir krom-oksit yüzey film tabakası sayesinde kazanılmaktadır. Film tabakasının oluşabilmesi için en az %12 olmak üzere %12 ile %18 aralığında krom içeriği gereklidir. %12 içerik dahi orta şiddetteki atmosferik korozyona dayanım için yeterli gelmektedir. Bazı paslanmaz çeliklerde korozyon dayanımını artırabilmek için alaşım elementi olarak nikel de eklenmektedir. Ayrıca, krom içeriği yaklaşık %30'a kadar artabilmekte ve manganez, silikon veya molibden gibi farklı alaşım elementleri de eklenebilmektedir. Korozyon dayanımına ek olarak paslanmaz çelikler, mukavemet ve süneklik özellikleriyle de tercih edilmektedirler. Ancak mukavemet ve süneklik özellikleri birçok uygulamada kullanılmak istense de, genellikle imalat veya işleme zorluğu çıkarmaktadır. Paslanmaz çelikler, kendi içerisinde ortam sıcaklığındaki alaşımda bulunan ana faza göre östenitik paslanmaz çelikler, ferritik paslanmaz çelikler ve martensitik paslanmaz çelikler olarak üç ana gruba ayrılmaktadır.

Östenitik paslanmaz çelikler, yaklaşık olarak %18 krom ve %8 nikelden oluşan bir bileşime sahiptir ve üç ana grup arasında korozyona dayanımı en yüksek olan gruptur. Bu bileşimden dolayı bazen 18-8 paslanmaz olarak da anılmaktadırlar. Manyetiklik özellikleri yoktur ve çok sünektirler. Östenitik paslanmaz çelikler, kimyasal cihazlarda, gıda işleme cihazlarında kullanıldığı gibi yüksek korozyon direnci gerektiren makine parçalarının imalatında kullanılır [52]. Özellikle deniz platformlarında kullanılması önerilen “A” sınıfı paslanmaz çelik bağlantı elemanları östenitik paslanmaz çeliklerdir.

Ferritik paslanmaz çelikler yaklaşık olarak %15 ile %20 arasında bir krom içeriğine sahiptir, düşük karbon içermektedirler ve nikel içermezler. Ferritik paslanmaz çelikler manyetikler ve östenitlere göre daha az sünek ve östenitik paslanmaz çeliklere göre korozyona daha dayanıklıdır. Ferritik paslanmazdan yapılmış parçalar, mutfak gereçlerinden jet motoru bileşenlerine kadar değişmektedir [52].

Martensitik paslanmaz çelikler, ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksek karbon içeriğine sahiptirler. Bu nedenle ısıtım işlemi görebilirler. %18'e kadar krom bulundurmalarına rağmen Nikel içermezler. Mukavemetli, sert ve yorulma dayanımları genelde yüksektir, ancak genellikle diğer iki grup kadar korozyona dayanıklı değildirler. Genellikle çatal bıçak takımı ve cerrahi aletler için kullanılırlar [52].

Karbon çelikleri ve alaşımlı çeliklerin isimlendirilmesi için AISI, SAE, DIN, TSE gibi birden fazla standart olsa da en yaygın isimlendirme/tanımlama sistemi, AISI Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü ile SAE Otomotiv Mühendisleri Topluluğu'na ait isimlendirme sistemidir. Sınıflandırmanın AISI veya SAE'ye göre yapıldığını belirtmek için genellikle numaralandırma öncesinde AISI veya SAE ön eki de kullanılabilir. AISI-SAE standartlarına göre toplamda üç farklı tanımlama sistemi mevcuttur. Bunun sebebinin üç ayrı çelik gruplaması yapılmasıdır. AISI'a göre gruplama, karbon çelikleri, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler olarak ayrılmıştır. Karbon çelikleri bu standarda göre yapı çelikleri olarak geçmektedir.

Numaralandırma sistemi, yapı çelikleri için dört veya beş basamaklı sayılardan, takım çelikleri için takım çeliğine ait grubu temsil eden bir harf ve sıra numarasını belirten bir sayının birleşmesi ile ve paslanmaz çelikler için genellikle üç basamaklı sayılardan oluşmaktadır. Paslanmaz çelikler için ilk hane genel tipi temsil ederken son iki hane tip

içindeki özel sınıfı belirtmektedir. Yapı çeliklerinin AISI veya SAE sınıflandırması için açıklamalar Çizelge 2.14’de verilmiştir. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması için Çizelge 2.15’te açıklamalar verilmiştir.

Çizelge 2.14. AISI-SAE yapı çelikleri sınıflandırması [53]

Gösterim	Açıklaması	Gösterim	Açıklaması
10XX	Düz karbonlu çelikler	46XX-48XX	Nikel - molibden çelikler
11XX	Otomat Çelikleri	50XX-52XX	Krom çelikler
13XX	Manganlı Çelikler	61XX	Krom - vanadyum çelikler
40XX-44XX	Molibden alaşımlı çelikler	72XX	Tungsten - krom çelikler
41XX	Krom-molibden çelikler	92XX	Silikon - manganez çelikler
43XX-47XX	Nikel-krom-molibden çelikler	81XX-98XX	Nikel-krom-molibden çelikler

Çizelge 2.15. AISI-SAE paslanmaz çeliklerin sınıflandırması

Gösterim	Açıklama
301 ile 348 arası	Östenitik Paslanmaz Çelikler
403 ile 422 arası	Martenzitik Paslanmaz Çelikler
430 ile 446 arası	Feritik Paslanmaz Çelikler

Kompozit malzemeler

Kompozitler, birbiri içerisinde çözünmeden makroskopik düzeyde birleştirilen iki veya daha fazla birleşik bileşenden oluşan yapısal bir malzeme çeşididir [54]. Kompozit malzemelerin genel avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.16 ile verilmiştir.

Çizelge 2.16. Kompozit malzemelerin özellik karşılaştırılması

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek özgül mukavemet	Yüksek malzeme maliyeti
Katman malzeme özelliklerinin, yönünün ve sayısının istenen yapısal özellikleri sağlayacak şekilde değiştirilebilmesi,	Yüksek süreç kontrolü, kalite denetimi ve karakterizasyon maliyeti
Montajlardaki bağlayıcı sayısının ve çeşidinin azaltılarak karmaşık geometrilerin tek üretim sürecinde tamamlanabilmesi,	Düşük çarpma mukavemeti ve direngenliği
İyi yorulma dayanımı,	Özellikle sandviç yapılarda neme çekme sorunu
Korozyon sorununun olmaması,	Yüksek yatırım maliyeti
Düşük ağırlık	Yıldırım koruma önlemi gerekliliği

Kompozitler yapı itibari ile iki ana bileşenden oluşturulmaktadır. Bu bileşenlerden birigüçlendirici, diğer bileşen ise matris olarak adlandırılmaktadır. Güçlendirici elemanlar kompozit parçaların asıl yük taşıyıcı elemanı olan, elektriksel ve ısı özelliklerini belirleyen

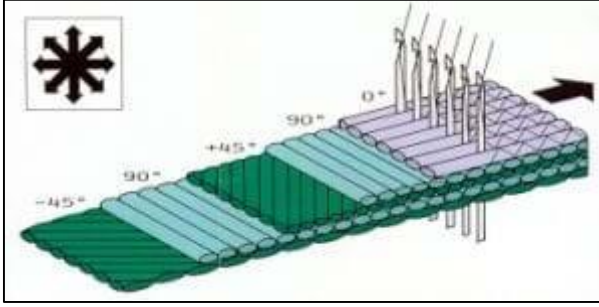
yapılardır. Matris yapılar ise güçlendiricileri bir arada tutan ve güçlendiriciler arasında yük aktarımını sağlayan malzeme grubudur. Matrisler ayrıca güçlendiricileri çevresel etkenlerden (nem, kimyasal korozyon, vb) koruyarak güçlendiricilerin kırılma olasılığını ve beklenenden önce yenilmesini engellemektedir.

Malzemelerin mekanik avantajlarını karşılaştırabilmek için özgül modül olarak adlandırılan değer hesaplanmaktadır. Özgül modül, elastisite modülünün malzeme yoğunluğuna oranıdır. Çoğu metalde bu oran neredeyse aynı çıkmaktadır. Diğer bir karşılaştırma parametresi ise özgül mukavemet olarak adlandırılan ve malzeme mukavemetinin malzeme yoğunluğuna oranıdır. Kompozit malzemelerde bu iki oran metallere göre oldukça yüksek çıkmaktadır. Yüksek oran, aynı mukavemet değerine sahip malzemelerin ağırlığındaki azalmanın sonucudur ve tasarımcılar tarafından gerek duyulan bir özelliktir. En sık kullanılan fiberler, kompozit ve metal malzemelere ait ilgili değerler Çizelge 2.17 ile verilmektedir.

Çizelge 2.17. Farklı fiber, kompozit ve metallere ait özgül değerler [54]

Malzeme	Özgül Ağırlık	Young Modülü (GPa)	Maksimum Mukavemet (MPa)	Özgül Modül (GPa-m ³ /kg)	Özgül Mukavemet (MPa-m ³ /kg)
Grafit fiber	1,8	230	2067	0,1278	1,148
Aramid fiber	1,4	124	1379	0,08857	0,9850
Cam fiber	2,5	85	1550	0,0340	0,6200
Tek yönlü grafit/epoksi	1,6	181	1500	0,1131	0,9377
Tek yönlü cam/epoksi	1,8	38,6	1062	0,02144	0,5900
Tek yönlü grafit/epoksi	1,6	95,98	373	0,06000	0,2331
Tek yönlü cam/epoksi	1,8	23,58	88,25	0,01310	0,0490
Yarı-izotropik grafit/epoksi	1,6	69,64	276,48	0,04353	0,1728
Yarı-izotropik cam/epoksi	1,8	18,96	73,08	0,01053	0,0406
Çelik	7,8	206,84	648,1	0,02652	0,08309
Alüminyum	2,6	68,95	275,8	0,02652	0,1061

Çizelge 2.17 ile verilen malzemeler arasında tek yönlü, çapraz yönlü ve izotropik kompozit yapıları verilmiştir. Tek yönlü yapıda tüm fiberler aynı yönde serilmektedir. Çapraz yönlü yapılarda birbirine göre dik açılarda serilen tek yönlü tabakalardan oluşmaktadır. Yarı-izotropik yapı ise elastik özelliklerin malzemenin tüm yönlerinde aynı olduğu yapılardır. Serim açılarına dair örnekler Şekil 2.24 ile verilmektedir.



Şekil 2.24. Kompozit fiber serim farkları [55]

Genel olarak kompozit üretimi işçilik yoğun bir üretim yöntemi olmasına rağmen malzeme seçimi parçanın son maliyetine önemli ölçüde etki etmektedir. Genel olarak maliyet, yapısal ve elektromanyetik verilerin olması, mevcut üretim yöntemleri ile kullanılabilir olması, yapısal performans, elektromanyetik performans, üretim kolaylığı, üretim deneyiminin bulunması veya yakın ve orta vadede yeniden temin edilebilir olması malzeme seçim sınırlamalarını oluşturmaktadır.

2.17.2. Sökülebilir bağlantı elemanları

Mekanik bağlantı elemanları, montajı oluşturan iki veya daha fazla elemanı bir araya getirmek için kullanılmaktadır. Bağlantı elemanlarının bu fonksiyonu yerine getirirken üzerlerine gelen yükleri ve çevre koşulları gibi gereksinimleri karşılaması gerekmektedir. Bu nedenle bağlantı elemanının seçimi yapılırken bağlantı elemanın sökülebilir veya sökülemez (kalıcı) olması, bağlantı elemanından beklenen mukavemet gereksinimi, kullanılacak olan bağlantı elemanı sayısı, seçilen malzemedeki elemanın korozyon dayanımı, titreşim dayanımı, elektriksel iletkenlik veya bağlantı elemanının montaj şekli, sıkma torku gibi dikkate alınması gereken birçok özellik bulunmaktadır. En sık kullanılan sökülebilir bağlantı elemanları arasında civatalar, vidalar, somunlar bulunmaktadır.

Mühendislik uygulamaları için birden fazla diş profili geliştirilmiştir. Genel olarak Çizelge 2.18 ile belirtilmiş olan diş profilleri kullanılmaktadır.

Çizelge 2.18. Genel kullanılan diş profil standartları

Profil	Açıklama
ISO	International Standards Organization (metric), Uluslararası Standartlar Organizasyonu (metrik),
UNC	Unified National Coarse, Birleşik Ulusal Normal Diş

Çizelge 2.18. (Devam) Genel kullanılan diş profil standartları

Profil	Açıklama
UNF	Unified National Fine, Birleşik Ulusal İnce Diş
UNEF	Unified National Extra Fine, Birleşik Ulusal Ekstra İnce Diş
UN	Unified National, Birleşik Ulusal Diş
UNS	Unified National Special, Birleşik Ulusal Özel Diş
UNR	Unified National Round (round root), Diş dibi yuvarlatılmış

Metrik dişlerde çap ve hatve, milimetre cinsinden yazılmaktadır. Bağlantı elemanı gösterimlerinde metrik ifadesi için “M” ifadesi kullanılır. Boyutlar M ifadesi ile başlar ve ifade vida çapı önünde kullanılır. Hatve değeri ise çap değerinden sonra ifade edilir. Son olarak, üçüncü sayı olarak vida boyuyazılır. Uluslararası (ISO) standardı metrik diş bilgilerini basitleştirmek için kaba diş tanımlama içerisindeki hatve değeri belirtme çizgisini ortadan kaldırmıştır [56].

İnce vida boyutları, nominal ana çap ve ince başına diş sayısı kullanılarak belirtilmektedir. Örneğin, 3/8-16 (kaba) bir diş 3/8 nominal ana çapa ve ince başına 16 dişe sahipken, 3/8-24 (ince) diş aynı nominal ana çapa ve ince başına 24 dişe sahiptir. UNC genellikle seri imalat vida, cıvata ve somunlar için kullanılmaktadır. UNC dişlerin ince dişlere (UNF) göre diş sıyırma mukavemeti daha yüksektir. UNF diş UNC ile aynı diş profiline sahiptir. Aynı çapta adım ölçüsü azaltılmış diş tanımları için kullanılmaktadır.

Cıvatalar çoğu uygulamada, tasarım parçası üzerine diş açılmış bir deliğe doğrudan monte edilmektedir. Diş açılan yüzeyler zamanla sökülüp takılma gibi işlemler sebebiyle yıpranarak kullanılamaz hale gelebilmektedir. Özellikle parçanın malzemesi alüminyum gibi yumuşak bir metalse, cıvata bağlantısı ile bu yıpranma veya deformasyon çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu nedenle ana parçanın zarar görmesini engellemek için açılan deliklere “helicoil” adı verilen metalden yapılan yay benzeri yapılar takılır. Bu sayede helicoiller cıvata ile ana parça arasında arayüz oluşturarak, cıvata dişlerinin bağlandığı yüzey haline gelmektedir.

Helicoile benzer bir yapı ise “insert” olarak adlandırılan mekanik elemanlardır. Insertler metal veya kompozit parçalara yapıştırılarak veya çakılarak kullanılmaktadırlar. Helicoille aynı işlevi görmelerine rağmen en büyük farkları kompozitlere uygulanmaları ve daha mukavemetli olmalıdır.

Cıvata Kalite Standartları

Cıvatalar malzemelerine göre genel olarak karbon çeliği ve paslanmaz çelik olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Çelik cıvatalar için ISO 898, paslanmaz çelik cıvatalar için ISO 3506 standardı kullanılmaktadır.

ISO 898 standardı metrik karbon çeliği ve çelik alaşımlarına ait mekanik özellikleri tanımlayan standarttır. Bu standarda göre, cıvata, vida ve saplamaların özellik sınıfları için sembol ifadeleri, bir noktayla ayrılmış iki sayıdan oluşmaktadır. Noktanın solundaki sayı bir veya iki basamaktan oluşmaktadır ve nominal gerilme mukavemetinin (R_m , nom) 1/100'ünü Mpa olarak göstermektedir. Noktanın sağındaki sayı, nominal akma dayanımı ile nominal gerilme dayanımı arasındaki oranın 10 katını göstermektedir (akma dayanımı oranı). Ek olarak, özellik sınıfı tanımlamasının solundaki ek bir sıfır, bağlantı elemanlarının yüklenebilirliği azalttığını gösterir [57]. ISO 898-1'e göre nominal çekme dayanımı ile akma dayanımı oranının çarpımı megapaskal (MPa) cinsinden nominal akma dayanımını vermektedir [57]. ISO metrik standarda ait dış serisi için çekme ve akma dayanımları Çizelge 2.19 ile verilmiştir.

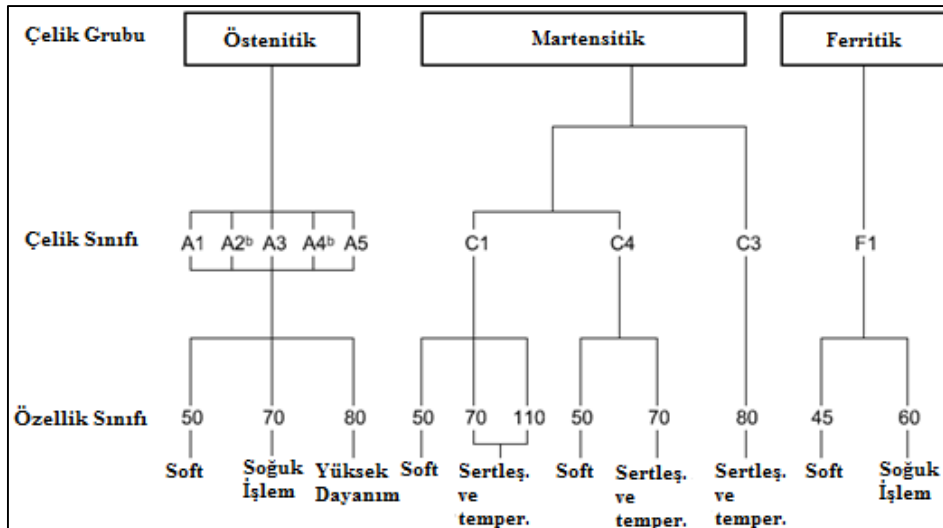
Çizelge 2.19. ISO 898 metrik cıvata kaliteleri mekanik özellikleri [58]

Cıvata Kalitesi	Malzeme ve Isıl İşlemi	Çekme Mukavemeti N/mm ²	Akma Mukavemeti N/mm ²	Kopma Gerilmesi % minimum
3.6	Az C-alaşımlı çelikler	300 (330)	180 (190)	25
4.6	Az veya orta değer C-alaşımlı çelikler	400	240	22
4.8		400 (420)	320 (340)	14
5.6	Az veya orta değer-alaşımlı çelikler	500	300	20
5.8		500 (520)	400 (420)	10
6.8		600	480	8
8.8 <M16	Su verilmiş ve tavlanmış az veya orta değer C-alaşımlı ve ek metalli çelikler	800	640	12
8.8 >M16		800 (830)	640 (660)	
9.8		900	720	10
10.9	Su verilmiş ve tavlanmış az veya orta değer C-alaşımlı ve ek metalli çelikler	1000 (1040)	900(940)	9
12.9	Alaşımlı, su verilmiş ve tavlanmış çelikler	1200 (1220)	1080(1100)	8

ISO 3506 standardı korozyona dayanıklı paslanmaz çeliklerden östenitik, martensitik ve ferritik çelik sınıflarından yapılmış olan cıvata, vida ve saplamaların mekanik özelliklerini tanımlayan standarttır [59].

Paslanmaz çelik kaliteleri için sembol sistemi ile cıvata, vida ve saplamalar için tanımlama sistemi Şekil 2.25’de verilmiştir. Bu standarda göre sembolifadesi, bir tire ile ayrılmış iki haneden oluşmaktadır. İlk hane kullanılan çeliğin kalitesini, ikinci hane ise özellik sınıfını belirtmektedir. Çelik sınıfının kalite tanımı (ilk hane) A, C veya F harflerinin birinden oluşmaktadır. “A” harfi östenitik çelik, “C” harfi martensitik çelik ve “F” harfi ferritik çelik için çelik grubunu ve bu çelik grubu içindeki bir dizi kimyasal bileşimi gösteren bir rakamı göstermektedir. Özellik sınıfının tanımı (ikinci hane) ise, bağlantı elemanının çekme mukavemetinin 1/10’ unu temsil eden iki veya üç rakamdan oluşmaktadır.

Kullanımı en yaygın paslanmaz çelik mekanik bağlantı elemanları A1 ile A5 arasındaki sınıflarla tanımlanmaktadır. A2 grubu en yaygın kullanılan gruptur. Bu sınıf paslanmaz çelik %18 krom ve yaklaşık %8 nikel içermektedir. Bu seri koroziv ortamlarda kullanılmamaktadır. A4 sınıfı paslanmaz çelikler ise %2-3 arası molibden içerdiğinden aside karşı çok iyi direnç göstermektedir. Bu alaşım elementi sayesinde deniz platformlarında kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.25. Paslanmaz çelik bağlantı elemanları için tanımlama sistemi [59]

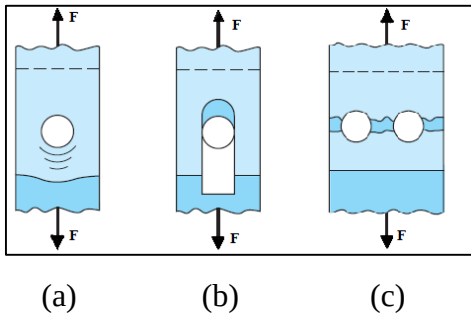
Östenitik paslanmaz çelik sınıfı cıvata, vida veya sapmalar için mekanik özellikler Çizelge 2.20’de verilmiştir.

Çizelge 2.20. Östenitik paslanmaz çelik sınıfı elemanlar için mekanik özellikler [59]

Çelik Grubu	Çelik Sınıfı	Özellik Sınıfı	Çekme Dayanımı, min. MPa	%0,2 uzama dayanımı, min. MPa	Kırılma öncesi uzama, min. mm
Östenitik	A1, A2, A3, A4, A5	50	500	210	0,6d
		70	700	450	0,4d
		80	800	600	0,3d

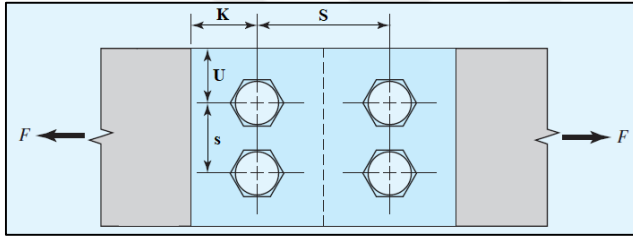
2.17.3. Bağlantı elemanları için montaj gereksinimleri

Mekanik yapılar kesme kuvvetlerinin etkisi altında olduğunda bu yüklemeyi karşılayabilmek için taşıma dayanımı, çekme dayanımı ve koparma dayanımı olarak adlandırılan üç ayrı kopma (yetmezlik) etkisiyle ile karşılaşabilmektedir [60]. Özellikle parça boyutları belirlenirken bu üç etkinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Taşıma dayanımı yetmezliği, cıvata kavrama çapının parça kalınlığındaki delik alanına yapmış olduğu baskı olarak tanımlanmaktadır. Bu kopma durumu, aşırı yükleme sonrasında ve kopma öncesinde gözle görülüp belirlenebilmektedir. Bu sebeple mekanik bağlantı parçalarını montaj yapılan parçaya konumlandırılmasında ve ana parça tasarımlarında taşıma dayanım yetmezliğine göre tasarlanması beklenmektedir. Bu yetmezliğe göre yapılan tasarımlarda kopma henüz meydana gelmeden deformasyonların görülmesiyle müdahalede bulunulabilmektedir. Böylece parça güvenilirliği artırılmaktadır. Kopma dayanımıyetmezliği genellikle cıvataya gelen yüklemeye paralel parça kenarlarında meydana gelmektedir. Şekil 2.26 ile verilmiş olan görseller dayanım yetmezliklerini göstermektedir.



Şekil 2.26. (a) Taşıma dayanımı yetmezliği, (b) kopma dayanımı yetmezliği, (c) çekme dayanımı yetmezliği [61]

Tasarlanan parçada bağlantı elemanlarının konumlandırılması çekme ve kopma dayanımına engel olmak için kritik önem taşımaktadır. Buna göre Şekil 2.27’de gösterilen ve “K” ile ifade edilen kenar mesafesi, “U” ile ifade edilen uç mesafesi, “S” ile ifade edilen yüke dik delik mesafesi ve “s” ile ifade edilen yüke paralel delik mesafesi tasarımda belirleyici rol oynamaktadır. Buna göre parçada kenar mesafesi $2,5D$ değerinden büyük olduğu durumlarda ve uç mesafesi $3D$ değerinden büyük olduğu durumlarda kopma ve çekme dayanımı yetmezliği yerine taşıma dayanımı kritik hale gelmektedir. Bu nedenle cıvata veya vida bağlantısı içeren parça tasarımlarında kenar mesafesi $\geq 2,5 D$ mm ve uç mesafesi $\geq 3 D$ mm değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu ifadelerde “D” bağlayıcı anma çapıdır ve metrik sistemde birimi milimetredir. “s”, yüke dik olan delikler arası mesafenin $5 D$ ile $6 D$ arasında olması ve “S” yüke paralel olan delikler arası mesafenin $5D$ ile $8D$ arasında olması önerilmektedir [60].



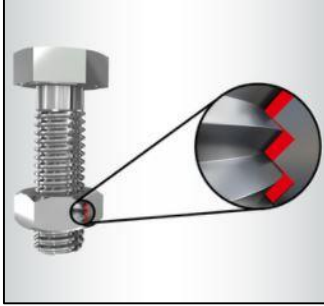
Şekil 2.27. Parça kenar mesafeleri [61]

Tasarımlarda kullanılan bağlantı elemanı boyu önemlidir. Sağlıklı tasarımlar için cıvata ucunun en az iki diş somun dışında kalması beklenmektedir. Bu nedenle cıvata boyu seçimi yapılırken bağlantı parçası et kalınlığı, somun, pul, kullanılıyorsa yaylı pul seçimleri dâhil olmak üzere kavrama yapmayan dişler ve ilgili pah miktarları da hesaba katılmalıdır.

2.17.4. Kimyasal kilitleyici (vida gevşemezlik) elemanlar

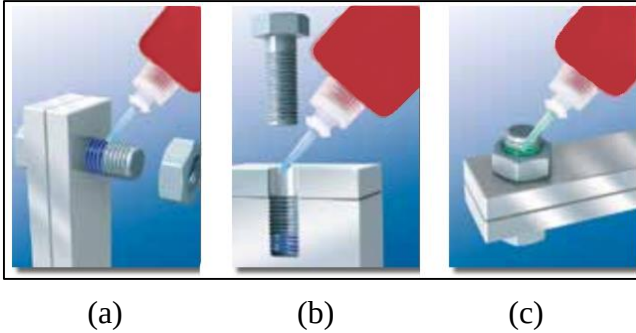
Mekanik bağlantı elemanları ile montaj yapabilmek için cıvata ile somun dişleri veya cıvata ile parça üzerindeki dişler arasında belirli bir miktar toleransta boşluk olması gerekmektedir. Bu boşluk, ana parça titreşime uğradığında bağlantı elemanların hareket etmesine imkân tanımaktadır. Sadece titreşim değil genleşme ve büzülme de parçaların hareket etmesine olanak tanımaktadır. Bağlantı elemanlarının hareketi sonucu cıvatanın gevşemesine ve en sonunda sökülmesine neden olmaktadır. Bağlantı elemanlarının arasındaki veya ana parça

ile arasındaki dişlerde oluşan boşluk, mekanik kilitleme elemanları ile giderilememektedir. Şekil 2.28 ile boşluk temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.28. Dişli arayüzleri arasındaki boşluk [62]

Bu boşluğu ortadan kaldırmanın en basit yolu kimyasal kilitleyicilerin kullanılmasıdır. Kimyasal kilitleyiciler, dişler arasındaki boşluğu tamamen doldurarak hava yokluğunda iki metal yüzey arasında sert bir termoset plastiğe dönüşmektedirler. Böylece montajlı birimin tek bir yapı haline gelmesini sağlayarak cıvatanın gevşemesini engellemektedirler. Şekil 2.29 kimyasal kilitleme elemanı uygulaması örneklerini göstermektedir.



Şekil 2.29. (a) Vida yuvası, (b) kör delik, (c) montaj sonrası [62]

Bir kimyasal kilitleyici seçerken göz önüne alınması gereken birçok faktör vardır, ancak en önemli koşul, istenen mukavemet değeridir. Vida gevşemezlik genel olarak üç farklı sınıfa içermektedir. Bu sınıflar düşük mukavemet, orta mukavemet ve yüksek mukavemet olarak ayrılmaktadır. Düşük mukavemet kimyasal kilitleyici sınıfı aletleri kullanarak kolay sökme imkânı tanıyan vida gevşemezlik ürünleridir. Sık sökülen elemanlarda kullanılmaktadırlar. Orta mukavemet sınıfı standart el aletleri ile bağlantı elemanlarını sökme olanağı tanımaktadır. Genel amaçlı, orta mukavemetli, diş açılmış herhangi bir bağlayıcı için kilitleyici olarak kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet sınıfı kimyasal kilitleyiciler ise genellikle tekrar sökülmesi gerekmeyen mekanik bağlayıcıların kilitlenmesi için kullanılan

çok kuvvetli diş kilitleyicilerdir. Bu sınıfı standart aletlerle sökmek zordur. Sökülebilmesi için parçanınbölgesel olarak ısıtılması ($>250^{\circ}\text{C}$) vebölge sıcakken bağlantı elemanını sökmek gerekmektedir.

2.17.5. Korozyon

Korozyon kelimesinin kökeni, kemirmek anlamına gelen Latince "corrodere" kelimesine dayanmaktadır [63]. Metal malzemelerin bulunduğu ortama bağlı olarak zaman içerisinde istenmeyen ve oldukça tahrip edici bir elektrokimyasal reaksiyona maruz kalmasına korozyon adı verilmektedir. Korozyon malzemenin özelliklerinde değişikliklere yol açmaktadır ve genellikle yüzeyden başlamaktadır. Tanımlamalara göre korozyon terimi bir süreci ifade etmektedir.

Korozyonun farklı nedenleri, mekanizmaları ve korozyon saldırısı görünümü dikkate alınarak, korozyon türleri arasında ayırım yapılabilmektedir. Korozyon türleri arasında genel korozyon, galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu, taneler arası korozyon, stres korozyon çatlağı, korozyon yorulması ve erozyon korozyonu bulunmaktadır.

Çizelge 2.21. Genel korozyon tipleri ve açıklamaları

Korozyon Tipi	Açıklama
Genel Korozyon	Genel korozyonu diğer türlerden ayıran özellik, korozif ortama maruz kalan metalin tüm yüzeyinde yaklaşık aynı hızda ilerlemesi ve homojen dağılmasıdır [63]. Bu nedenle metal kalınlığı da her yerde neredeyse aynı miktarda incelmektedir. En yaygın görülen korozyon türü olarak anılmaktadır ve neden olduğu metal kaybı diğer korozyon türlerine göre daha fazla olmaktadır.
Galvanik Korozyon	Aynı elektrolite elektriksel olarak bağlı olan iki farklı metal veya alaşım arasında meydana gelen elektrokimyasal olaydır. Elektrokimyasal tepkimelerde bir metalden diğer metale doğru elektron akışının oluşabilmesi için metaller arasında potansiyel fark olması gerekmektedir. Birbiriyle temas halinde olan ve elektriksel olarak birisi anot (-) birisi katot (+) olarak davranan metal veya alaşım arasında bu etkileşim gerçekleşmektedir. Ortamdaki malzemelerden anot olarak davranan malzeme korozyona uğramaktadır.
Çukurcuk Korozyonu	Daha çok alüminyum ve magnezyum alaşımlarında sıkça görülmektedir. Korozyon etkilerinin belirli bölgelerde yoğunlaşması sonucunda malzeme üzerinde küçük deliklerin veya çukurcukların oluşması olayıdır. Genelleme yapılırsa metal malzeme üzerindeki koruyucu film kaplamanın delinmesi sonucu oluşmaktadır. Çukurcuk korozyonu, korozyon türlerinin en tehlikeli biçimlerinden biridir. Metal üzerinde sadece küçük bir ağırlık kaybı oluştururken, delinerek birim arızasına sebep olabilmektedir. Ayrıca, çukurcuklar genellikle çok küçüktür ve tespit edilmezler [64].

Çizelge 2.21. (Devam) Genel korozyon tipleri ve açıklamaları

Korozyon Tipi	Açıklama
Taneler Arası Korozyon	Metal veya alaşımların tane sınırlarında veya bu bölgelere yakın alanlarda yoğunlaşması sonucunda oluşmaktadır. Korozyonun etkili olduğu alanlarda mekanik dayanım sıfıra kadar ineilmektedir. Bazı metallerde ısıtılma işlemi veya kaynak sonucunda ısıdan etkilenen bölgeler oluşturmak, metali ısıtmak veya yüksek sıcaklıklarda kullanmak tane sınır bölgelerinde korozyona sebep olabilmektedir.
Stres Korozyon Çatlağı	Bir metalin aynı anda hem strese hemde korozyon oluşturan bir ortama maruz kalması ile oluşmaktadır. Dolayısıyla stres ve korozif ortamın bileşkesinin bir sonucudur.
Korozyon Yorulması	Malzemenin yorulma direncinde korozyona bağlı olarak düşüş yaşanması olayı olarak adlandırılmaktadır. Korozyon yorgunluğu, yorulmanın ve korozif ortamın bileşkesi altındaki malzemelerde hem başlatma hem de yayılma dâhil olmak üzere çatlama olgusunu tanımlamak için kullanılmaktadır.
Erozyon Korozyonu	Akış halinde olan bir korozif özellikteki bir sıvının, metal yüzey ile teması durumunda gerçekleşmektedir. Akışkan içerisinde bulunan parçacıklar yüzey aşınması yarattığından korozyonun da daha hızlı bir şekilde ilerlemesine neden olmaktadır.

Çeşidi hangisi olursa olsun korozyonun tamamen engellenmesi mümkün olmamaktadır. Tasarım yapısı, tasarlanan ve üretilen ürünün kullanım ortamında maruz kalacağı koşullar, malzemelerinin kullanım süresi, malzemelerin depolama ortamları ve koşulları gibi etkenler malzemede oluşabilecek korozyonun ilerleme hızını ve büyüklüğünü etkilemektedir. Tamamen engellenemese de gelişim hızını artıran etkenlerde değişimlerin yapılması ile korozyon ilerleme hızı önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Tasarım süreci, korozyon süreci kontrolünde ilk ve belkide en önemli adımdır. Genellikle insan hatasıyla da birleşen hesaba katılmayan ince tasarımsal ayrıntılar, korozyonu hızlandırıp sistem başarısızlıklarına sebep olmaktadır. Bu nedenle erken bozulmaya yol açabilecek tasarım detaylarının henüz tasarım aşamasında farkında olmak oldukça önemli hale gelmektedir. Tasarım önlemleri arasında oldukça önemli bir yer tutan husus, malzeme seçimidir. Seçilen malzemelerin ısıtılma işlemi, kaplama veya imalat süreci gibi korozyon ile ilişkisinin bilinerek kullanılacağı ortama göre seçilmesi büyük tasarruf sağlayabilmektedir. Malzeme yeterince korozyona dayanıklı değilse, kullanıldığı ortama ve koşullara bağlı olarak erken arızalanmaya ve sistemlerin çalışmamasına neden olabilmektedir. Öte yandan, gereksiz derecede yüksek korozyon direncine sahip bir malzeme, genellikle normal bir malzemedan daha pahalı olmaktadır. Bu nedenle, malzeme seçiminin zorluğu, mümkün olan en düşük maliyetle yeterli performans elde etmektir [64].

Tasarımlarda genellikle farklı elektrokimyasal potansiyellere sahip olan ve benzeşmeyen metallerin birarada kullanılması, bağlantı elemanlarının kullanılması, çukurların ve oyukların olması, aynı kodlara sahip iki alaşımin üretim veya üretici sebebiyle farklı içeriklere sahip olması ve bu alaşımların hammadde olarak kullanılması genellikle korozyona neden olmaktadır. Bu korozyonlar genel olarak birbirine temas halinde olan yüzeyler arası bölgelerde, kaynak ve bağlantı elemanlarının gerilim oluşturduğu bölgelerde uygun olmayan su giderlerinde, sıvı akışı olan bölgelerinde, hareketli parçaların arasındaki bölgelerde, parçaların dış dünyaya bakan yüzeylerinde veya temizlenemeyen bölgelerde oluşabilmektedir.

Malzemelerin depolanmasında ve taşınmasında da korozyon meydana gelebilmektedir. Özellikle nemli, yağışlı veya deniz ortamında saklanması ya da depolanması esnasında malzeme üzerinde korozyon oluştuğu belirlenmiştir. Bunların yanı sıra imalat kalitesi, üretim esnasında içine karışmış yabancı maddeler, yüzey hataları, birleşim noktalarındaki hatalar da korozyon ilerleme hızını arttırmaktadır.

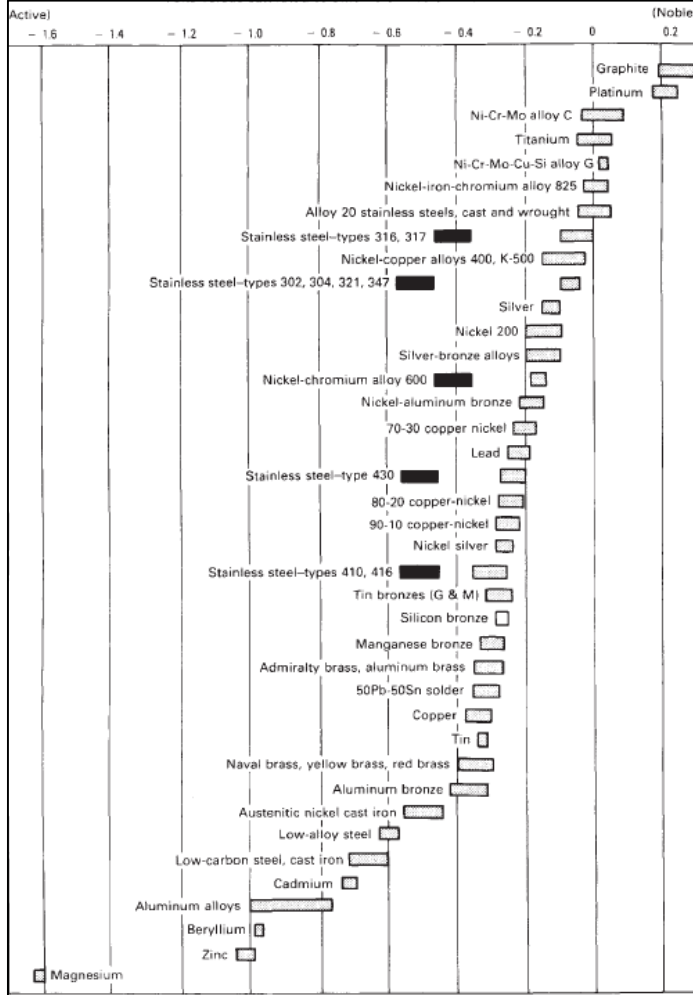
Malzemelerin yükselen veya azalan korozyon potansiyeline göre düzenlendiği listeye galvanik seri adı verilmektedir. Galvanik serilerde aralarında elektrokimyasal potansiyel farka (genellikle 0.2V) sahip metaller benzeşmeyen metaller olarak adlandırılmaktadır. Benzeşmeyen metaller, aralarında iyon alışverişine imkân tanıyan tuzlu su, deniz suyu veya yoğunlaşmış nem gibi bir ortamda bulunduklarında galvanik akım adı verilen bir akım birinden diğerine akmaktadır. Bu durum galvanik korozyon oluşumuna neden olmaktadır. Böylesi bir durum, montajlanan elemanlardan birinin katot diğerinin ise anot olarak davranması ile başlayıp anot metalin korozyona uğraması ile sonuçlanmaktadır. Önlem alınmadan benzeşmeyen metallerin bir arada kullanılması galvanik korozyona davet çıkarmaktadır. Çizelge 2.22’de galvanik çiftler olarak adlandırılan malzemeler listelenmiştir. Oklar ile birbirine bağlanmış metal çiftleri bir arada kullanılmasına izin verilen metallerdir. İzin verilen malzemelerin bir arada kullanılması, galvanik korozyonda ilerleme hızını düşürmektedir. Çizelge de “●” ile verilen simgeler anodik yani korozyon bakımından aktif olan seri elemanını “○” ile verilmiş simgeler ise katodik yani aktif olmayan daha soy olan ögeyi belirtmektedir.

Çizelge 2.22. Galvanik çiftler [65]

Grup	Metalurjik Kategori	EMF (Volt)	Uygun Çiftler
1	Altın, Altın kaplama, Altın-platin alaşımları, Platin (işlenmiş).	+ 0,15	○
2	Rodyum, Grafit	+0,05	● ○
3	Gümüş, Gümüş Kaplama, Yüksek gümüş alaşımları	0	● ○
4	Nikel, Nikel kaplama, Nikel-bakır alaşımları, Titanyum	-0,15	● ○
5	Bakır, Bakır kaplama, Düşük pirinçler ve bronzlar, gümüş lehim, Yüksek bakır-nikel alaşımları, Nikel-krom alaşımları, Östenitik paslanmaz çelikler (301, 302, 304, 306, 316, 321, 347)	-0,20	● ○
6	Ticari sarı pirinçler ve bronzlar	-0,25	● ○
7	Yüksek pirinçler ve bronzlar; Naval pirinç; Muntz metali,	-0,30	● ○
8	%18 kromlu paslanmaz çelikler (440-430, 431, 446, 17-7PH, 17-4PH)	-0,35	● ○
9	Krom kaplama, Kalay kaplama, %12 kromlu paslanmaz çelikler (410, 416, 420)	-0,45	○ ●
10	Kalay-krom kaplanmış çelik (terneplate), kalay-kurşun lehimleri	-0,50	● ○
11	Kurşun-kurşun kaplama, kurşun yüzdesi yüksek alaşımlar	-0,55	● ○
12	Alüminyum (2014, 2024, 2017)	-0,60	● ○
13	Demir (işlenmiş, gri ya da işlenebilir); Karbon çeliği (düşük alaşım çeliği); Armco demir (%99,8 safıkta demir)	-0,70	● ○
14	Alüminyum (6061, 7075, 5052, 5056, 1100, 3003); Alüminyum (ana alaşım malzemesi silikon olan döküm alaşımları 355, 356)	-0,75	● ○
15	Alüminyum (ana alaşım malzemesi silikon olmayan tüm döküm alaşımları); Kadmiyum, Kromat dönüşümlü kadmiyum	-0,80	● ○
16	Galvanize (sıcak daldırma çinko kaplama) çelik	-1,05	● ○
17	Çinko (işlenmiş); Çinko esaslı döküm alaşımları	-1,10	●
18	Magnezyum ve magnezyum esaslı alaşımlar	-1,60	●

Belirli bir elektrolit ortam için, birkaç malzemenin korozyon potansiyeli birlikte listelenebilmektedir. Şekil 2.30 deniz suyuna maruz kalacak metal ve alaşımlarının

aktifliklerinin ve birbirleriyle olan galvanik uyumlarını öngörebilmek için kullanılması gereken galvanik seriler görülmektedir.



Şekil 2.30. Metal ve alaşımlarının akan deniz suyu içindeki potansiyelleri [64]

Bir metal ne kadar aktifse diğer bir deyişle iyonik olma isteği ne kadar yüksekse, metali aşındırması da o kadar kolay olmaktadır. Genelde Şekil 2.30’de verilen listedeki birbirine yakın metallerin birbirleri üzerinde güçlü bir etkisi olmadığı ve metallerin arasındaki mesafe arttıkça korozyon hızının arttığı kabul edilir. Teorik olarak galvanik korozyonun önlenmesi, bir montajda benzeşmeyen metallerin kullanımından kaçınarak, farklı metalleri bir yalıtım malzemesi ile elektriksel olarak ayırarak veya ortamı su geçirmez bir kaplama ile metal yüzeyden fiziksel olarak izole ederek sağlanabilir. Ancak gerçekte, farklı metallerin sıklıkla doğrudan temas halinde kullanılması ve aşındırıcı bir ortama maruz bırakılması gerektiğinden ve kesinlikle geçirimsiz kaplama olmadığından tam önleme genellikle pratik

değildir. Bu nedenle, galvanik korozyon olasılığını ve kapsamını en aza indirecek önlemler uygulanmalıdır [66].

Tasarımlarda veya malzemelerde meydana gelen korozyon sorunları, malzeme üzerine yapılan çeşitli koruma yöntemleri ile de önlenebilmekte veya korozyon hızı azaltılabilmektedir. Örneğin metalin pasif hale gelmesi için elektrot potansiyelini kontrol etmek, yani katodik veya anodik koruma uygulamak, çevreye eklenen korozyon inhibitörleri yardımıyla korozyon oranını düşürmek veya organik ya da inorganik bir koruyucu kaplama uygulamak korozyon ile mücadelede uygulanan methodlardır.

Katodik koruma, özellikle deniz ortamlarında kullanılan malzemelerde tercih edilen, elektrokimyasal korozyon teorisine dayanan bir korozyondan koruma yöntemidir. Katodik korumada; korozyondan korunması istenen metalin, galvanik korozyon çiftinin katodu yapılması ile korunma sağlanmaktadır. Bu yöntem, korunacak metalden daha aktif bir metalle (galvanik anot veya kurban anot) eşleştirilerek elde edilebilmektedir.

Anodik koruma işlemi, anodik akımın uygulanmasıyla metal yüzeyin pasifleştirilmesine dayanmaktadır. Bu nedenle bu işlem yalnızca pasifleştirme özelliği bulunan metallere uygulanabilmektedir. Ancak çok az sayıda metalin pasifleştirilme özelliği bulunmaktadır. Bu tür bir korozyon koruması, pratikte, demirin pasivasyon özelliklerine sahip olan krom ile alaşımlandığı paslanmaz çeliğe uygulanmaktadır. Anodik koruma ayrıca, titanyumda ve karbon çeliğinde belirli uygulamalarda da kullanılmaktadır [63].

Korozyon önleyiciler, mevcut koroziyon türlerin yoğunluklarını önemli ölçüde değiştirmeden, koroziyon ortamına uygun bir yoğunlukta eklendiğinde korozyon oranını ve hızını azaltan maddelerdir. Bir inhibitörün etkisi genellikle metal yüzey üzerinde koruyucu bir film oluşturmaktır. İnhibitörler, korozyon sürecinde hangi reaksiyonun engellendiğine göre anodik, katodik ve karışık tiplere ayrılmaktadır [63]. Korozyona karşı dirençli fakat pahalı malzemeler kullanmak yerine bazen ortama inhibitör katılmasıyla daha ucuz malzemeler de kullanılmaktadır.

Koruyucu kaplamalar genel olarak metallere uygulanan ve koruyucu özellikte olan yüzey işlemlerinin adıdır. Genel olarak, dönüşüm kaplamaları (kimyasal film veya anodik film), metalik kaplamalar ve organik kaplamalar olarak üç temel gruba ayrılmaktadırlar.

Metalik kaplamalar malzeme üzerinin ince metal ile kaplanmasıdır ve korozyon korunmasında önemli ölçüde kullanılmaktadır. Kaplama metalinin ana metalden daha fazla veya daha az soylu olmasına göre karakterize edilen temelde iki tip vardır. Kaplama metali, alt tabaka metalinden daha soylu olduğunda, alt tabakanın örtüldüğü gözeneklerde, kesilmiş kenarlarda vb. korozyon hızlanır. Kaplama eğer koruma sağlayacaksa gözeneksiz olmalıdır. Öte yandan, alt tabaka metalinden daha az soylu olan bir kaplama, katodik koruma sağladığından koruma sağlamak için gözeneksiz olması gerekmez. Bu durumda kaplama, elektrolitin iletkenliği ne kadar yüksek olursa o kadar iyi çalışmaktadır [67].

Kimyasal dönüştürme kaplamalarının işlemlerinde metal, işlem maddesiyle reaksiyona girmekte ve böylece metal yüzey üzerinde ince, zor çözünür bir kaplama oluşturmaktadır. Kimyasal dönüşüm işleminin örnekleri fosfatlama ve kromatlamadır. Fosfatlama çoğunlukla çelikte kullanılmaktadır. Tek başına fosfat kaplamalar sadece hafif bir korozyon koruması sağlamaktadır. Ancak fosfat kaplama ardından yağ emdirme ile birlikte iyi koruma elde edilmektedir. Mangan fosfat, aşınmaya karşı korumaktadır. Çinko fosfat, korozyon dayanımını artırmaktadır. Mangan ve/veya çinko fosfat, yağlayıcı görevi görmektedir. Kromatlama ise çinko, alüminyum, magnezyum ve pirinçte kullanılmaktadır. Kromatlama ayrıca alüminyum üzerinde, boyamaya hazırlık olarak ve dekoratif bir korozyon koruması olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Sarı kromatlama genellikle boya kaplamalarının alüminyum yüzeylere yapışmasını iyileştirmektedir.

2.17.6. Metalik kaplamalar

Malzemelerin koruyucu kaplamalarla korozyondan korunması en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Metalik kaplamalar, uygulandıkları yüzeyin elektrokimyasal yapısını değiştirerek korozyona karşı etkin bir bariyer tabakası oluşturmaktadır. Kaplamalar ortamdaki neme, çözünmüş gazlara, asitlere ve diğerlerine karşı koruma sağlamaktadır. Ayrıca kaplama uygulaması, iç ve dış bozulmaya karşı dirence ek olarak termal ve elektriksel yalıtımda sağlayabilmektedir. Soy metallerin ve korozyon dayanımlı sayılan metallerin üzerine kullanım alanlarına göre kaplama yapılmasına genellikle gerek görülmemektedir. Bu metallerin yüzeylerinin temiz tutulması genellikle yeterli olmaktadır. Metal kaplama tipinin seçimi ve kaplama uygulama yöntemi, malzemenin kullanım şartları için gerekli özelliklere bağlıdır.

Kimyasal dönüşüm kaplamaları

Kimyasal dönüşüm kaplamaları, kimyasal ya da elektrokimyasal yolla uygulanarak metallerin yüzeylerinin kaplamaya dönüştürülmesi olarak adlandırılmaktadır. Dönüşüm kaplamaları korozyona direnci arttırabilmekte, boya işlemi için ön hazırlık oluşturabilmekte ve uygulandığı yüzeylere elektriksel iletkenlik sağlayabilmektedirler. Bu bölümde alüminyum ve alaşımları, çelik ve paslanmaz çeliklere ait dönüşüm kaplamaları anlatılmaktadır.

Alaşımlı çeliklere uygulanan dönüşüm kaplamaları

Alaşımlı çeliklere uygulanan kimyasal dönüşüm kaplamaları fosfatlama olarak adlandırılmaktadır. Metal yüzeylerde boyanın yapışabilmesi ve yüzeylerin korozyona yatkınlığının pasifleştirilmesi diğer bir deyişle azaltılması için uygulanmaktadır. Elektriksel iletkenliği yoktur. Genel uygulama kalınlığı 5 ile 10 mikrometre aralığındadır. Ancak kaplama ile tek başına fark yaratacak bir korozyon direnci sağlanamamaktadır. Çeliklere uygulanan fosfatlama, DOD-P-16232 ve TT-C-490 standartlarına uygun olacak şekilde kaplama yapılmaktadır [67].

Paslanmaz çeliklere uygulanan dönüşüm kaplamaları

Paslanmaz çelik yüzeyleri üzerine uygulanan ve siyah oksit olarak adlandırılan kromat kaplamasıdır. MIL-C-13924 standardına göre sınıf 1, sınıf 2, sınıf 3, sınıf 4 olmak üzere toplam 4 alt sınıfı bulunmaktadır. Bu kaplama genellikle dekoratif özelliklidir. Bunun yanı sıra kapalı alanlarda kullanımında çevre koşullarına dayanım göstermektedir. Kaplama sonrası ölçü değişikliği oluşmamaktadır. Sınıf 1 kaplama dökme demir, karbon çeliği ve düşük alaşımlı çeliklere, sınıf 2 kaplama korozyona dayanıklı çeliklere, sınıf 3 kaplama 480 °C'nin üzerinde meneviş ısı işlemi görmüş çeliklere ve sınıf 4 kaplama ise 3xx grubu çeliklere uygulanmaktadır [67].

Alüminyuma uygulanan dönüşüm kaplaması

Alüminyuma uygulanan dönüşüm kaplaması en yaygın adlandırması ile “alodin” olarak isimlendirilir. Bunun dışında kimyasal film, sarı iridit veya iridit olarak da anılmaktadır.

Alodin kaplama boya öncesi yüzey hazırlığı sağlamaktadır. Yaş ve toz boya alodin kaplama sonrası uygulanabilir. Alüminyum korozyon dayanımı sağlar ve elektriksel olarak iletken. Doğrudan alüminyum yüzeye akımsız daldırma yöntemi ile uygulanmaktadır. Genel olarak aşınma direnci düşüktür. Kaynak ve yapıştırma işlemlerinden sonra uygulanmalıdır. Alodin işlemi, askeri uygulamalar için MIL-DTL-5541/MIL-C-5541 standardına göre yapılmaktadır. Kplama rengi alaşıma göre değişmektedir. Altın rengi veya sarı renk alüminyumda, mat altın rengi çinko veya kadmiyumda, kahverengi veya siyah ise magnezyumda oluşmaktadır. Alodin kaplamaları MIL-DTL-5541 standardına göre tip I krom içeren ve tip II krom içermeyen tiplere sahiptir. Alodin kaplama sınıfları sınıf 1A ve sınıf 3 olarak sınıflandırılmaktadırlar. Sınıf 1A kaplama, sarı renktedir ve korozyona dayanımı en yüksek olan sınıftır. Bütün alüminyum alaşımlarına uygulanabilmektedir. Kapalı alan kullanımlarında boya gerektirmemektedir. Tasarımların ölçü toleranslarını etkilememektedir. Sınıf 3 kaplama renksizdir ve elektriksel iletkenliği yüksektir. Sınıf 1A'ya göre daha ince olduğundan korozyon direnci daha düşüktür. Bütün alüminyum alaşımlarına uygulanabilmektedir [67]. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Sınıf 1A'nın korozyon dayanımı 100 birim kabul edilirse Sınıf 2'nin 95 birimidir. Sınıf 2'nin elektriksel iletkenliği 100 birim kabul edilirse, Sınıf 1'in 95 birimidir.

Eloksal kaplama

Eloksal kaplama işlemi genel anlamıyla, metal yüzeyin elektrik ile oksitlenmesini ifade etmektedir. Anodizasyon, anodize, anodik oksidasyon gibi farklı isimlendirilmeleri de mevcuttur. Eloksal kaplama alüminyum yüzeylere uygulanan en önemli yüzey işlemlerinden bir tanesidir. Alüminyum yüzey üzerinin elektrokimyasal işlemlerle oksit tabakasıyla kaplanmasıyla oluşturulmaktadır. Oksit tabakası kromik asit, sülfirik asit veya fosforik asitle oluşturulmaktadır. Alüminyumun korozyon korumasını sağlar ve malzeme özelliklerini değiştirmeden, yüzeylere aşınma direnci oluşturmaktadır. Kplama gözenekli yapıda olduğundan aynı zamanda astar ve boya için de tutucu özelliğindedir. Elektriksel olarak yalıtkan olduğu kabul edilir bu nedenle elektriksel iletkenlik istenen uygulamalarda kullanılmamaktadır. Alüminyum parçanın tüm yüzeylerine uygulanabilmektedir. Farklı kalınlıklarda yüzey uygulaması gerçekleştirilebilmektedir. Eloksal kaplama genel anlamıyla ısı iletkenliği arttırmaktadır. Alüminyum yüzeylere yapıştırma işlemi uygulanacaksa, eloksal kaplama ile yapıştırma performansını arttırmaktadır. Ayrıca kaplama yapılan alüminyum yüzey parlak ise kaplama parlak, mat ise kaplama mat çıkmaktadır [67].

Eloksal işlemi MIL-A-8625 standardına uygun şekilde yapılmalıdır. Bu standarda göre eloksallı kaplamanın birden çok tip ve sınıfı bulunmaktadır. Tipler, oksit tabakasının oluşturulma yöntemine bağlı olarak değişmektedir ve bu değişiklikler uygulama kalınlığı, gözenek durumu veya sertlik gibi malzeme performansında da farklılıklar oluşturmaktadır. Standarda uygun olarak toplam altı tip eloksallı kaplama uygulaması bulunmaktadır ve tüm tiplere hitap eden boyalı ve boyasız olmak üzere iki sınıf ile uygulanmaktadır. MIL-A-8625'e göre belirlenen tipler sırasıyla I, IB, IC, II, IIB ve III şeklindedir.

Tip I ve IB kromik asit banyosunda gerçekleştirilen kaplama çeşitleridir ve sınıf 1 veya sınıf 2 ile boyalı veya boyasız şekilde uygulanmaktadır. Kaplama görüntüsü opaktır. Bütün alüminyum alaşımlarına uygulanabilmektedir. Ancak IB döküm alüminyum malzemelerde çukurcuk korozyonu oluşturmaktadır. Yumuşak bir kaplama çeşididir bu nedenle kolaylıkla hasar alabilmektedir. Genellikle bu tip kaplama sonrasında astar veya boya yapılması önerilmektedir. Isıl işlemler sonrasında uygulanması gerekmektedir. Sınıf 1'e göre eloksallı işlemi sonrası boya yapılmaz. Sınıf 2'ye göre ise, eloksallı işlemi sonrası boya uygulanmaktadır.

Tip II, IIB ve III sülfirik asit banyosuna gerçekleştirilen kaplama çeşitleridir ve sınıf 1 veya sınıf 2 ile boyalı veya boyasız şekilde uygulanmaktadır. Tüm eloksallı kaplamalarda olduğu gibi elektriksel olarak yalıtandır. Tip I ve IB'ye göre uygulama kalınlığı daha fazladır ve daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Tip III, sert eloksallı kaplama uygulaması için tercih edilmektedir. Yüzey sertliği alaşımda bağlı olarak yaklaşık 500 HV civarında çıkmaktadır. Kaplama sertliği ise 45-65 HRc aralığındadır. Sınıf 1'e göre eloksallı işlemi sonrası boya yapılmamaktadır. Sınıf 2'ye göre ise, eloksallı işlemi sonrası boya uygulanmaktadır.

Karşılaştırma (kimyasal dönüşüm, alodin-eloksallı)

Eloksallı kaplama korozyon direnci alodin kaplama direncine göre daha iyidir. İfade edebilmek için, eloksallı korozyon direnci mükemmel seviyede ise alodin orta seviyededir. Eloksallı kaplama elektriksel yalıtandır. Alodin elektriksel iletkenidir. Bu nedenle elektriksel iletkenliği dikkate alarak seçim yapmak oldukça kritiktir. Eloksallı kaplama, alodinden daha kalın bir kaplamadır. Mekanik ölçülendirme esnasında kaplama kalınlığı da göz önüne alınmalıdır.

Pasivasyon

Pasivasyon, paslanmaz çeliklere uygulanan, metal yüzeylerdeki serbest halde bulunan demir veya kurşun elementlerini yüzeyden ayırmak için metal yüzeyine uygulanan kimyasal işlemin adıdır. Anodik koruma işlemine benzese de pasivasyonun amacı aktif yüzeylerin pasif ya da daha az aktif hale getirilmesidir. Metal yüzeyleri korozyon oluşumuna karşı korumaktadır. Paslanmaz çeliklerin pasivasyonu, metal yüzey üzerindeki demir ya da demir bileşiklerinin yüzeyden metal yüzeye zarar vermeden ayrılmasının sağlanmasıdır. Yöntem, akımsız daldırma yöntemiyle uygulanmaktadır. Paslanmaz çelikler, ASTM A967-01 veya SAE-AMS-QQ-P-35 standardına uygun şekilde pasive edilmelidir. Standard içerisinde çeşitli methodlar bulunmaktadır. Metod 1, nitrik asitli banyo ve metod 2, sitrik asitli banyo olarak uygulanmaktadır. İki metod altındaki sınıflar, banyo sıcaklık ve konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Mekanik imalat sonrasında (talaşlı imalat) malzeme üzerinde kalan metal artıkların uzaklaştırılması amacıyla mekanik imalat yapılan tüm paslanmaz çelik malzemelere mutlaka uygulanmalıdır. Pasivasyon işlemi, boya uygulaması için tercih edilmemektedir. Çeşitli metalik kaplamalar ve açıklamaları Çizelge 2.23 ile verilmiştir.

Çizelge 2.23. Metalik kaplama açıklamaları

Kaplama	Açıklama
Kadmiyum Kaplama	Kadmiyum kaplama çelik üzerine, titanyum üzerine ve titanyum-çelik alaşımları üzerine yapılabilir. Kadmiyum çelik üzerine kaplanıyorsa çeliklere korozyon direnci sağlar ancak sağlık ve çevre koşullarını sağlamadığından bu kaplama türünün kullanımı sakıncalı görüldüğünden tercih edilmemekte veya en az sınırdaki tutulmaktadır. Çelikler için QQ-P-416 standardına uygun şekilde yapılır.
Bakır Kaplama	Bakır yumuşak olmasına rağmen dekoratif işlevinin yanı sıra birçok mühendislik uygulamasına da sahiptir. Böyle bir uygulama, çeliğin korozyona karşı korunmasıdır. Bakır çok asil olduğu için, çelik ve alüminyum yüzeylerde aşırı galvanik kaynaklı yerel korozyona neden olmaktadır. [67]. Askeri tasarımlar için yapılacak olan bakır kaplama, MIL-C-14550 standardına uygun olmalıdır.
Bakıra Uygulanan Kaplamalar	Bakır üzerindeki diğer metalik kaplamalarda küçük deliklerde veya gözeneklilikte meydana gelen bakır oksit korozyon ürünleri, bakır ve üst metalik kaplama arasında bir nikel tabakasının araya girmesi ile engellenebilmektedir.
Altın Kaplama	Altın elektrodpozitler, öncelikle bakır konektörleri ve diğer bakır bileşenleri korozyondan korumak için elektronik uygulamalarda bakırı kaplamak için kullanılmaktadır. Altının maliyeti nedeniyle minimum altın kalınlığı ile korozyon korumasının elde edilmesi istenmektedir [67]. Askeri tasarımlar için yapılacak olan altın kaplama, MIL-G-45204 standardına uygun şekilde yapılmalıdır.

Çizelge 2.23. (Devam) Metalik kaplama açıklamaları

Kaplama	Açıklama
Nikel Kaplama	Üç tür nikel kaplama bulunmaktadır, bunlar parlak, yarı parlak ve donuk parlaktır. Kaplamalar arasındaki fark, içlerinde bulunan kükürt miktarındadır. Kükürt içeriği arttıkça, bir nikel yatağının korozyon potansiyeli daha negatif hale gelir. Parlak bir nikel kaplama, yarı parlak veya donuk nikel kaplamadan daha az koruyucudur. Parlak nikel ve yarı parlak nikel yataklarının potansiyelindeki fark 50 mV'den fazladır. Nikel kaplamalar elektrik ile veya elektriksiz kaplanabilmektedir. Bu şekilde kaplama özellikleri de değişmektedir. Elektrikle kaplama yapılıyorsa, sertliği 300 ile 500 HV arasında çıkmaktadır. 426°C üzerinde kullanılamamaktadır. QQ-N-290 standardına göre akımla kaplanmalıdır. Elektriksiz nikel kaplama yönteminde, MIL-C-26074 standardına göre kaplama yapılmalıdır. Bu şekilde kaplama yöntemi ile sertliği 450-900 HV seviyesine çıkmaktadır ve 500°C üzerinde kullanılamamaktadır [67].
Krom Kaplama	Mühendislik krom tabakaları doğrudan çeşitli metaller üzerine çöktürülür. Bu katmanların uygulanmasının amacı, yüksek sertlikte aşınmaya dayanıklı bir yüzey elde etmek veya orijinal boyutlarını bir iş parçasına geri vermektir. Krom kaplamanın elektrik iletkenliği düşüktür fakat çok sert yüzey gereksinimi gerektiğinde elektrik iletken olarak da kullanılabilmektedir. Oldukça yüksek maliyetli bir işlemdir. Kararma ve oksitlenmeye karşı dirençlidir. Askeri uygulamalarda krom kaplama yöntemi QQ-C-320'ye veya MIL-STD-1501'e uygun olmalıdır. Aşınma içeren veya sertlik gerektiren uygulamalar için kullanılmalı ve korozyonu önlemek için kullanılmamalıdır. Korozyon direnci için kullanılması gerektiğinde kaplama sonrası nikel kaplama yapılabilir. Krom kaplamanın kaplama sertliği yaklaşık 55 HRC'dir ve bu kaplama 535°C üzerinde kullanılamamaktadır.
Kalay Kaplama	Kalay korozyon dirençli bir malzemedir. Böylece kaplandığı metalin korozyon direncini de arttırmaktadır. Magnezyum ve alüminyum ile aynı galvanik çift aralığında olmamasına rağmen magnezyum ve alüminyum kaplanması da kullanılmaktadır. 343°C üzerinde kullanılamamaktadır. Kalay kaplama uygulamaları, MIL-T-10727 standardına göre sıcak daldırma veya elektro-çökeltme ile uygulanmalıdır.
Gümüş Kaplama	Gümüş kaplamanın elektrik direnci oldukça düşüktür ancak yumuşak lehim özelliği iyidir. Bu nedenle elektrik iletkenliği gerektiren lehim uygulamalarında kullanılabilmektedir. Atmosferik çevre şartlarında kararma yapmaktadır. Kararmayı önlemek için MIL-R-46085 standardına uygun şekilde rodyum ile fazladan kaplanabilmektedir. Aşınma ve soğuk kaynak direnci iyidir. Tüm metallere karşı anodik özelliktedir. Gümüş kaplama işlemi QQ-S-365 standardına uygun şekilde olmalıdır. 650°C üzerinde kullanılamamaktadır [67]. Bunlara ek olarak gümüş göçü olayına da dikkat edilmesi gerekmektedir. Gümüş göçü, nemli ortamlarda devredeki bir iletkenin farklı potansiyelde olan başka bir iletkenle gümüş atomlarının seramik veya plastik bir yalıtkan içerisinden geçerek yaptığı harekettir.
Galvanizleme	Galvanizleme, demir veya çelik malzemelerin çinko demir-çinko bileşiğiyle kaplanmasıdır. Genel anlamıyla ergiyik çinko banyosunda sıcak daldırma yöntemiyle yapıldığı işlemdir. ASTM A193 ve ASTM A386 standartlarına uygun olacak şekilde yapılmalıdır. Galvanizli yapılar, 168 saatlik tuz testinde sınırlı dayanım sağlamaları da endüstriyel uygulamalar ve ortamlarda 20 yıla kadar dayanım gösterebilmektedirler. Galvaniz işlemi çeliklerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çeliklerin atmosfere açık yüzeylerinin çinko ile katodik korunma sağlanmasıyla korozyondan korunması sağlanmaktadır [67].

2.17.7. Boya gereksinimleri

Boylar, bir alt tabakasına uygulanan kaplamayı korumak ve güçlü bir üst yüzey oluşturmak için oksijen ile reaksiyona giren reçineler ve pigmentler içeren yağlardır. Boya sistemleri genellikle astarlar ve son katlar olarak iki ana grupta incelenmektedir. Astar boya, son kat boyanın uygulanmasından önce tercihen kaplamalı, ya da kaplamasız metalik yüzeylere uygulanan, asıl görevi korozyon dayanımı sağlama ve diğer görevi son kat boyanın yüzeye tutunmasını sağlama olan, bazen “primer boya” olarak da adlandırılan boya çeşididir. Astarlar, doğrudan temizlenmiş bir metal yüzeye uygulanırlar ve ana korozyon önleyici pigmentlere göre sınıflandırılırlar. Korozyon önleme görevi üstlenen astarlar çinko içermektedir. Örneğin çinko pigmentleri içeren bir astar grubu çinko fosfat astarlar olarak adlandırılmaktadır. Böylece metal yüzeylerin korozyondan korunmasının birincil aşamasındaki görevini yerine getirirler. Son kat boyalar ise, cihazların veya sistemlerin dış yüzeyini oluşturan ve mutlaka astar boya üzerine uygulanan boya katmanıdır. Son kat boyalar, uygulandıkları metalin dış yüzeyinde fiziki bir bariyer katmanı oluşturarak dış ortamdan, oksijen ve nem difüzyonunu sınırlamaktadırlar ve birincil kaplamada oluşan veya var olan gözenekleri kapatmaktadırlar [68].

Boya çeşitlerinden yağ boyalar, sıvı halde bulunan, tabanca, fırça veya daldırma yöntemiyle uygulanan ve oda koşullarında veya daha yüksek sıcaklıklarda kürlenene boyalardır. Toz boyalar ise, toz halinde bulunan, elektrostatik özellikli tabancalar kullanılarak uygulanan, kürlenmesi için yüksek sıcaklık gerektiren boyalardır.

Boylar genellikle birçok alt malzemenin karışımıyla elde edilmektedir. Bir boya temelde bağlayıcı (reçine), pigment ve bir çözücünden oluşmaktadır. Boyaları sınıflandırmanın en yaygın yöntemleri, bağlayıcı tiplerine veya pigmentasyonlarına göre sınıflandırmaktır. Genellikle bağlayıcı olarak adlandırılan reçineler, boyanın film oluşturunca maddesi olarak görülmektedir. Reçineler, boyanın fiziksel ve kimyasal özelliklerini de belirlemektedir. Reçinelerin yoğunluğu ve bileşimi, kaplamanın geçirgenliğinin, korozyon direncinin ve ultraviyole (UV) direncinin belirlenmesinden öncelikli olarak sorumludur [68]. Boyalar genel olarak bağlayıcının tipine göre tanımlanmaktadır. Bu tipler, reçineyi oluşturan organik bileşik yapısına dayanmaktadır. Akrilik boyalar, epoksi boyalar, poliüretan boyalar tanımlamalara bazı örnekleridir. Bağlayıcılar aynı zamanda sıvı veya katı halde olabilmektedir. Pigmentler; pas önleme, geçirgenliğin azalması, renk sağlama veya

ultraviyole veya hava şartlarına karşı direnci artırma gibi işlevler için eklenmektedir. Tipik pigmentler arasında çinko fosfat, çinko molibdat, çinko fosfor silikat ve çinko kromat bulunur [64]. Pigmentler genellikle toz formatındadırlar. Çözücüler, boyanın film olarak uygulanabilmesini sağlamak için kullanılmaktadırlar. Bir çözücünün amacı, homojen karışımlarını sağlayabilmek için bağlayıcı ve diğer bileşenlerin viskozitesini düşürmektir. Ek olarak, düşük viskozite, kaplamanın belirli bir yüzey üzerine ince, pürüzsüz, sürekli bir film olarak uygulanmasını mümkün kılar [68]. Bağlayıcının akışkanlığını arttırarak farklı uygulama yöntemlerinin kullanımına olanak sağlarlar. Çözücüler, boya film işlemi yapıldıktan sonra buharlaşmaktadır. Kaplamaya koruyucu özellikler kazandıran bu bileşenlerin birleşimidir [67].

Boyanın uygulama yöntemi boyanan/kaplanan malzemenin ne amaçla kullanılacağına, yaşam döngüsü boyunca hangi ortamlara maruz kalacağına, uygulanacak boyanın türüne, maliyete, boyanacak ürünün şekline ve boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Uygulama yöntemleri, geleneksel boya fırçası veya rulo ile boya işleminden çeşitli püskürtme tekniklerine, toz kaplamaya veya elektrodpozisyona kadar değişmektedir. Çizelge 2.24 içerisinde sıklıkla kullanılan boya teknikleri anlatılmaktadır.

Çizelge 2.24. Boya teknikleri

Boya işlemi	Teknikleri
Fırçalama işlemi	Boyanın gözeneklere ve yüzey düzensizliklerine işleyebilmesi nedeniyle, özellikle astarlar ile birlikte kullanımda etkili ve nispeten basit bir uygulama yöntemi olmaktadır. Bu işlem yavaş olduğundan, öncelikle daha küçük işler, karmaşık yapılandırmalara sahip yüzeyler (kenarlar, köşeler, kesikler vb.) için veya aşırı püskürtmenin ciddi bir soruna neden olabileceği yerlerde kullanılmaktadır. Fırçalama işleminin en temel dezavantajı, kaplama tabakalarının, özellikle hızla kuruyan boyalarda kaplama tabakalarının homojen olmamasından kaynaklanmaktadır [68].
Rulo ile boyama	Genellikle püskürtme ile elde edilebilecek pürüzsüzlüğün veya tekdüzeliğin istenmediği geniş ve düz alanlarda tercih edilmektedir. Ayrıca aşırı püskürtmenin temizleme ve maskeleme sorunları oluşturduğu iç mekânlar da kullanılmaktadırlar. Boya yaparken rulo kullanıldığında, hava boya ile karışmakta ve nemin kürlenmiş filme nüfuz edebileceği noktalar bırakmaktadır [68].

Çizelge 2.24. (Devam) Boya teknikleri

Boya işlemi	Teknikleri
Püskürtmeyle boyama	Fırçalama veya rulo ile boyamaya göre daha düzgün ve pürüzsüz bir yüzey elde edilmektedir. Bunun sebebi olarak, bu tekniklerin isterleri karşılayamaması görülmektedir. En yaygın spreyci boyama yöntemleri geleneksel püskürtme yöntemi ve havasız püskürtme boyamadır. Geleneksel püskürtme yöntemi, boya atomizasyonu için basınçlı hava kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Uygulama sırasında boya ile büyük miktarlarda hava karıştığından, geri tepme veya aşırı püskürtmeden kaynaklanan boya kayıpları yüksek olabilmektedir. [68]. Havasız püskürtme yönteminde, boyayı püskürtülebilir duruma getirebilmek için büyük bir basınç kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece boya içerisinde hava karışmamaktadır. Bununla birlikte, havasız püskürtme işlemi kullanıldığında boya kaybı, fırçalamadan %30 ila 40 daha fazladır.

Toz boyalar, içerisinde çözücü bulunmaması sebebiyle kirlilik önleyici kaplamalar olarak da anılmaktadırlar. Toz boyama yöntemiyle 25 ile 250 µm arasında kaplama kalınlıkları elde edilebilmektedir. Bu yöntemde polietilen ve epoksi reçineler, kullanılan baskın boya türleridir. En çok kullanılan yöntemler genel olarak akışkan yatak toz kaplama ve elektrostatik toz püskürtme yöntemi sayılabilmektedir.

Çizelge 2.25 içerisinde savunma sanayiinde yaygın olarak kullanılan bazı boya çeşitlerinin özellikleri hakkında özet bilgiler verilmektedir. Deniz platformlarında, deniz kıyısındaki veya yakınındaki iç veya dış konumlarda veya herhangi bir tuzlu su ortamına maruz kalacak olan sistemlerde astar olarak inorganik çinko kullanılması önerilmektedir. İnorganik çinko, en uzun süreli korumayı sağlamaktadır ve çoğunlukla çelik yüzeylere uygulanırlar. Çizelge 2.26 ile verilen tablo içerisinde temel boya reçinelerinin ortam koşulları gözetilerek karşılaştırılması ve detay bilgiler verilmiştir. Boya seçimi yapılırken dikkate alınması gerekmektedir.

Çizelge 2.25. En yaygın kullanılan boyalar hakkında özet bilgiler

Boya Türü	Özellikler
Poliüretan Boyalar	UV ışınlarına karşı dayanımı ve aşınma direnci oldukça iyidir. Küf ve mantara dayanıklıdır. Ofis alanlarında, iç mekânlar da kuru depolama alanlarında (depolar) veya genel olarak ılıman ortam koşullarına maruz kalan diğer yerlerde kullanılacak malzemelere endüstriyel kalitede akrilik kaplama sistemi veya tek kat epoksi uygulanması önerilmektedir.

Çizelge 2.25. (Devam) En yaygın kullanılan boyalar hakkında özet bilgiler

Boya Türü	Özellikler
Akrilik Boyalar	UV ışınlarına karşı dayanımı yüksektir. Bu nedenle nispeten kuru yerlerde, güneş ışığına maruz kalan alanlarda ve normalde dış mekân da kullanım için derecelendirilen malzemeler arasındadırlar. Ancak darbe dayanımı iyi değildir.
Epoksi Boyalar	Kimyasal maddelere karşı direnci yüksektir ancak UV dayanımları düşüktür. Bu nedenle dış ortam boyası olarak tercih edilmesi uygun karşılanmaz. Güneş ışığına maruz kalan alanlarda normalde tebeşir gibi parlaklığını kaybetmektedirler ve hızla solmaktadırlar.
Alkid Boyalar	Atmosferik şartlara ve korozyona dayanımı çok iyi değildir. UV ışınlarına karşı dayanımı yüksektir. Bu nedenle nispeten kuru yerlerde, güneş ışığına maruz kalan alanlarda ve normalde dış mekân da kullanım için derecelendirilen malzemeler arasındadırlar.

Çizelge 2.26. Temel boya reçineleri karşılaştırılması [64]

Reçine Tipi	Avantajları	Sınırlamaları	Notlar
Akrilik (çözücü bazlı)	Işık ve UV altında mükemmel dayanım, parlaklık ve renk kararlılığı gösterir. Yüksek kimyasal direnç ve atmosferik koşullara mükemmel dayanım gösterir. UV ışığa uzun süre maruz kalındığında çok az kabarma ve renk solmasına uğrar.	Suya daldırma veya herhangi bir önemli asit veya alkali kimyasal maruziyet için uygun değildir.	Ağırlıklı olarak ışık stabilitesi, renk ve parlaklık korumasının birincil öneme sahip olduğu yerlerde kullanılır. Atmosferik kullanım koşullarında epoksiler üzerine son kat olarak uygulanır.
Akrilik (su bazlı)	İyi ışık ve renk kararlılığına sahiptirler. Parlaklıkları çözücü bazlı akriliklere göre daha azdır. Çözücü bazlı akriliklere yakın nem ve kimyasal dirence sahiptir. Uygulama ve temizlik kolaylığı vardır. Diğer astar türlerin çoğuna son kat olarak uygulanır.	Donma noktasının üzerinde depolanması gerekmektedir. Kireçli yüzeylere nüfuz etmemektedir. Dış atmosferik ortam koşullarına dayanımı, çözücü bazlı veya yağ bazlı kaplamalar kadar iyi değildir. Daldırma uygulamaları için uygun değildir.	Uygulama ve temizlik kolaylığı vardır. Toksik çözücü içermez, hava kirliliği kısıtlamalarına uygundur.
Alkidler	Atmosferik koşullara ve orta seviye kimyasal dumana karşı iyi direnç göstermektedir. 105°C sıcaklığa kadar dayanıklıdır.	Kimyasal dayanımları iyi değildir, alkalın yüzeyler üzerine uygulama için (suya daldırma gibi) uygun değildir.	İç, dış endüstriyel ve deniz uygulamaları için kaplama olarak kullanılır. Uzun yağlı alkidler, paslanmış ve çukurlu çelik için çok iyi astarlar oluştururlar.

Çizelge 2.26. (Devam) Temel boya reçineleri karşılaştırılması [64]

Reçine Tipi	Avantajları	Sınırlamaları	Notlar
Klorlu Kauçuklar	Düşük nem geçirgenliği ve çok iyi su dayanımı gösterir. Küflenmeye karşı dayanıklıdır. Aşınma dayanım iyidir.	Güçlü çözücüler içinde yeniden çözülürler. UV ışıyla ve sıcaklıkla bozunur (kuru halde 95°C, ıslak haldeyken 60°C) Özellikle sıcak havada sprey ile püskürtmek zordur.	Endüstriyel ve deniz uygulamalarda kullanılır. Yangına dayanıklıdır. Kokusuz ve tatsızdır. Zehirleyici değildir. Beton ve çeliğe yapışması son derece iyidir ve çabuk kurur.
Epoksi-Amin	Pek çok organik ve inorganik asite, suya ve sulu tuz çözeltilerine karşı çok iyi direnç gösterir. Amin ilaveleri, neme ve kimyasala karşı daha düşük dayanımdadır.	Diğer epoksilere göre daha serttir ve esnekliği daha düşüktür. Uygulama sırasında ortam nemli olmamalıdır. Kaplama, UV ışığa maruz kaldığında kabırır veya çatlar.	Kimyasallara ve atmosferik koşullara dayanıklıdır. Çelik ve betona çok iyi yapışır. Daha fazla esneklik ve daha az direnç ile yüksek yapılı epoksi mastik formülasyonları mevcuttur.
Epoksi (Novalac)	Çözücülere, kimyasallara, ısı ve neme karşı çok iyi dayanımı vardır. Diğer epoksi türlerinden dayanımı daha iyidir.	Amin ve poliamid epoksilerden daha az esnektir. Diğer epoksi türlerinden daha maliyetlidir.	Yüksek sıcaklık ve yüksek aşındırma gerektiren uygulamalarda astar olarak kullanılır.
Epoksi (Poliamid)	Amin ile kürlenene epoksilere göre su direnci daha iyidir. Çok iyi yapışma, parlaklık, darbe ve aşınma dayanımı sağlarlar. Amin ile kürlenene epoksilerden daha esnek ve serttir.	En yüksek dayanımı elde edebilmek için genellikle 20°C sıcaklıkta 7 günlük kürlenme gerektirir. Amin ile kürlenene epoksilere göre daha düşük kimyasal dayanımları vardır.	Deniz ve endüstriyel uygulamalar için sıklıkla kullanılır. Kolay bir şekilde son kat uygulaması yapılabilmektedir. Amin ile kürlenene epoksilere göre daha esnek ve neme karşı daha dayanıklıdır.
Fenolikler	Tabloda tanımlanan tüm organik kaplamalar arasında çözücülere karşı en yüksek dayanımına sahiptir. Kokusuzdur, tatsızdır ve zehirleyici değildir.	Aşırı çözücü dayanımı nedeniyle kürlenmiş kaplamaya yama uygulanması çok zordur.	Pişirme esnasında çapraz bağlanma olduğundan kahverengi bir renk açığa çıkar. Sıcak suya daldırma uygulamaları için kullanılır.
Poliüretan (alifatik)	Kimyasal olarak mükemmel parlaklığa, renk ve UV ışık dayanımına sahiptir. Kimyasal ve neme karşı dayanımı, poliamitle kürlenmiş epoksilere benzerdir. Aşınma dayanımı çok iyidir.	Nemli ortamlarda boyada kabarcıklanma görülebilir. 35 µm ince film tabakası olarak uygulanır.	Korozif ortamlarda korozif yapılarda pek çok dış yapıda parlak, ışıya hızlı son kat olarak yaygın olarak kullanılır. Görece daha pahalıdır ancak ömürleri çok uzundur. Epoksi kaplama üzerinde oluşabilen kabarmaları önlemek için son kat olarak kullanılır.

Çizelge 2.26. (Devam) Temel boya reçineleri karşılaştırılması [64]

Reçine Tipi	Avantajları	Sınırlamaları	Notlar
Poliüretan (aromatik)	Çok iyi yapışma, sertlik aşınması ve kimyasal dayanıma sahiptir. Alifatik poliüretanlara göre daha iyi yapışma, nem ve kimyasal dayanım gösterirler. Alifatik tiplere göre daha kalın uygulama yapılıır.	Aromatik üretanlar, UV radyasyona maruz kaldıklarında koyulaşabilir veya sararabilir. Nemli ortamlarda baloncuklaşma görülebilir.	En çok kullanılan tipi, nemle kürlenene tek elemanlı türdür. Dış ortam uygulamalarında aromatik poliüretanlar üzerine son kat olarak alifatik poliüretanlar kaplanır.
Viniller	Yağlarda, greslerde ve alkollerde çözünmezler. Su ve tuz çözeltilerine karşı dayanıklıdır. Yangına karşı dayanıklı ve iyi aşınma dayanımına sahiptirler.	Bazı tipleri astar uygulanmadan çeliğe yapışmamaktadır. Diğer boyalara göre kurumuş boyadaki iğne deliklerine daha sık rastlanır. Her kat için görece ince kalınlığa sahiptirler.	Tok, esnek, az zehirleyici, tatsız, renksiz ve yanmaya dirençlidir. Deniz ortamlarında kullanılabilirler.
Çinko içeren inorganik reçineler	Nötr (pH=7) ve nötre yakın atmosferik koşul ve bazı daldırma uygulamalarında korozyona karşı mükemmel ve uzun süreli korozyon direnci sağlar. Aşınma direnci çok iyidir ve kuru sıcaklık dayanımı 370°C'nin üzerindedir.	Reçinenin inorganik yapısından dolayı uygulama öncesi, kumlama yüzey hazırlığı gerektirir. Üzerine organik son kat uygulaması zordur. Uygulaması biraz zordur; 13µm üzerinde uygulanan kalınlıklarda çatlayabilir. Kürlenme için gereken nem değerlerine hassasiyetle bağlıdır.	Açık deniz ortamındaki yapılarda ve çelikte sıklıkla astar olarak kullanılır. Çinko içeren inorganik reçine kullanımı ile çukurcuk korozyonu tamamen önlenir.
Çinko içeren organik reçineler	Nem ve kimyasal dayanımına sahip ve çinko içeriğinin sağladığı galvanik korozyona direnç gösteren bir reçine tipidir. Boya öncesi yüzey hazırlığı ve sonkat uygulama yapılması çinko içeren inorganik reçinelere göre daha kolaydır.	Çinko içeren inorganik reçinelere göre genellikle daha düşük performans verir ancak kolaylıkla uygulanmaları ve yüzey hazırlığı bakımından daha az isteklerinin olması kullanımlarını arttırmaktadır.	Çinko içeren organik reçineler, sonkat uygulamalar için daha uyumludur. Genellikle galvanizli veya çinko içeren inorganik reçinelerin onarılması için kullanılırlar.

Boya uygulamalarında birçok sebepten dolayı çeşitli kusurlar oluşmaktadır. Uygulama hatası, uygulama sıcaklığı, yüzey temizliği hataları gibi nedenlerle boyalar görevini yerine getiremediği gibi, bakım onarım faaliyetlerinden yüzeyden sökülüp işlem tekrarının yapılmasına kadar süreci ilerletmektedir. Çizelge 2.27 içerisinde genel boya sorunları ve bu sorunların öngörülen sebepleri verilmiştir.

Çizelge 2.27. Temel boya hataları ve sebepleri

Genel Boya Problemleri	Muhtemel Hata Nedenleri																			
	Yüzey Kirliliği	Uygulama Yöntemi	Geçmiş Kap Ömrü	Yüksek Nem	Uygun Olmayan Terleme Zamanı	Yeni Kat Uygulama	Renklendirici Miktarı	Uygunsuz Karışım Oranı	UV Işığa Maruz Kalma	Işık Yoksunluğu	Kimyasala Maruz Kalma	İnceltici	İnceltici Oranı	Nem	Ürün Seçimi	Uygulama Sıcaklığı	Yüzey Sıcaklığı	72 Saatlik İlk Sıcaklık	Film Tabaka Kalınlığı	Hava Sirkülasyonu
Renk Atma /Sararma			X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X		X
Renk Farklılığı				X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X		X
Sütlenme				X	X	X		X			X			X		X	X	X		
Parlaklık Bozukluğu		X	X	X	X	X		X			X	X		X		X	X	X		X
Exotherm			X		X			X								X				
Yüzeye Yapışmama	X		X	X	X	X		X			X				X	X	X	X	X	X
Yumuşak Film Tabaka				X	X	X	X	X			X	X		X		X	X	X	X	X
Yapışkan Film Tabaka /Geç Kuruma				X	X	X		X				X		X		X	X	X	X	X
Kalkma /Kırılma	X				X	X						X	X	X					X	X
Kusma	X					X	X								X					X
Kaynama (Pinhole)	X	X			X	X						X		X						X
Krater	X	X									X	X	X	X						X
Düşük Film Kalınlığı		X						X					X							
Akma/Sarkma (Sagging)		X	X	X		X		X				X	X		X	X		X		
Çatlama /Parçalanma	X				X	X		X	X											
Timsah Sırtı	X																		X	X

Renkler

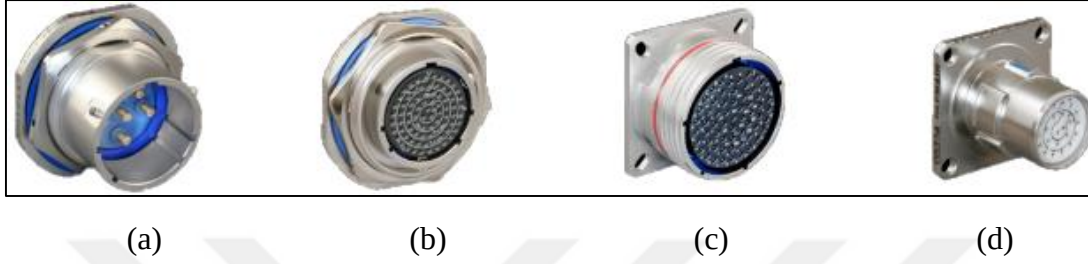
Tasarım dokümanlarında özellikle mekanik çözümlere ait boya renkleri “RAL” kodları ile verilmektedir. RAL kodlama sistemi, boyalar, kaplamalar ya da plastikler için renk tanımlarını yapan bir renk kodlama sistemidir. RAL klasik kodlama sistemi RAL ifadesi ardından 4 haneli sayılar ile ifade edilmektedir. 4 hanenin ilk hanesi boya rengini

belirlemektedir. İlk hane bir sistem kod numarasıdır ve sırasıyla 1 sarıyı, 2 turuncuyu, 3 kırmızıyı, 4 moru, 5 maviyi, 6 yeşili, 7 griyi, 8 kahverengiye ve 9 ise beyaz ve siyah gölgeleri ve tonlarını temsil etmektedir. Diğer 3 hane ise sırayla seçilmektedir. Askeri standartlara göre üretilen mekanik tasarım ve ürünlerde sıklıkla kullanılan boya renkleri RAL 7001, RAL 7032 ve RAL 7035 olan gri tonlarıdır.

2.17.8. Askeri konektörler

Konektörler, elektronik sistem, birim veya kabloların iletken elemanlarını birbirine bağlayan bağlayıcı parçalardır. Yaptıkları bağlantının amacı, elektrik akımının veya fiber optik ışık dalgalarının bir iletken den diğerine akmasını sağlamaktır. Konektörler, tasarımcıların her bir alt sistemin birbirinden ayrı modüler birer birim olarak ele alınmasını sağlayarak, elektronik birim veya kabloların üretimini ve montajını kolaylaştırmaktadır. Askeri sistemlerde kullanılan konektörler MIL-DTL-38999 standardını baz alarak seçilmekte ve kullanılmaktadır. D38999 standardı, titreşime, şoka ve neme karşı koruma sağlamak için birbiriyle eşleşen, dairesel konektör ailelerini tanımlamaktadır. Standartta göre D38999 konektörlerin üç adet montajlama yöntemi, dokuz adet dış çap boyutu, çok fazla çeşitte elektriksel temas düzenlemesi ve birden çok malzeme seçeneği bulunmaktadır. D38999 konektörleri toplamda dört seri ile sınıflandırılmaktadır. Bu seriler sırasıyla I, II, III ve IV olarak ilerlemektedir. Seri I, II, III ve IV konektörler birbirleri yerine kullanılamamakta veya birbiriyle uyumlu değildirler. Bunun yanı sıra tüm seriler -65°C ile +200°C sıcaklık aralığında çalışma kapasitesine sahiptir. Seri I konektörler, bayonet (süngü) yöntemiyle kilitlenir ve yüksek titreşim dayanımı gösterir. “Snoop proof” özelliği bulunmaktadır. Snoop proof terimi, yuva üzerinde kontakların eşleşmesi sırasında açıkta kalan kontak pimlerine zarar gelmesini önleyen uzun bir kabuk içermesi anlamına gelmektedir. Konektörün erkek veya dişi kontaklarının, eşleşen konektörün ön tarafından dokunmasını önleyen özelliklere sahip olmasıdır. Bu sayede konektörlerin birbirine bağlanması ve kilitlenmesi esnasında kontaklara zarar gelmesi önlenmektedir. Seri II konektörler, seri I gibi bayonet yani süngü ile kilitlenirler ancak scopp proof değildirler. Alan ve ağırlığın öncelikli konular olduğu aviyonik uygulamalar için ideal olarak uygun, ağırlığı azaltılmış ve düşük profilli dairesel bir konektörlerdir. Seri III konektörler, konektör üzerinde üçlü başlangıç metrik dişi bulunduran bir eşleşme mekanizmasına sahiptir. Snoop proof özelliktedir ve konektör barındıran uygulamalar için en uygun olanıdır. Yüksek sıcaklıkta, nemli ortamlarda, rüzgârlı veya titreşimli ortamlarda kullanılabilirler. Askeri sistem tasarımlarında

en çok kullanılan seridir. Seri IV konektörler “Breech-Lock” olarak adlandırılan kama kilit mekanizması ile kilitlenmektedir. Snoop proof özelliktedir, hafiftir ve kör çiftleşme uygulamaları için uygundur. Ayrıca yüksek titreşime dayanım özelliklerine sahiptirler. Uygun aksesuarlarla birlikte kullanıldıklarında yüksek rüzgâr ve nemli ortamlara çok uygundurlar [69,70]. Şekil 2.29’da D38999 konektörlerin serilerine ait görseller verilmiştir.



Şekil 2.31. D38999 konektör serileri (a) seri I, (b) seri II, (c) seri III (d) seri IV [69]

Kontak, konektörde bulunan ve elektrik enerjisini aktarabilmek için doğrudan temas kuran iletken elemandır. Kontaklar genellikle pin ve soket olarak ayrılmaktadır. Pin kontak aynı zamanda erkek kontak olarak da anılan elektrikselsel temas elemanıdır ve soket kontak ile eşleşen bir uca sahiptir. Soket kontak ise dişi kontak olarak da anılan, yuva olarak kabul edilen elektrikselsel temas elemanıdır ve pin kontağı ile bir eşleşme ucuna sahiptir. Kontak çapı için belirlenmiş bazı numaralar vardır. Bu numaralar, pin kontağının birbirine geçen ucunun dış çapını belirtmektedir. Numara ne kadar büyükse, kontak çapı da o kadar küçük olmaktadır. D38999 standardı için sıklıkla kullanılan kontak çapları; 23-22, 22, 22D, 22M, 20, 16, 10 ve 8’ dir.

Askeri standarttaki konektörler, pim ve soket kontaklarıyla kabloları birbirine bağlayan "plug" ve "receptacle" olarak adlandırılan ve genel olarak fiş ve priz olarak bilinen iki ayrı bileşen grubundan oluşmaktadır. Plug konektörler kablo üzerine takıldığından sistem tasarımlarında kablo üzeri olarak anılır. Receptacle konektörler ise, kutu veya birim üzerine montajlı halde kullanılmaktadır ve bu nedenle bu konektör grubuna kutu üzeri konektör olarak anılmaktadır.

D38999 standardı konektörleri belirli parça numaraları altında tanımlamaktadır. Parça numarası okunduğunda konektörler ilgili bilinmesi gereken temel bilgiler verilmektedir. Bu standarda göre seri III ve seri IV konektör isimlendirmesi ön ek olarak D38999 alır ve bir “/” ile ayrılarak konektör özellikleri sembolleri yazılır. İlerleyen sayfalardaki tanımlama

bilgileri seri III ve seri IV içindir. Konektörde ifade edilen özellikler toplamda altı hanede harf ve rakam karışımı ile belirlenmektedir. “D38999 / 26WD35SN” örnek bir konektör kodlamasıdır. Bu kodlamada 26, W, D, 35, S ve N ile verilmiş harf ve sayıların her biri bir özellik sınıflandırması temsil etmektedir. Örnekte verilen “26” ile ifade edilen hane, “Shell type” olarak adlandırılmaktadır ve konektörün tipini vermektedir. Seri III konektörler için 20, 21, 23, 24, 25, 26 ve 27 sayılarını içerir. Seri IV konektörler için, 40 ile 48 arasındaki tüm sayıları kapsar. Çizelge 2.28 de Seri III ve IV için shell type açıklamaları verilmiştir.

Çizelge 2.28. konektör tanımlama ilk hane açıklaması

Seri III	Seri IV	Shell Type Açıklaması
D38999/20	D38999/40	Receptacle (Priz) tip, duvara montaj flanş yapı
D38999/21	D38999/41	Receptacle (Priz) tip, kutu montajı, Hermetik yapı
-	D38999/42	Receptacle (Priz) tip, kutu montajı
D38999/23	D38999/43	Receptacle (Priz) tip, Somunlu bağlantı, Hermetik yapı
D38999/24	D38999/44	Receptacle (Priz) tip, Somunlu bağlantı
D38999/25	D38999/45	Receptacle (Priz) tip, Lehim Montajı, Hermetik yapı
D38999/26	D38999/46	Plug (Fiş) tip, EMI topraklama ucu
-	D38999/47	Plug (Fiş) tip
D38999/27	D38999/48	Receptacle (Priz) tip, Kaynak Montajı, Hermetik

Genel bir özetleme yapılırsa, 26, 46 ve 47 numaraları kablo üzeri konektörleri temsil eder, geri kalanların tamamı kutu üzeridir ve tek sayılılar hermetik yapıdadır.

İkinci hane olan “W” harfi konektörün sınıfını belirtmektedir. Sınıf bilgisi, konektör malzemesini ve nihai kaplama bilgisini harfler ile temsil etmektedir. Başlıca konektör malzemeleri alüminyum, paslanmaz çelik ve kompozittir. Bu malzemeler üzerine yapılan kaplama çeşitleri ve maruz bırakılan ortamlar dolayısıyla yaklaşık olarak 15 çeşit konektör shell (kabuk) sınıfı bulunmaktadır. Çizelge 2.29 seri III ve IV konektörlerin malzeme ve kaplama ile yüzey kalite bilgisini vermektedir.

Çizelge 2.29. Seri III ve IV sınıf, malzeme, kaplama bilgileri [70]

Temsil edilen harf	Atmosferik veya hermetik dayanım	Malzeme	Kaplama/yüzey kalitesi
F	Atmosferik koşullara dayanım	Alüminyum	Akımsız Nikel Kaplama (48 saat Tuz Püskürtme)
G	Atmosferik koşullara dayanım	Alüminyum	Uzay Sınıfı Akımsız Nikel (48 saat Tuz Püskürtme)

Çizelge 2.29. (Devam) Seri III ve IV sınıf, malzeme, kaplama bilgileri [70]

Temsil edilen harf	Atmosferik veya hermetik dayanım	Malzeme	Kaplama/yüzey kalitesi
H	Hermetik olarak yalıtılmış	Paslanmaz Çelik	Uzay Sınıfı
J	Atmosferik koşullara dayanım	Kompozit	Olive Drab Kadmiyum (2000-saat Tuz Spreyi)
K	Atmosferik koşullara dayanım	Paslanmaz Çelik	Korozyona Dirençli Paslanmaz Çelik - Güvenlik Duvarı (500 saat Tuz Püskürtme)
L	Atmosferik koşullara dayanım	Paslanmaz Çelik	Elektrostatik çökeltilmiş Nikel (48 saat Tuz Püskürtme)
M	Atmosferik koşullara dayanım	Kompozit	Akımsız Nikel Kaplama (2000 saat Tuz Püskürtme)
N	Hermetik olarak yalıtılmış	Paslanmaz Çelik	Paslanmaz Çelik, Nikel Kaplama
S	Atmosferik koşullara dayanım	Paslanmaz Çelik	Nikel Kaplama (500 saat Tuz Püskürtme)
T	Atmosferik koşullara dayanım	Alüminyum	Nikel PTFE (500 saat Tuz Spreyi)
W	Atmosferik koşullara dayanım	Alüminyum	Olive Drab Kadmiyum (500 saat Tuz Spreyi)
Y	Hermetik olarak yalıtılmış	Paslanmaz Çelik	Paslanmaz Çelik, Pasifleştirilmiş
Z	Atmosferik koşullara dayanım	Alüminyum	Siyah Çinko Nikel (500 saat Tuz Spreyi)

Askeri tasarımlarda en çok kullanılan konektör sınıfı “K” ve “W” sınıfıdır. Şekil 2.32’de bu sınıflara ait konektörlerin görselleri verilmiştir.



Şekil 2.32 K ve W sınıf konektörlerin görünüşü [69]

Konektör isimlendirilmesinde “D” ile ifade edilen üçüncü hane, “shell size” olarak adlandırılan konektör boyutunu temsil etmektedir. Her harf belirlenmiş ve standartlaştırılmış konektör boyutlarını ifade etmektedir. D38999’a göre; A, B, C, D, E, F, G, H ve J harfleri ile sıralanan toplamda dokuz adet boyut vardır. Bu boyutlar en küçük boy olan “A” dan başlayarak sırasıyla en büyük boy olan “J” ye kadar ilerler. Çizelge 2.30 dokuz boy için boyut bilgisini vermektedir.

Çizelge 2.30. Konektör boyut kodlama bilgileri

Temsil Eden Harf	Konnektör Boyutu
A	9
B	11
C	13
D	15
E	17
F	19
G	21
H	23
J	25

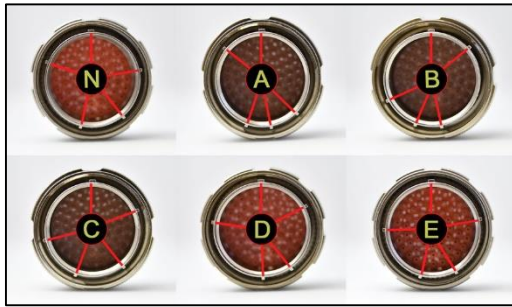
Konektör isimlendirilmesinde “35” ile ifade edilen dördüncü hane, “insert arrangement” olarak adlandırılmaktadır. Askeri konektörlerde “insert” kelime anlamı olarak konektör kabuğunun içine oturan ve konektör kontaklarını destekleyen kalıplanmış bir dielektrik malzeme parçasını anlatır. Insert arrangement ifadesi ise kontakların sayısını, düzenini ve aralıklarını sayılar ile temsil etmektedir. Bu sayılar kimi zaman kontak sayısına eşit olsada her zaman toplam kontak sayısına eşit olmamaktadır. Yaklaşık olarak 77 adet insert arrangement çeşidi bulunmaktadır. Bu düzenleme çeşitleri konektör boyutu ve kontak çapı ile alakalıdır. Sadece insert arrangement ile ilgili MIL-STD-1560 standardı oluşturulmuştur. Bu nedenle kontak düzenlemeleri için referans olarak MIL-STD-1560 önerilmektedir. Standart, insert arrangement çeşitlerini konektör boyutu-kontak düzenlemesi numarası olarak sembolize etmektedir. Örneğin standarda göre 9-3 konektör boyutu 9 yani A boyutu, kontak düzeni numarasının 6 olduğunu belirtmektedir. Bu düzenleme için 3 kontak mevcuttur ancak bu her zaman kontak sayısı düzen numarasına eşit demek değildir. Örneğin 15-35 için, konektör boyutu 15 yani “D” boyutu, kontak düzenleme numarası 35, ancak kontak sayısı 37’dir.

Konektör isimlendirilmesinde “S” ile ifade edilen beşinci hane, “contact type” olarak adlandırılan kontak tipini temsil etmektedir. En sık kullanılan kontak tipleri atmosferik ortam dayanımlı konektörlerde P, S, A, H, B ve J ile sembolize edilirken, hermetik konektörlerde C, D, X, Y ile gösterilmektedir. Çizelge 2.31’de kontak tiplerinin tanımları verilmiştir.

Çizelge 2.31. Konektör kontak tipleri

Atmosferik Koşullara Dayanımlı	Tanım	Hermetik	Tanım
P	Pin (Erkek), lehimlenebilir	C	Pin, PCB doğrudan besleme
S	Soket (Dişi), lehimlenebilir	D	Soket, PCB doğrudan besleme
A	Daha Az Pin, lehimlenebilir	X	Pin, Eyelet (Delikli)
B	Daha Az Soket, lehimlenebilir	Z	Soket, Eyelet (Delikli)
H	1500 Çevrim Pin	-	
J	1500 Çevrim Soket	-	

Konektör isimlendirilmesinde “N” ile ifade edilen altıncı ve son hane, “polarization” olarak adlandırılan konektör anahtarlama pozisyonunu temsil etmektedir. D38999 serisi konektörlerde her bir konektör boyutu (shell size) için altı farklı anahtarlama konumu bulunmaktadır. Bunlar N, A, B, C, D ve E harfleri ile sembolize edilen yönlerdir. Altı farklı anahtarlama konumuna sahip olmak; aynı boyutta, aynı kontak çapında ve kontak düzeninde olan altı adet konektörün yanlış eşleştirilmesini engellemektedir. Şekil 2.33’te anahtarlama yönleri verilmiştir. Anahtarlama yönü ile insert arrangement değişmemektedir ve tüm yönler için ana anahtar konumu sabit kalmaktadır. Yön tayini için; küçük olan anahtarlamalar dönmektedir.



Şekil 2.33. Konektör anahtarlama yönleri [69]

2.17.9. Hizalama (Boresight)

EO sistemler için boresight, termal, gündüz, lazer veya varsa diğer bileşenlerinin optik eksenlerinin hizalanması veya diğer bir deyişle birimlerin optik eksenlerin çakıştırılması işlemi olarak tanımlanmaktadır. Elektro-optik sistemlerin boresight hassasiyeti veya hatası, optik/mekanik eksen arasındaki açılar olarak anlaşılan bir dizi boresight hatası şeklinde ifade edilmektedir.

EO sistemlerde birden fazla alt birimin birlikte kullanımı tek bir optik eksen olmasına en büyük engeldir. Bu nedenle alt sistem birimlerinin optik eksenlerinin ilk olarak birbirine paralel hale getirilip ardından eksen hizalama işleminin yapılması gerekmektedir. Ancak mükemmel hizalamanın elde edilmesi pratik olarak pek mümkün olmamaktadır.

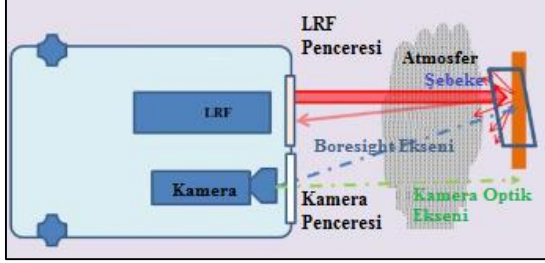
Bir elektro-optik sistemde termal veya gündüz görüntüleme sisteminin lazer mesafe ölçerle entegre bir şekilde çalışabilmesi gerekmektedir. Bunun en önemli sebebi, operatörün aktif olan görüntüde görülen şebeke (reticle) üzerinden nişan hattına bakarak lazer ölçümü yapmasıdır. Başka bir deyişle; operatör hedef alma işlemini, nişangâhı hedefin üzerine getirerek yapmaktadır. Hedefin mesafesinin doğru ölçülmesi veya hedefin işaretlenebilmesi için bu nişangâh konumlandırılması ile lazerin atıldığı hattın çakışık olması gerekmektedir. Birimler kendi içlerinde mekanik hizalamaya sahip olsada, elektro-optik sistem içerisinde ortak bir çalışma yürüttüklerinden birbirlerine göre de hizalanmaları gerekmektedir.

Sistem içerisinde bulunan elektro optik birimlerin bakış hatları teoride birbirine paraleldir. Hizalama işlemi ile referans seçilen birimin bakış hattına göre diğer birimlerin bakış hatlarının mrad cinsinden açı verilmesi ile eksen çakışmasının yapılması sağlanmaktadır. Bu açı farkı elektro-optik sistem mekanik tasarımı ile belirlenmektedir. Birimlerin birbirlerine göre konumları hizalama açısını belirlemektedir. Her ne kadar hizalama işlemi fabrika ve saha uygulamaları olarak çeşitlendirilsede, en doğru hizalama, kolimatör kullanılarak laboratuvarda yapılan fabrika seviyesi bir bakımdır ve kullanım öncesi tamamlanmış olması gerekmektedir. Şekil 2.34'te lazer mesafe ölçer ile görüntüleme birimi arası hizalama mekanizması görülmektedir.

Alt birimlerin operasyonel kaynaklı hizalama korunumu hatası mekanik parçaların ısı genleşmesinden, platform titreşiminden, darbe ve şok etkilerinden doğrudan etkilenmektedir. Bunun sonucu olarak birimlerin birbirlerine olan bakış hatları kaymakta ve ölçülmek istenen mesafe veya hedeflerde hatalara sebep olmaktadır. Kullanıcı şebekeden ortaladığı noktaya baktığını, seçtiği noktaya lazer attığını veya hedef olarak belirlediğini düşünsede, hizalama kayması sebebiyle lazer bakış hattı kaydığından mesafe ölçümü veya hedef işaretlemesi başka bir noktaya ait olmaktadır.

Hizalama işlemini kimin yaptığına, işlemin nerede yapılacağına, hangi sistemin uyumlu hale getirileceğine, hizalanacak sistemin uygulanmasına, hizalanacak EO sisteminin optik kanal

sayısına veya üretim döngüsünün aşamasına bağlı olarak boresight yapma şekilleri ayrılabilir.



Şekil 2.34. Boresight mekanizması [45]

Ayrı elektro-optik birimlerin birbirleriyle hizalama işlemi yapılacağı zaman yine referans olarak belirlenen bir birime göre diğer birimlerin optik eksenlerinin çakıştırılması yapılmaktadır. Ancak farklı birimlerde bu işlemin yapılması için mekanik veya yazılımsal müdahale gerekmektedir.

Elektro-optik sistemlerde referans termal kamera seçildiğinde gündüz kamerası hizalaması termal kameraya göre yapılmaktadır. Bunun tam tersi de mümkün olabilmektedir. Mekanik olarak yapılacak bu işlem için, birimler ile entegrasyon platformu arasında hizalama ayar mekanizmaları bulunmaktadır. Hem termal kamera hem de gündüz kamera kendilerine özel tasarlanmış bu plakalara takılarak sisteme entegre edilmektedir. Plakalar, yan (x) ve yükseliş (z) ekseninde konum ayarı ve sabitleme yapılmasına imkân veren somun ve vidalar bulundurmaktadır. İşlem, referans kameranın en dar veya en geniş bakış açısında bilinen bir hedefe göre referans kaynağı bakış hattını vidalar ve somunlar vasıtasıyla gevşeterek veya sıkarak ayarlayıp, farklı düzlemlerde açısal hareket verdirerek eksen çakışması yapılması ile sağlanmaktadır. Yapılan hizalamayı referans alan diğer birimin nişan hattının hizalanması ile işlem ilerletilmektedir.

Mekanik hizalamanın yanısıra birimlerin kendi şebeke sistemlerinin elektronik olarak kaydırılması ile de boresight işlemi yapılabilir. Yazılım ile birimlerin şebekeleri, sensör ve ekran arasındaki video zincirine yerleştirilir. Her alt sistem birimi için farklı şebeke kaydırma yeteneği genellikle mevcut olduğundan, bu şebekelerin üst üste bindirilmesi, her sensörün işaretleme hatasının ayrı ayrı kompanzasyonunu sağlamaktadır. Elektronik boresight işlemi özellikle uzun mesefeli gözetleme sistemlerde kullanılmaktadır. Bu işlem

genellikle hedef alınan ve konum bilgileri bilinen bir nokta ile çalışılarak ölçüm sonucu elde edilen kayma miktarlarının kaydırılması ile elde edilmektedir.

2.18. Çevre Koşulları Gereksinimleri

Askeri sistem tasarımlarının ömür devirleri boyunca maruz kalacağı atmosferik şartlara karşı doğru, sorunsuz ve güvenilir şekilde çalışılabilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Çizelge 2.32 içerisinde sıralanan maddeler, sistem tasarımlarında oluşan mekanik hatalar ve bu hatalara sebep olan nedenleri işaret etmektedir. Cihazlarda yaşanan bu gibi hataların, arızaların veya performans kayıplarının, tasarımların isterleri karşılayıp karşılayamadığını, güvenilir olup olmadıklarını ve olası arıza sebeplerinin nihai ürün teslimatı öncesinde ortaya çıkabilmesi için en başarılı yol cihazların test edilmesidir. Bu doğrultuda askeri sistemlere çevre koşul testleri uygulanmaktadır.

Çizelge 2.32. Sistem tasarımlarında en sık görülen hatalar ve nedenleri

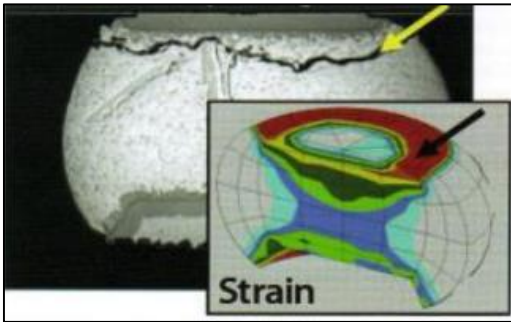
Hatalı İşlemler	Aşırı Stres Yüklemleri	Hasar Birikimi ile Yıpranma
Eksik parçalar, yanlış montaj veya süreçler	Aşırı ısınma	Sürtünme aşınması
Proses kontrol hataları (Tork, Isıl işlem)	Voltaj/Akım problemleri	Yorulma
Tasarım hataları	Elektro statik deşarj (ESD)	Korozyon
Fonksiyon eksiklikleri	Ani akma, burkulma, çatlama, kırılma	Performans değişiklikleri/parametre kayması

Yüksek titreşimler ile devamlı çalışan askeri kara araçlarında cihazların, elektronik kartların veya bağlantı elemanlarının tamamının çalışma şartlarında maruz kalınacak titreşimde görevlerini yerine getirmeleri gerekmektedir. Araçtan gelen titreşim etkilerinin arıza vermeden karşılanması tasarımsal bir gereksinimdir. Deniz sistemlerinde yaşayacak bir cihazın veya birimin seyir esnasında gelen dalga şokunu alt edip görevini yerine getirmesi gerekmektedir. Ağırlık merkezini kaydıracak noktalara görece ağır komponent lehimlenmesi, mekanik entegreasyonu yapılan birim üzerinde kartın yanlış konumlandırılması veya montaj hataları gibi tasarımsal ve personel hatalı durumlar sebebiyle elektronik kartlarda hasarlar meydana gelebilmektedir. Şekil 2.35 mekanik titreşim sırasında yaşanan bir arızanın sebebi olan lehimin kırılmasını göstermektedir. Bu gibi durumların yaşanmaması için birimlerin tamamının ömürlerinde karşılaşılabilecek ortam koşullarına göre tasarımlarının veya entegrasyonlarının yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.35. Mekanik şok altında lehim kırılması [71]

Özellikle elektronik birimlerde gerçekleşen arızaların çoğu termal olarak indüklenen gerilimler, gerinimler ve ısı genleşme katsayılarında aşırı farklılıklar olan malzemelerin bir arada kullanılması ile oluşan termo-mekanik kök nedenli hatalardır. Dolayısıyla kart tasarımlarında komponentlerin yaşayacakları ortam koşullarında maruz kalacakları sıcaklıklara bağlı olarak genleşme katsayılarının, sertliklerinin, lehimlenebilirlik özelliklerinin, lehim noktalarının, soğutma gereksinimlerinin, mekanik tasarım aşamasında ortam şartları gözetilerek seçilmesi gerekmektedir. Şekil 2.36 ile verilen görselde termal genleşme katsayısı farklılığı sebebiyle oluşmuş olan bir lehim kırılması görülmektedir. Çalışma sıcaklığı karşısında farklı oranlarda genleşen metallerde bu hatalar görülebilmektedir.



Şekil 2.36. PCB kart lehiminin termal genleşme sonucu kırılması [72]

Tasarımlarda amaçlardan bir tanesi de ürün güvenilirliğini tasarım aşamasında mümkün olduğunca erken bir şekilde doğrulamaktır. Şekil 2.35 ve Şekil 2.36'da verilen hatalar gibi tasarımsal hataları tespit edebilmek adına birimlere çevre koşul testleri uygulanmaktadır. Askeri birimlerin maruz kalacağı zorlayıcı çevre koşulları MIL-STD-810 standardı altında toplanmıştır. Bu standart içerisinde, birimlerin yaşam devri boyunca maruz kalabileceği ortam koşulların zorlaştırılmış versiyonlarının simülasyonları anlatılmıştır ve tamamı test prosedürü haline getirilmiştir. Cihazlar, kullanılacağı ortam, maruz kalacağı atmosferik

koşullar, kullanım senaryosu, depolama bilgisi, taşıma bilgisi vs. gibi bilgilere bağlı olarak seçilen ve uygulanan teste göre başarılı veya başarısız olarak sınıflandırılmaktadır. Başarılı sonuçlanan test sonucu ile cihazlar ilgili test koşulunu sağladığını ispatlamaktadır. Standartta sıralanan süreçler doğru bir şekilde uygulanırsa, test edilen malzemenin kullanılacağı ortam koşullarına karşı genel dayanıklılığı konusunda büyük ölçüde güven oluşturmaktadır.

MIL-STD-810 standardı toplamda üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler bölüm 1, bölüm 2 ve bölüm 3 olarak ayrılmıştır. Birinci bölüm çevre mühendisliği programı yönergeleri olarak geçmektedir ve çevresel tasarım ve test uyarlama sürecindeki yönetim, mühendislik ve teknik rolleri açıklamaktadır. İkinci bölüm, ilk bölümde açıklanan genel ve özel test uyarlama yönergelerine göre uygulanacak çevresel laboratuvar test yöntemlerini içermektedir. Üçüncü bölüm ise, birçok farklı kaynaklardan toplanan iklim verileri ve kılavuzların bir özetini içermektedir ve dünyanın çeşitli iklim bölgeleri için planlama rehberliği sağlamaktadır [73]. MIL-STD-810 toplamda 29 test yöntemini içermektedir. Test yöntemlerinin tanımları ve test yöntem numaraları Çizelge 2.33'te verilmiştir. Askeri sistemlerde en çok uygulanan test methodları alt başlıklarda açıklanmaktadır.

Çizelge 2.33. MIL-STD-810 test numaraları ve tanımları

Test No.	Test Tanım	Test No.	Test Tanım
500	Düşük Basınç (Rakım, Yükseklik)	515	Akustik Gürültü
501	Yüksek Sıcaklık	516	Mekanik Şok
502	Düşük Sıcaklık	517	Piroteknik Şok,
503	Isıl Şok	518	Asidik Atmosfer
504	Sıvılarla Kirlenme	519	Atış Şoku
505	Güneş Işınması	520	Sıcaklık, Nem, Titreşim ve Rakım
506	Yağmur	521	Buzlanma
507	Nem	522	Balistik Şok
508	Mantar	523	Vibro-Akustik / Sıcaklık
509	Tuz Sisi	524	Dondurma / Çözme
510	Kum ve Toz	525	Zaman Dalgası Biçimi Çoğaltma
511	Patlayıcı Atmosfer	526	Ray Darbe
512	Daldırma	527	Çoklu Uyarıcı
513	İvmelenme	528	Gemi Ekipmanlarının Mekanik Titreşimleri
514	Titreşim	-	-

2.18.1. Düşük basınç testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre düşük basınç test numarası 500.6'dır. Cihazların, sistemlerin veya malzemelerin düşük basınçlı bir ortama dayanıp

dayanamayacağını bu basınçta çalışıp çalışamayacağını veya hızlı basınç değişikliklerine dayanıp dayanamayacağını belirlemek için düşük basınç (rakım) testleri uygulanmaktadır. En basit tabirle düşük basınç testi, bir sistem veya birimin bir basınç test kabineye yerleştirilmesi ve sıcaklık ile hava basıncının kontrol edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Düşük basınç testi kendi içerisinde toplam dört adet alt basınç testini içermektedir. Bu testler prosedür I (depolama), prosedür II (çalışma), prosedür III (hızlı dekompresyon) ve prosedür IV (patlayıcı dekompresyon) olarak sıralanmaktadır [73].

Prosedür I (depolama) testi, yüksek rakımlarda malzemelerin taşınması, depolanması beklenen sistemlerde kullanılmaktadır. Prosedür II (çalıştırma) testi, bir sistemin düşük basınçlı ortamlardaki çalışma performansını değerlendirmektedir. Prosedür III (hızlı dekompresyon) testi, hava basıncının hızlı bir şekilde düştüğü koşullarda personeli tehlikeye atabilecek veya bir kara aracına ya da uçağa zarar verebilecek bir reaksiyona maruz kalabilecek sistemlere uygulanmaktadır. Prosedür IV (patlayıcı dekompresyon) testi ise, hava basıncında kademeli olarak değil, anlık bir düşüşe maruz kalan sistemlere uygulanmaktadır [73].

2.18.2. Yüksek sıcaklık testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre yüksek sıcaklık test numarası 501.7'dir. Yüksek sıcaklık testinin amacı, yüksek sıcaklık koşullarının malzemenin güvenliği, bütünlüğü ve performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Yüksek sıcaklık testi kendi içerisinde toplam üç adet alt yüksek sıcaklık testini içermektedir. Bu testler, prosedür I (depolama), prosedür II (çalışma) ve prosedür III (Taktik-Beklemeden Operasyona) şeklinde ayrılmıştır. Prosedür I (depolama) testi, cihaz çalışmazken yüksek sıcaklıkların cihaz üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Malzemenin yüksek sıcaklıkta depolanması süresince ve depolama sonrasında malzeme güvenliğini ve saklama sonrası performansının nasıl etkilendiğini araştırmak için kullanılmaktadır. Prosedür II (çalışma) testi, cihaz çalışırken yüksek sıcaklıkların cihaz üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Prosedür III (Taktik-Beklemeden Operasyona) testi, test edilen cihazın veya sistemin daha yüksek depolama sıcaklıklarına maruz kaldıktan sonra operasyonel sıcaklıklar altında nasıl çalıştığını ölçmektedir. Bu yöntem, operasyonel olmayan sıcaklıklarda önceden ısıtıldıktan sonra malzemenin çalışma sıcaklıklarındaki performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır [73].

2.18.3. Düşük sıcaklık testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre düşük sıcaklık test numarası 502.7'dir. Düşük sıcaklık testi, düşük sıcaklık koşullarının malzemenin güvenliği, bütünlüğü ve performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Düşük sıcaklık testi kendi içerisinde toplam üç adet alt düşük sıcaklık testini içermektedir. Bu testler, prosedür I (depolama), prosedür II (çalışma) ve prosedür III (manipülasyon) şeklinde ayrılmıştır. Tüm prosedürler düşük sıcaklıklar içermekle birlikte, performans testlerinin zamanlamasına ve niteliğine göre farklılık gösterir. Prosedür I (depolama) testi, cihaz çalışmazken düşük sıcaklıkların cihaz üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Malzemenin düşük sıcaklıkta depolanması süresince ve depolama sonrasında malzeme güvenliğini ve saklama sonrası performansının nasıl etkilendiğini araştırmak için kullanılmaktadır. Prosedür II (çalışma) testi, cihaz çalışırken düşük sıcaklıkların cihaz üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Prosedür III (manipülasyon) testi, ağır, soğuk hava kıyafetleri giyen personel tarafından malzemenin kurulup sökülebilmesi kolaylığını araştırmak için kullanılmaktadır [73].

2.18.4. Isıl şok testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre ısı şok test numarası 503.7'dir. Isıl şok testi malzemenin, fiziksel hasar veya performansta bozulması olmadan çevredeki atmosferin sıcaklığındaki ani değişikliklere dayanıp dayanamayacağını belirlemek için kullanılmaktadır. Ani değişiklikler bir dakika içinde 10 °C'den daha büyük bir hava sıcaklığı değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Bu test, malzemenin dış yüzeylerinde, dış yüzeylere monte edilmiş nesnelerde veya dış yüzeylerin yakınında bulunan iç öğelerde oluşan ani sıcaklık değişikliklerinin etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem esasen, test öğesinin yüzey seviyelerine odaklanmaktadır. Bu nedenle yüzey seviyesi test sayılabilmektedir. Isıl şok testi, testin uzunluğuna ve şokun kendisine bağlı olarak toplam dört adet alt ısı şok testini içermektedir. Bu testler Prosedür I-A (sabit uç sıcaklıktan tek yönlü şok veya şoklar), prosedür I-B (sabit uç sıcaklıktan tek çevrim şok), prosedür I-C (sabit uç sıcaklıktan çok çevrim şoklar) ve prosedür I-D (kontrollü ortamdan veya kontrollü ortama şoklar) olmak üzere ayrılmışlardır [73].

Prosedür I-A sabit aşırı sıcaklıktan kaynaklanan tek yönlü şok testi, yalnızca bir yönde nadiren termal şoka maruz kalması muhtemel malzeme için, her bir uygun koşul için en az

bir şok gerçekleştirilmesini kapsamaktadır (düşük ila yüksek sıcaklık veya tam tersi). Prosedür I-B sabit aşırı sıcaklıktan tek çevrimli şok testi, yalnızca bir termal şok döngüsüne (her bir yönde 1 tane) maruz kalacağı düşünülen malzeme için, her uygun koşul için 1 şok gerçekleştirilmektedir (düşük ila yüksek sıcaklık ve ters yönde bir şok uygulanır). Prosedür I-C sabit aşırı sıcaklıktan kaynaklanan çok çevrimli şok testi, hızlı sıcaklık değişikliklerinin malzeme üzerindeki etkisini belirlemektir. Her durumda en az üç şok uygulanmaktadır. Bunun anlamı cihazın soğuktan sıcağa üç geçiş, sıcaktan soğuğa üç geçiş ve her aktarımdan sonra bir stabilizasyon süresi yaşamasıdır. Şokların sayısı, esas olarak cihazın yaşayacağı düşünülen uygulama durumuna bağlıdır. Prosedür I-D, kontrollü ortam sıcaklığından gelen şok testi, esas olarak Prosedür I-A ve I-C'nin sürelerini takip etmektedir ancak tüm şoklar, kontrollü ortam koşullarında oluşmaktadır [73].

2.18.5. Güneş ışıması testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre güneş ışıması testi numarası 505.6'dır. Güneş ışıması veya diğer isimlendirilmesiyle güneş radyasyonu testinin genel anlamda iki amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki güneş radyasyonunun malzeme üzerindeki ısınma etkilerini belirlemektir. Diğer amaç ise, güneş radyasyonuna maruz kalmanın aktinik (foto bozunma) etkilerini belirlemeye yardımcı olmak içindir. Sıcak iklimlerde, açıkta yaşam döngüsü sırasında ve ısıtma veya aktinik etkiler söz konusu olduğunda güneş radyasyonuna maruz kalma olasılığı yüksek olan malzemeyi değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem, doğrudan güneş ışığına maruz kalmanın etkilerinin değerlendirilmesinde önemlidir. Güneş ışıması testi kendi içerisinde toplam iki adet alt test içermektedir. Bu testler prosedür I (çevrimsel) ve prosedür II (sürekli durum) olarak ayrılmaktadır.

Prosedür I çevrimsel test, güneş enerjisi yüklemesinin neden olduğu malzemenin sıcaklık artışını (ortam üzerindeki) belirlemede yararlı olmaktadır. Prosedür-II sürekli durum testi, güneş radyasyonu koşullarının ölçümleriyle çeşitli radyasyon kaynakları kullanılarak farklı lokasyonlarda ve irtifalarda güneş radyasyonunun ultraviyole etkisini simüle etmek için kullanılmaktadır. Prosedür II (kararlı durum (aktinik etkiler)) ise güneş radyasyonunun ürettiği foto bozulma etkilerini hızlandırmak için tasarlanmıştır. Prosedür-II, uzun süre güneş ışığına maruz kalan malzeme üzerindeki aktinik etkilerin değerlendirilmesinde yararlı olmaktadır. Her iki prosedür de test öğelerini simüle edilmiş güneş ışımasına maruz bırakmayı içerirken, güneş yüklerinin zamanlaması ve seviyesine göre farklılık göstermektedirler [73].

2.18.6. Yağmurlama testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre yağmurlama testi numarası 506.6'dır. Yağmurlama testi depolama, nakliye veya çalıştırma sırasında yağmura, spreye veya damlayan suya maruz kalma olasılığı yüksek olan malzemeyi değerlendirmek için kullanılmaktadır. Yağmurlama testi kendi içerisinde toplam üç alt yağmur testini içermektedir. Bu testler prosedür I (yağmur ve sağanak yağmur), prosedür II (aşırı büyük malzeme) ve prosedür III (damlama) olarak ayrılmıştır. Prosedür I, dışarıda tutulacak veya kullanılacak ve yağmurdan korumalı veya yağmura karşı korumasız olacak malzeme için kullanılmaktadır. Prosedür II testi, büyük (sığınak/konteyner boyutunda) malzemelerin ve bir sağanak yağmur tesisi mevcut veya pratik olmadığında uygulanmaktadır. Bu prosedür doğal yağmuru simüle etmeyi amaçlamamaktadır ancak malzemenin su geçirmezliğine ispatlamakta güven sağlamaktadır. Prosedür III testi ise, malzemenin normalde yağmurdan korunduğu, ancak yoğunlaşmadan düşen suya veya üst yüzeylerden gelebilecek sızıntıya maruz kaldığı durumun değerlendirilmesi için kullanılmaktadır.

2.18.7. Nem testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre nem testi numarası 507.4'tür. Nem testinin amacı, malzemenin sıcak, nemli bir atmosferin etkilerine karşı direncini belirlemektir. Bu yöntem, sıcak, nemli bir ortamda, yüksek nem seviyelerinin meydana geldiği bir ortamda depolanması veya yerleştirilmesi muhtemel malzemeler için veya nemle ilgili olası sorunların bir göstergesini sağlamak için geçerlidir. Nem testi kendi içerisinde toplam iki alt nem testini içermektedir. Bu testler prosedür I (indüklenmiş (depolama ve taşıma) ve doğal çevrimler) ve prosedür II (ağırlaştırılmış) olarak ayrılmıştır. Prosedür I testi, depolama veya nakliye sırasında meydana gelebilecek koşulları temsil eden 3 farklı çevrim ile ortama açık test ögeleri üzerinde gerçekleştirilen 3 farklı kapsamda doğal çevrimden oluşur. Uygulama sırasında önce depolama ve nakliye, ardından doğal çevrimler gerçekleştirilir. Prosedür I, görece yüksek bir iç nem seviyesine sahip olabilen hava geçirmez şekilde kapatılmış olan malzemeler için uygundur. Prosedür II, test edilen cihazın atmosferik ortamdan daha yüksek sıcaklık ve nem seviyelerine (bozucu unsurlara katkıda bulunmadan), daha kısa süreler için maruz bırakılmaktadır [73]. Nem testi, test ögesi üzerinde geri dönüşü olmayan etkiler yaratabilmektedir. Bu etkiler aynı ürün(ler) üzerinde sonraki testlerin sonuçlarını gerçekçi olmayan bir şekilde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, diğer çevre koşul testlerinden sonra

nem testi gerçekleştirilmelidir. Ayrıca, çevresel etkilerin birleşimi nedeniyle, bu testi daha önce tuz sisi, kum ve toz veya mantar testlerine tabi tutulmuş aynı test numunesi üzerinde yapılması genellikle uygun olmadığı kabul edilmektedir.

2.18.8. Tuz sisi testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre tuz sisi test numarası 509.7'dir. Tuz sisi testi, koruyucu kaplama, cila veya boyaların malzemeler üzerindeki etkinliğini belirlemek için gerçekleştirilmektedir. Tuz birikintilerinin malzemenin fiziksel ve elektriksel yönleri üzerindeki etkilerini belirlemek için de uygulanabilmektedir. Doğal ortamı temsil etmese de, bu test tuz (deniz) ortamıyla ilişkili potansiyel sorunlu alanların bir göstergesini sağlamak için de kullanılmaktadır. Genel olarak, bu yöntem sadece atmosferdeki yüksek seviyelerde tuza önemli ölçüde maruz kalacak (seyrek veya düzensiz olmanın aksine) malzemelere uygulanmalıdır. Tuz birikintileri diğer testlerin sonuçlarını etkileyebilmektedir. Çoğu durumda, tuz sisi testinin diğer çevre koşul testlerinden sonra yapılması önerilmektedir. Bu yöntemin alt kırılım prosedürü bulunmamaktadır. Test esnasında korunması gereken koşullar bulunmaktadır. Bunlar, tuz çözelti yoğunluğu, sıcaklığı, pH derecesi, test süresi, hava sirkülasyonu ve serpinti hızıdır [73].

2.18.9. Toz ve kum testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre toz ve kum testi numarası 510.7'dir. Toz ve kum testi, esen toz veya esen kumun olduğu ortamlara maruz kalma olasılığı bulunan tüm mekanik, optik, elektrik, elektronik, elektrokimyasal ve elektromekanik cihazları (platforma monte edilmiş ve taşınabilir dahil, ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere) değerlendirmek için kullanılmaktadır. Toz ve kum testi, çok çeşitli malzemeleri ve partikül boyutu dağılımlarını içermektedir. MIL-STD-810 toz ve kum testi, çapı 150 µm'den küçük partikülleri toz olarak tanımlamaktadır. Çapı 150 ila 850 µm arasında değişen partikülleri ise kum olarak tanımlamaktadır. Toz ve kum testi kendi içerisinde toplam iki alt test prosedürü içermektedir. Bunlar toz (<150 µm) prosedürü ve kum (150 ila 850 µm partikül boyutu) prosedürü olarak ayrılmaktadır. Toz prosedürü testi, malzemenin açıklıkları engelleyebilecek, çatlaklara, yarıklara, yataklara ve bağlantılara nüfuz edebilecek tozun etkilerine direnme yeteneğini değerlendirmek ve filtrelerin etkinliğini değerlendirmek için yapılmaktadır. Kum prosedürü testi ise, malzemenin, keskin kenarlı partiküllerin aşınma

(erozyon) veya tıkanma etkileri nedeniyle performansı, etkinliği, güvenilirliği ve bakımını bozmadan kum üfleme koşullarında depolanma ve çalıştırılma yeteneğini değerlendirmek için yapılmaktadır [73].

2.18.10. Suya daldırma testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre suya daldırma testi numarası 512.6'dır. Suya daldırma testi, malzemenin suya daldırmaya veya kısmen daldırmaya dayanıp dayanamayacağını ve daldırma sırasında veya sonrasında gerektiği gibi çalışıp çalışmayacağını belirlemek için gerçekleştirilmektedir. Daldırma testi, çalışırken veya çalışmazken, kısmen veya tamamen daldırmaya maruz kalabilecek malzemeler için kullanılmaktadır. Daldırma testi kendi içerisinde toplam iki alt test prosedürünü içermektedir. Bunlar prosedür I (daldırma) ve prosedür II (yüzey geçişi) olarak ayrılmaktadır. Her iki prosedür de bir dereceye kadar daldırma içermekle birlikte, prosedür I (daldırma) esas olarak kaplanmış malzemelerin daldırılması anında sızıntıyı ele alırken, prosedür II (fording, (yüzey geçişi)) bu tür araçlara sabitlenmiş bir su veya malzeme kütlelerinden geçen araçlara odaklanmaktadır [73].

2.18.11. Titreşim testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre titreşim testi numarası 514.8'dir. Titreşim testi, malzemenin bir yaşam döngüsü boyunca maruz kalabileceği titreşim ortamlarının tanımlanması ve laboratuvar titreşim testlerinin yürütülmesi için rehberlik sağlamaktadır. Titreşim testi, cihazın veya sistemin, tüm yaşam döngüsündeki titreşime maruz kalmalarında çalışacağını ve buna dayanacağını doğrulamak için yapılmaktadır. Titreşim testi kendi içerisinde toplam dört alt test prosedürü içermektedir. Bunlar prosedür I (genel titreşim), prosedür II (serbest yük taşımacılığı), prosedür III (büyük parça taşıma) ve prosedür IV (uçığa monte edilmiş harici yükler ve serbest uçuş) olarak ayrılmıştır. Prosedür I (genel titreşim) testi, güvenli kargo olarak taşınacak veya bir araçta kullanılmak üzere yerleştirilecek malzeme için kullanılmaktadır. Bu prosedür, kara araçları ile sabit ve döner kanatlı hava araçları için geçerlidir. Prosedür II (serbest yük taşımacılığı) testi, kamyonlar, römorklar veya paletli araçların içinde/üzerinde taşınacak ve taşıyıcı araca sabitlenmemiş (bağlanmamış) cihazlar veya malzemeler için kullanılmaktadır. Testin şiddeti uyarlanmakla birlikte ve engebeli araziden geçen askeri araçlarda serbest kargo titreşimini temsil

etmektedir. Prosedür III (büyük parça taşıma) testi, tekerlekli veya paletli araçlar tarafından kurulan veya taşınan büyük malzeme gruplarının maruz kaldığı titreşim ve şok ortamını tekrarlamak için kullanılır. Prosedür IV (uçığa monte edilmiş harici yükler ve serbest uçuş) testi ise, tüm uçak yükleri için çevresel yaşam döngülerinin serbest uçuş ve sabit kanatlı uçaklarda taşıma bölümlerinde ve kara veya denizden fırlatılan füzelerin serbest uçuş aşamalarında uygulanmaktadır [73].

2.18.12. Mekanik şok testi

MIL-STD-810 standardı H revizyonuna göre mekanik şok test numarası 516.8'dir. Mekanik şok testi, cihaz veya malzemenin elle taşıma, nakliye ve servis ortamlarında karşılaşılan şoklara dayanımını ve malzemelerin kırılma düzeyini belirlemek için yapılmaktadır. Ek olarak, bir çarpışma durumunda olabilecek platformlara bağlı cihazların dayanımlarının test edilmesi ve malzemenin kendisinin bir tehlike oluşturmadığını veya malzeme parçalarının bir çarpışma durumunda dışarı fırlamadığını doğrulamak için şok testi kullanılmaktadır. Mekanik şok testi toplam sekiz alt test prosedürünü içermektedir. Bunlar Prosedür I fonksiyonel şok, prosedür II nakliye şoku, prosedür III kırılma, prosedür IV transit düşme, prosedür V çarpışma tehlikesi şoku, prosedür VI tezgâhta kullanım, prosedür VII sarkaç darbesi ve prosedür VIII mancınkla fırlatma/tutuklu iniş olarak ayrılmışlardır. Prosedür I, malzemeyi (mekanik, elektrik, hidrolik ve elektronik dâhil) işlevsel modunda test etmeyi ve malzemenin fiziksel bütünlüğünü, sürekliliğini ve şoka karşı işlevselliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Prosedür II, cihaz veya malzemenin, tekrarlayan bir şok yükü oluşturan nakliye ortamlarına tepkisini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Prosedür II, nakliye senaryosunun şok uyarma kısmını temsil etmek için ölçülen veya sentetik bir şok dalga formu olan klasik bir terminal testere dişi kullanılmaktadır. Prosedür III, ambalajlama, istifleme veya montaj konfigürasyonlarının malzemenin fiziksel ve işlevsel bütünlüğünü korumak üzere tasarlanabilmesi için malzemenin kırılma düzeyini belirlemek için ürün geliştirme programının başlarında kullanılmaktadır. Prosedür IV, fiziksel bir düşürme testidir ve dışarda, taşıma çantası ya da saha kullanımı için hazırlanan (savaş durumuna insan, kamyon, demiryolu ile taşınan) malzemeler için tasarlanmıştır. Prosedür V, bir çarpışma sırasında yuvalarından, bağlantılarından veya muhafaza yapılarından kopabilecek ve araçta bulunanlar ve çevredekiler için tehlike oluşturabilecek hava veya kara taşıtlarına monte edilmiş malzemeler içindir. Prosedür VII, büyük nakliye konteynerlerinin yatay darbelere direnme kabiliyetini test etmeyi, ambalaj ve paketleme yöntemlerinin konteyner

etkilendiğinde içindeki cihazları koruma sağlama yeteneğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Prosedür VIII, sabit kanatlı uçakların içine veya üzerine monte edilen malzemeler için tasarlanmıştır [73].

Mekanik şok darbesi genellikle yerçekimi ivmesi olan “g” cinsinden verilmektedir. Genel olarak şok darbesi ne kadar uzun sürerse ve g'lerin sayısı ne kadar yüksekse, sisteme o kadar çok hasar verilmektedir. Bu nedenle sistemler test sırasında yalnızca milisaniyeler içinde etkilenecek şekilde testler yapılmaktadır. Şok testi, düşme veya doğrudan çarpışma değerlendirmelerini kullanarak fiziksel şok, mekanik şok veya darbeyi ölçmektedir. Sistemler, şok test donanımı kullanılarak test ekipmanı üzerinde bir dizi şok darbesine maruz bırakılmaktadır.

2.18.13. TSE IP sızdırmazlık testi

Birçok askeri tasarım için TSE IP sızdırmazlık standardı kullanılmaktadır. Bu standart, mekanik veya özellikle elektronik donanımların mahfazalarla sağlanan koruma derecelerini sınıflandırmak için üretilmiş bir sistemi açıklamaktadır. IP standard için baz alınan doküman TS 3033 olarak belirtilmiştir. Standartta göre bir cihaz veya birime sağlanan koruma derecesi, IP kodu ile gösterilmektedir. IP kod sistemi IP ön ekinin önüne gelen ve birleşik yazılan sayılar ile isteğe bağlı belirlenen harflerden oluşmaktadır. IP23CH bu sisteme örnektir. “2, 3, C ve H” her bir hane bir kodlama ifadesidir ve farklı anlamlara gelmektedir. IP ön ekinden sonra gelen ilk hane birinci karakteristik rakam olarak adlandırılır ve “0 ile 6” arasında rakam değeri veya yalnızca “X” değeri almaktadır. Birincil hane katı cisim korumasına karşı sınıflandırmaları içermektedir. 3 ile belirlenmiş olan hane ikincil karakteristik rakam olarak anılır ve 0 ile 8 arasında rakam değeri veya yalnızca “X” değeri almaktadır. İkincil hane sıvı cisim korumasına karşı sınıflandırmaları içermektedir. C ile belirlenmiş olan hane ilave harf olarak anılır ve “A, B, C ve D” harflerine ait değerleri almaktadır. İlâve harf ile gösterilen ifade, kişilerin tehlikeli bölümlere ulaşmasına karşı korunma seviyesini göstermektedir. H ile belirlenmiş olan son hane, tamamlayıcı harf olarak anılır ve “H, M, S ve W” harflerine ait değerleri almaktadır. Bu harfler cihazın korumasıyla ilgili ek bilgi sağlamak için kullanılmaktadır [74].

2.19. EMI-EMC

EMI, sistemlerin elektromanyetik ortamdan etkilenme durumudur ve elektromanyetik girişim olarak adlandırılmaktadır. EMC ise, sistemlerin elektromanyetik bir ortamda bir girişime neden olmadan veya girişimden etkilenmeden çalışmaya devam etmesidir ve elektromanyetik uyumluluk olarak adlandırılmaktadır. Birbirine yakın veya birarada çalışan elektronik sistemler, performans kaybı yaşayabilecek veya sistemleri kapatabilecek EMI yayma veya EMI'ye duyarlı olma eğilimine sahiptirler. Bu nedenle askeri sistem tasarımlarında ve platform entegrasyonlarında EMI/EMC, sağlanması gereken bir özellik olarak geçmektedir. Askeri bir sistem tasarımının elektromanyetik uyumluluğunu test edebilmek için MIL-STD-461 standardı kullanılmaktadır. MIL-STD-461'e göre elektromanyetik testler dört ana gruba ayrılmaktadır ve testler C, R, E ve S harfleri ile temsil edilmektedir. Bu duruma göre, "C" harfi iletkenlik (Conducted), "R" harfi ışıma (Radiated), "E" harfi yayınım (Emission) ve "S" harfi alınganlık (Susceptibility) olarak ifade edilmektedir. Temsil edilen harflerden yola çıkılarak ayrımları yapılan temel test grupları Çizelge 2.34 ile verilmiştir.

Çizelge 2.34. MIL-STD-461'e göre temel test grupları

Test Grubu	Açıklama
RE (Işıma yoluyla yayınım)	Test ögesinin dış ortama ışıma ile yapmış olduğu yayınım seviyesi ölçülmektedir.
RS (Işıma yoluyla alınganlık)	Test ögesine ışıma yoluyla gelen istenmeyen işaretlerin test ögesinin çalışması veya performansında bozulmaya neden olup olmadığı test edilmektedir.
CE (İletkenlik yoluyla yayınım)	Test ögesinin dış ortama güç ve işaret kabloları yoluyla yapmış olduğu yayınım seviyesi ölçülmektedir.
CS (İletkenlik yoluyla alınganlık)	Test ögesine güç ve işaret kabloları yoluyla gelen istenmeyen işaretlerin test ögesinin çalışmasında veya performansında bozulmaya neden olup olmadığı test edilmektedir.

MIL-STD-461 standardının G revizyonuna göre toplam 19 elektromanyetik test prosedürü bulunmaktadır. Bu testler RS, RE, CS ve CS harf düzenlemelerinin sonuna eklenen üç basamaklı sayılar ile ifade edilmektedir. Çizelge 2.35 ile elektromanyetik testlerin tanımları ve standardın E, F ve G revizyonlarına ait test bilgileri bulunmaktadır. Çizelge 2.35 ayrıca test prosedürlerinin uygulanması ile test ögelerinin maruz kaldığı frekans bilgileri de içermektedir. Test ögesinin maruz bırakılacağı test prosedürünün seçilmesi söz konusu olduğunda çizelgenin dikkate alınması gerekmektedir.

Çizelge 2.35. EMI/EMC test gereksinimleri

Gereksinim Testi	Açıklama	Frekans	Reviyon bilgisi
CE101	İletkenlik Yoluyla Yayınım, Ses Frekans Akımları, Güç Hatları,	30 Hz-10 kHz	E-F-G
CE102	İletkenlik Yoluyla Yayınım, Radyo Frekans Potansiyelleri, Güç Hatları	10 kHz-10 MHz	E-F-G
CE106	İletkenlik Yoluyla Yayınım, Anten Terminali	10 kHz-40 GHz	E-F-G
CS101	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Güç Hatları	30 Hz-150 kHz	E-F-G
CS103	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Anten Girişi, İntermodülasyon	15 kHz-10 GHz	E-F-G
CS104	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Anten Girişi, İstenmeyen İşaretlerin (Sinyal) Bastırılması	30 Hz-20 GHz	E-F-G
CS105	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Anten Girişi, Çapraz Modülasyon	30 Hz-20 GHz	E-F-G
CS106	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Güç Hatları	-	Sadece F
CS109	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Yapı Akımı	60 Hz-100 kHz	E-F-G
CS114	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Kablo Enjeksiyonu	10 kHz-200 MHz	E-F-G
CS115	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Kablo Enjeksiyonu, Darbe	-	E-F-G
CS116	İletkenlik Yoluyla Alınanlık, Bastırılmış Sinüsoid Geçişler, Kablolar ve Güç Hatları	10 kHz-100 MHz	E-F-G
CS117	Yıldırım Kaynaklı Geçiciler, Kablolar ve Güç Kabloları	-	Sadece G
CS118	Yürütülen Duyarlılık, Personel Elektrostatik Deşarj	-	Sadece G
RE101	İşıma Yoluyla Yayınım, Manyetik Alan	30 Hz-100 kHz	E-F-G
RE102	İşıma Yoluyla Yayınım, Elektrik Alanı	10 kHz-18 GHz	E-F-G
RE103	İşıma Yoluyla Yayınım, Anten Harmonik Çıkışları	10 kHz-40 GHz	E-F-G
RS101	İşıma Yoluyla Alınanlık, Manyetik Alan	30 Hz-100 kHz	E-F-G
RS103	İşıma Yoluyla Alınanlık, Elektrik Alanı	2 MHz-40 GHz	E-F-G
RS105	İşıma Yoluyla Alınanlık, Geçici Elektromanyetik Alan		E-F-G

EMI/EMC testleri, test kapsamına bağlı olarak test öğelerinin dış ortam birimlerinden kaynaklı elektromanyetik alandan etkilenmemesi için izolasyonlu (ekranlı) odalarda yapılmaktadır. Örnek bir izolasyon sağlanmış oda Şekil 2.37 ile verilmektedir.



Şekil 2.37. EMI/EMC testleri için izole, yansıtmasız oda örneği, ASELSAN [75]

MIL-STD-461 standardında verilen testler, tıpkı çevre koşulları testleri gibi platforma göre seçilerek uygulanmaktadır.

Çizelge 2.36 ile platform bazlı uygulanması önerilen EMI/EMC test prosedürleri verilmektedir. Bu çizelgeye göre, platformlara bağlı olarak test prosedürlerinin uygulanabilirliği listelenmiştir. Çizelgeye göre “A” harfi ile belirtilen testler ilgili platforma uygulanabilir olduğunu, “L” ile temsil edilen testler standardın ilgili bölümlerinde uygun olarak ifade edildiği şekilde limitli olduğunu ve “S” ile temsil edilen testler ise tedarik makamının (müşterinin) uygulanabilirlik ve limit gereksinimlerini şartnamede tanımlaması gerektiğini ifade etmektedir.

Çizelge 2.36. Gereksinim matrisi [76]

Kurulum Yapılan Platformlar	Uygulama Gereksinimi																		
	CE101	CE102	CE106	CS101	CS103	CS104	CS105	CS109	CS114	CS115	CS116	CS117	CS118	RE101	RE102	RE103	RS101	RS103	RS105
Gemiler	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	A	L	S	A	A	L	L	A	L
Denizaltılar	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	L	S	S	A	A	L	L	A	L
Kara Kuvvetlerine Bağlı Hava Araçları	A	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	A	A	A	L	A	A	L
Deniz Kuvvetlerine Bağlı Hava Araçları	L	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	A	L	A	L	L	A	L
Hava Kuvvetlerine Bağlı Hava Araçları	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	A	-	A	L	-	A	-
Uzay sistemleri, Fırlatma Araçları Dahil	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	L	-	-	A	L	-	A	-
Kara Kuvvetlerine Bağlı Kara Araçları	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	S	A	-	A	L	L	A	-
Deniz Kuvvetlerine Bağlı Kara Araçları	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	S	A	-	A	L	L	A	L
Hava Kuvvetlerine Bağlı Kara Araçları	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	A	-	A	L	-	A	-

2.20. Titreşim ve Şok İzolatörleri

Cihaz veya sistemlerde platformdan gelen titreşim ve şok yüklerinin etkilerinden korunma için şok ve titreşim izolatörü şeklindeki titreşim kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Esnek yapıya sahip olan titreşim izolatörleri, üzerine gelen enerjiyi, cihaz veya destek yapısındaki yükün azaltılmasını sağlayan bir zaman aralığında depolamaktadır. Deniz sistemlerinde özellikle dalga şoku etkisinin, motordan gelen titreşimlerin yalıtılabilmesi için kullanılmaktadır. İzolatörler, farklı yük taşıma kapasiteleri, deplasmanları, doğal frekansları ve çeşitli uygulamaları ile geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. İzolatörler sönümleme malzemesi tipine göre tel halka (wire rope) izolatörler, elastomerler (neoprene, silikon, butil vb.), yay izolatörler ve köpük (foam) tipinde olabilmektedir. Çizelge 2.37 ile izolatör çeşitleri açıklanmaktadır.

Çizelge 2.37. Genel izolatör tipleri [77]

İzolatör Tipi	Açıklama
Tel Tipi	Titreşim ve özellikle şok sönümleme amacıyla kullanılabilen ve genellikle 0,1 kg'dan 5000 kg'a kadar taşıma kapasitesi mevcut olan izolatörlerdir. Askeri sistem tasarımlarında, titreşim veya şok etkisinin izole edilmesi gereken yerlerde kullanılmaktadır. Bununla birlikte fazla yer kaplaması ve bazı durumlarda çok salınımlı olması problem oluşturabilmektedir.
Elastomer	Yüksek enerji depolama kapasiteleri ve herhangi bir şekle göre kalıplama kolaylığı, yeterli şok izolasyonu için gereken doğrusallık veya doğrusal olmayanlığın elde edilmesini mümkün kılması nedeniyle, şok izolatörlerinde kullanım için iyi bir şekilde uyarlanmıştır. Doğal veya sentetik kauçuklar mühendislik uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır.
Yay Tipi	Metal yaylar titreşim izolasyonunda kullanılabilirler. Helezon yayların avantajı, gerekli direngenlik özelliğini seçmede serbestlik sağlamalarıdır. Dikey direngenliğin yatay direngenliğe olan oranı helezon yaylarla rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Bunun aksine, yaylar yüksek frekanslı tahriklerde transmisyon yolu olarak davranır ve gürültü oluşumuna sebep olur.
Köpük Tipi	Elektronik ekipmanların şok yalıtımında kullanılmaktadırlar. Koruyucu yastık olarak veya aralayıcı olarak kullanılabilirler. İnce olanları; baskı devre kartların çarpmasını engellemek amacıyla kullanılabilirler. LCD'lerin çatlamasını engellemek için de kullanılmaktadır. Elektronik uygulamalar için silikon yapılı olanları diz üstü bilgisayarların yapısında yer alan kırılabilir parçaların korunması amacıyla kullanılmaktadır.

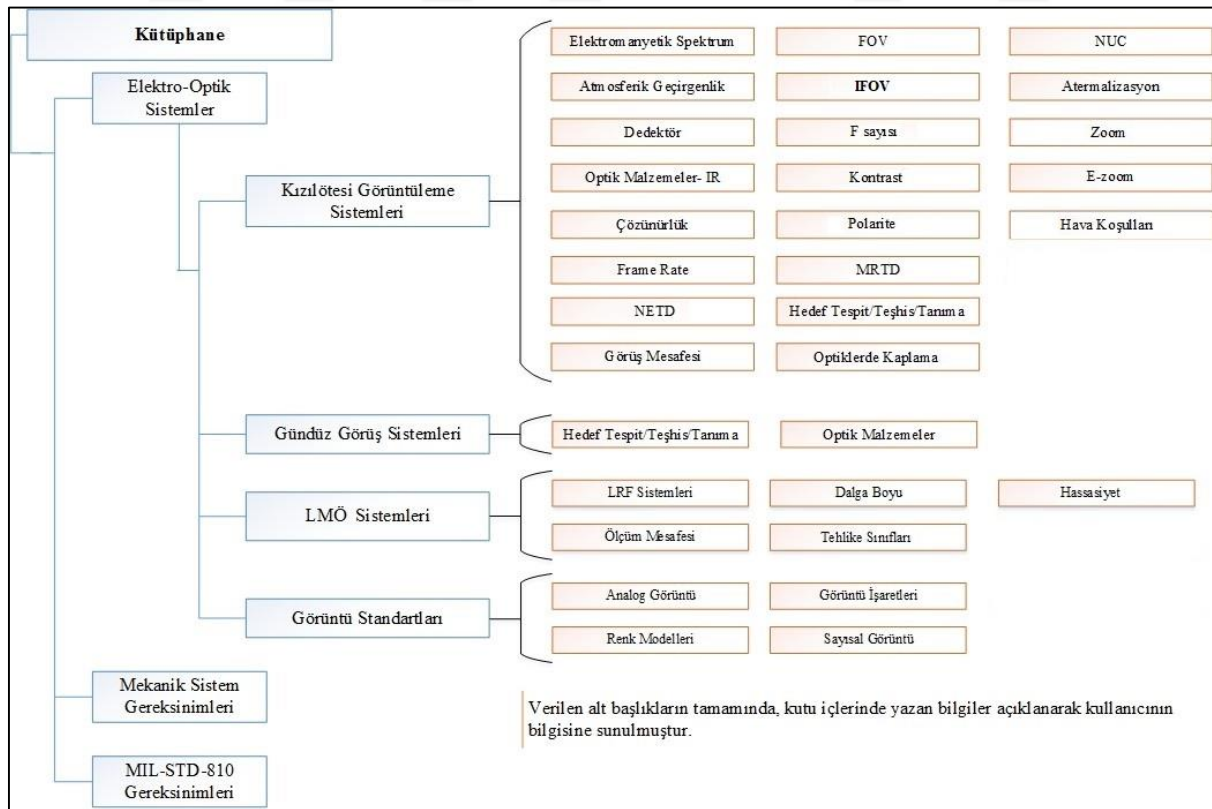


3. PROGRAM TASARIM YÖNTEMLERİ

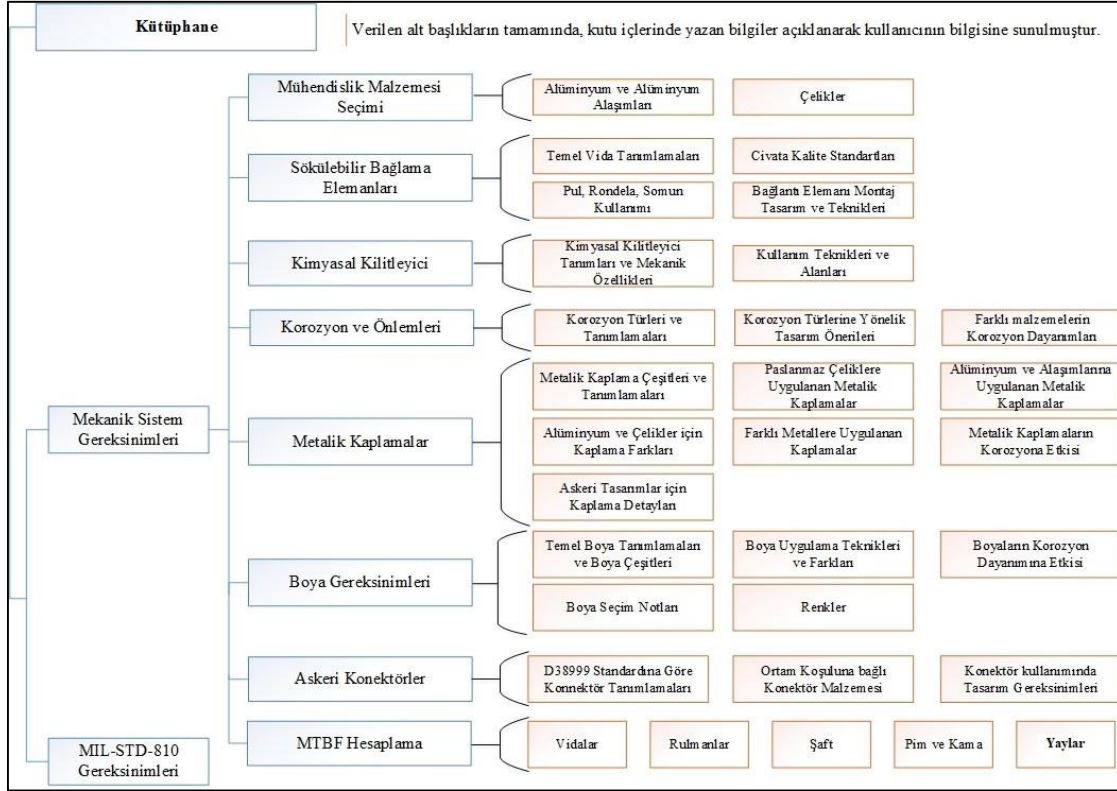
Bu bölümde elektro-optik sistemlerin platform entegrasyonunda referans olarak kullanılması için hazırlanan tasarım programının içeriği anlatılmaktadır.

3.1. Programlama Yöntemi ve Alt Yapısı

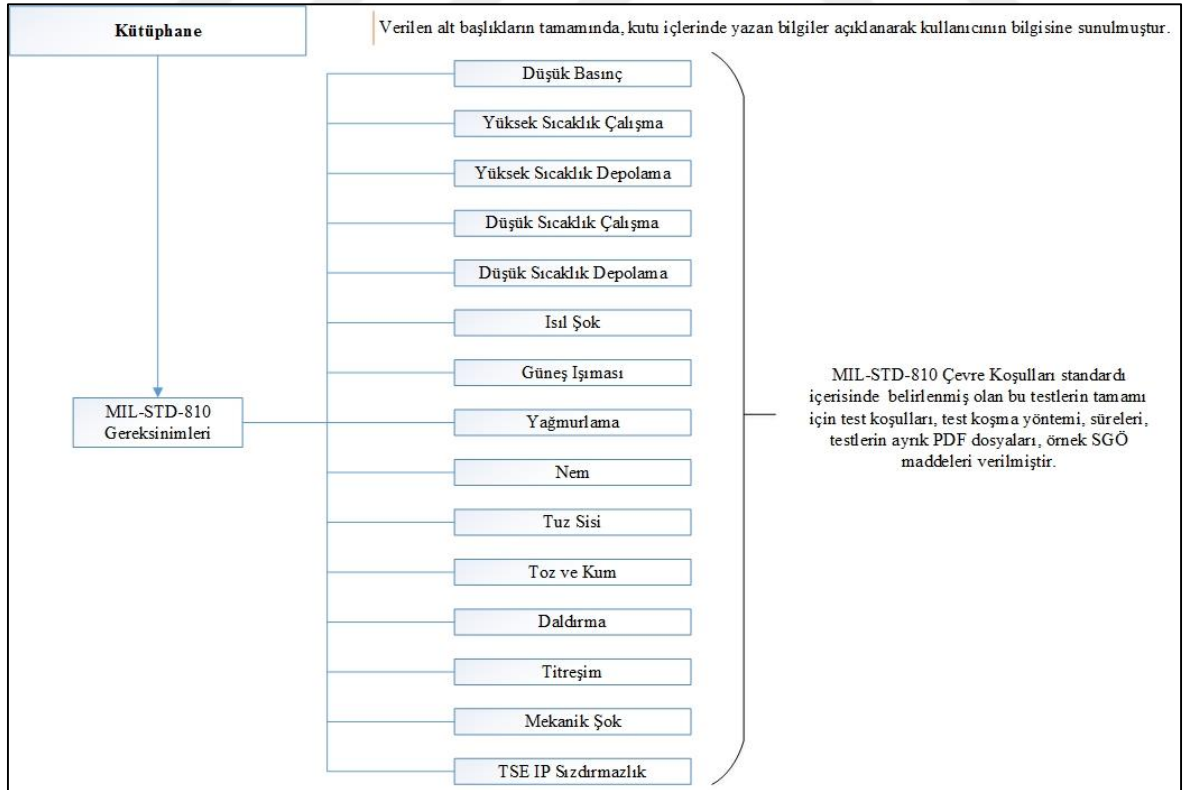
Programın kütüphane bölümü, elektro-optik sistem gereksinimleri, mekanik sistem gereksinimleri ve çevre koşul gereksinimleri olmak üzere üç ana başlığı ve bu başlıkların içerisinde ayrılmış detay başlıklardan oluşmaktadır. Bu kırımlar elektro-optik sistemler için Şekil 3.1’de, mekanik sistem gereksinimleri için Şekil 3.2’de ve çevre koşul gereksinimleri için Şekil 3.3’te verilmiştir. Kütüphane bölümü içerisine mekanik elemanların MTBF (Hatalar Arası Ortalama Süre) hesaplama formülleri gömülerek kullanıcının mekanik birimleri için MTBF hesaplaması yapmasına olanak verilmiştir. Ek olarak titreşim ve şok izolatörü seçimi için gereken hesaplama önerileri ve formülleri program hesaplama methodlarına eklenmiştir.



Şekil 3.1. Program kütüphanesi EO sistemler kırım ağaç yapısı



Şekil 3.2. Program kütüphanesi mekanik sistem gereksinimleri kırılım ağaç yapısı



Şekil 3.3. Program kütüphanesi çevre koşulları gereksinimleri kırılım ağaç yapısı

Program kullanıcı arayüzü, kullanıcının doğru ve eksiksiz bir şekilde sistem tasarımını oluşturabilmesini sağlamak için kullanıcıya genel sistem ihtiyaçları, mekanik sistem ihtiyaçları ve çevre koşulları için sorular yöneltilmektedir. Bu doğrultuda her soru için konuya uygun cevap seçenekleri sunmaktadır. Arayüzde, soru sorulduğunda aktif olan, cevap seçiminin platforma ve sistem yaşam koşullarına uygun şekilde yapılabilmesi için sorulan soru konusu hakkında kullanıcıya pratik tasarımsal bilgilendirmelerin yapıldığı bir bölüm bulunmaktadır. Bu sayede kullanıcının çalışma platformuna uygun seçeneğe karar verebilmesi sağlanmaktadır. Seçilen seçeneğe göre sistem gereksinim özellikleri dokümanına etki eden veya gereksinim maddesi olarak yazılması istenen cümleler kullanıcıya gösterilmektedir. Kullanıcıya bu doğrultuda, gösterilen maddelerden gereksinim dokümanına girmesini istediği maddeyi ekleyip veya sonradan istemediği maddeleri silebilmesini sağladığı bir alan ayrılmıştır. Bu alan aynı zamanda tasarım için oluşturulan gerekli maddeleri PDF dosyası olarak çıktı alabilmektedir. Kullanıcı arayüzü aynı zamanda kütüphane bölümüyle de bağlantılı olup, sorulan soru veya cevap ile ilgili bilgi edinme gereksinimi duyulduğunda kullanıcının kütüphaneye ulaşabilmesi sağlanmıştır. Sadece gereksinim maddeleri oluşturmak için değil, genel montaj ve platform entegrasyon ihtiyaçları için tasarım önerileri kullanıcı arayüzüne bağlanmış olup program kullanıcısının bu önerilerin tamamına ulaşması kullanıcı arayüzünden sağlanabilmektedir. Resim 3.1 ile program kullanıcı arayüzü verilmiştir. Bu şekle göre;

- “1” ile işaretlenmiş bölüm kullanıcıya yöneltilen soruları,
- “2” ile belirtilmiş olan bölüm soruya göre verilen tasarımsal bilgilendirmeleri,
- “3” ile verilmiş olan bölüm soruya ait seçenekleri,
- “4” ile belirtilmiş olan bölüm seçilen seçeneğe yönelik SGÖ dokümanına yansıtılacak olan maddeyi,
- “5” ile belirtilmiş olan bölüm SGÖ de yazması istenilen, biriktirilmiş madde alanını,
- “6” ile belirtilmiş olan bölüm kullanıcı arayüzünün kütüphane bağlantısını,
- “7” ile belirtilmiş olan bölüm kullanıcıya sunulan tüm tasarım önerilerini içeren sayfaya bağlantısını,
- “8” ile belirtilmiş olan bölüm SGÖ maddeleri alanından çıkarılması istenen maddeyi silmeyi,
- “9” ile belirtilmiş olan bölüm ise SGÖ maddelerinin PDF çıktısının alınmasını temsil etmektedir.

Resim 3.1. Program kullanıcı arayüzü görünümü

Tasarım programının tamamı Microsoft Office Excel kullanılarak hazırlanmıştır. Hem kütüphane arayüzü hem de kullanıcı arayüzü için kodlamaların tamamı excel macro üzerinden yazılmıştır.

3.2. Kullanıcı Arayüzü Gereksinimleri

Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3 içerisinde kullanıcı arayüzünde kullanıcıya yöneltilen soru maddeleri, cevap seçenekleri ve seçilecek seçeneğin sistem gereksinim özellikleri dokümanına yansıyan etkisi görülmektedir.

Çizelge 3.1. EO sistem gereksinimleri için program soruları ve örnek maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler	Seçim Girdilerinin SGÖ Dokümanına Etkisi
1.	Termal sisteminin kamera çalışma dalga boyunu seçiniz.	1- Dalga boyu SWIR: 0,9-2,5 μm	Sistemde “SWIR” dedektör kullanılacaktır.
		2- Dalga boyu MWIR: 3-5 μm	Sistemde “MWIR” dedektör kullanılacaktır.
		3- Dalga boyu LWIR: 8-12 μm	Sistemde “LWIR” dedektör kullanılacaktır.
2.	Termal dedektör soğutma durumu bilgisini seçiniz.	1- Soğutmasız: 0,9-2,5 μm	Dedektör, 0,9-2,5 μm aralığında soğutmasız çalışır yapıda olacaktır.
		2- Soğutmalı, 3-5 μm	Dedektör, 3-5 μm aralığında soğutmalı çalışır yapıda olacaktır.
		3- Soğutmalı, 8-12 μm	Dedektör, 8-12 μm aralığında soğutmalı çalışır yapıda olacaktır.

Çizelge 3.1. (Devam) EO sistem gereksinimleri için program soruları ve örnek maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler	Seçim Girdilerinin SGÖ Dokümanına Etkisi
3.	Soğutmalı dedektör seçildiyse, dedektör tarama durum bilgisini seçiniz.	1- Taramalı, SPRITE FPA (Odak Düzlem Matrisi) 2- Taramasız, STARING FPA (Odak Düzlem Matrisi)	Dedektör taramalı odak düzlem matrisine sahip olacaktır. Dedektör taramasız odak düzlem matrisine sahip olacaktır.
4.	Taramasız FPA seçildiyse, termal kamerada kullanılacak olan dedektör piksel (eleman) sayısı ve piksel aralığını giriniz.	640 x 512, 15 µm 640 x 512, 20 µm 640 x 512, 24 µm 640 x 480, 20 µm 320 x 256, 30 µm Değer giriniz.	Dedektör, 640 x 512 çözünürlükte ve 15 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, 640 x 512 çözünürlükte ve 20 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, 640 x 512 çözünürlükte ve 24 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, 640 x 480 çözünürlükte ve 20 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, 320 x 256 çözünürlükte ve 30 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, "... x ..." çözünürlükte ve "..." µm piksel aralığında olacaktır.
5.	Taramalı FPA seçildiyse, termal kamerada kullanılacak olan dedektör piksel (eleman) sayısı ve piksel aralığını giriniz.	288x4 288x7 480x6 576x7 Değer giriniz.	Dedektör, 288 x 4 çözünürlükte ve 15 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, 288 x 7 çözünürlükte ve 15 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, 480 x 6 çözünürlükte ve 15 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, 576 x 7 çözünürlükte ve 15 µm piksel aralığında olacaktır. Dedektör, "... x ..." çözünürlükte ve 15 µm piksel aralığında olacaktır.
6.	Termal sistem f sayısını seçiniz.	1- F/1 2- F/2 3- F/4 4- F/5,5 5- Değer giriniz.	Termal kamera sistemi, F/1 optik açıklığa sahip olacaktır. Termal kamera sistemi, F/2 optik açıklığa sahip olacaktır. Termal kamera sistemi, F/4 optik açıklığa sahip olacaktır. Termal kamera sistemi, F/5,5 optik açıklığa sahip olacaktır. Termal kamera sistemi, "..." optik açıklığa sahip olacaktır.

Çizelge 3.1. (Devam) EO sistem gereksinimleri için program soruları ve örnek maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler	Seçim Girdilerinin SGÖ Dokümanına Etkisi
7.	Dedektör NETD değerini seçiniz.	1- <20 mK 2- <25 mK 3- <30mK 4- <50mK	Termal kamera dedektör NETD (sıcaklık farkı algılama) değeri en fazla 20mK olacaktır. Termal kamera dedektör NETD (sıcaklık farkı algılama) değeri en fazla 25mK olacaktır. Termal kamera dedektör NETD (sıcaklık farkı algılama) değeri en fazla 30mK olacaktır. Termal kamera dedektör NETD (sıcaklık farkı algılama) değeri en fazla 50mK olacaktır.
8.	Termal kameraya ait STANAG 4347 menzil performans isterini seçiniz.	1- 1,8 m x 0,5 m insan hedef tespit 2- 2,3 m x 2,3 m araç hedef tespit	Termal kamera STANAG 4347’de tanımlanan iyi hava şartlarında 1,8x0,5m insan hedefini en az “x” mesafeden tespit (detection), “y” km mesafeden teşhis (recognition) edebilecektir. Termal kamera STANAG 4347’de tanımlanan iyi hava şartlarında 2,3x2,3m araç hedefini en az “x” km mesafeden tespit (detection), “y” km mesafeden teşhis (recognition) edebilecektir.
9.	Termal kamera sistemi pencere optiği ve kaplaması için malzeme seçimi yapınız.	1- Germanyum 2- Silikon 3- Çinko-Sülfür 4- Çinko-Selenid 5- Malzeme Belirtmeden Seçim	Termal kamera, 8-12 µm dalga boyu aralığında çalışacak şekilde optik malzemeye ve optik kaplamaya sahip olacaktır. Termal kamera, 8-12 µm dalga boyu aralığında çalışacak şekilde yantısız kaplamayla kaplanmış germanyum dış pencereye sahip olacaktır.
10.	Gündüz kamerada kullanılacak olan çözünürlük isterini ve görüntüleme rengini giriniz.	1920 x 1080, renkli 640 x 512, siyah beyaz	Gündüz Kamera görüntüsü renkli ve görüntü çözünürlüğü 1920x1080 olacaktır.
11.	Gündüz kamera odaklama mesafesini seçiniz.	1- Dar:25m, Geniş 2 m 2- Dar:50 m, Geniş 5m 3- Giriniz.	Gündüz kamera odaklama mesafesi bakış açısı dar iken 50m ile sonsuz aralığında, geniş bakış açısında iken 5m ile sonsuz aralığında olacaktır.
12.	Gündüz kamera lens açıklığını seçiniz.	1- F/1.4 2- F/2 3- Giriniz.	Gündüz kamera sistemi, F/1.4 lens açıklığına sahip olacaktır.

Çizelge 3.1. (Devam) EO sistem gereksinimleri için program soruları ve örnek maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler	Seçim Girdilerinin SGÖ Dokümanına Etkisi
13.	Gündüz kameraya ait STANAG 4347 menzil performans isterini seçiniz.	1- 1,8 m x 0,5 m insan hedef tespit 2- 2,3 m x 2,3 m araç hedef tespit	Gündüz kamera STANAG 4347’de tanımlanan iyi hava şartlarında 1,8x0,5m insan hedefini en az “x” mesafeden tespit (detection), “y” km mesafeden teşhis (recognition) edebilecektir. Gündüz kamera STANAG 4347’de tanımlanan iyi hava şartlarında 2,3 x 2,3m araç hedefini en az “x” km mesafeden tespit (detection), “y” km mesafeden teşhis (recognition) edebilecektir.
14.	Lazer Mesafe Ölçer çalışma dalga boyunu seçiniz.	1- 860 nm 2- 1060 nm 3- 1540 nm. 4- Giriniz.	LMÖ lazer kaynağının dalga boyu 860 nm olacaktır. LMÖ lazer kaynağının dalga boyu 1060 nm olacaktır. LMÖ lazer kaynağının dalga boyu 1540 ±40 nm olacaktır. LMÖ lazer kaynağının dalga boyu “...” nm olacaktır.
15.	LMÖ tehlike sınıfını belirleyiniz.	1- Sınıf I 2- Sınıf II 3- Sınıf III 4- Sınıf IV	Lazer Mesafe Ölçer IEC 60825-1 Ed 1.2 (2001-08) Sınıf 1’e uygun göze zararsız tip olacaktır. Lazer Mesafe Ölçer IEC 60825-1 Ed 1.2 (2001-08) Sınıf 2’e uygun tipte olacaktır. Lazer Mesafe Ölçer IEC 60825-1 Ed 1.2 (2001-08) Sınıf 3’e uygun tipte olacaktır. Lazer Mesafe Ölçer IEC 60825-1 Ed 1.2 (2001-08) Sınıf 4’e uygun tipte olacaktır.
16.	LMÖ’ye ait STANAG 4347 menzil ölçüm mesafesini giriniz.	1- 1,8 m x 0,5 m insan hedef tespit 2- 2,3 m x 2,3 m araç hedef tespit	LMÖ, STANAG 4347’de tanımlanan iyi hava şartlarında en az “x” m ile “y” m arasındaki mesafeyi en fazla ±5 m doğrulukla tespit edebilecektir.

Çizelge 3.2. Mekanik sistem gereksinimleri için program soruları ve maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler	Seçim Girdilerinin Tasarıma Etkisi
1.	Alt birim tasarımında kullanılacak malzemeyi veya malzemeleri seçiniz.	1- Al 6061 T6 2- Al 2024 T3 3- Al 5083 O 4- Al 5083 H112 5- Al 7075 T6 6- Paslanmaz Çelik 316 7- Paslanmaz Çelik 316 L 8- Paslanmaz Çelik 304 9- Paslanmaz Çelik 304 L	- Alüminyum alaşımların arasında, 5XXX serisi deniz suyuna karşı en yüksek dirence sahiptir ve diğer istenen özellikleri göz önüne alındığında, deniz uygulamaları için en yaygın kullanılanlardır. - İç ortam ve kara platform birimlerinde en yaygın kullanılan alüminyum alaşımı ise 6061 T6'dır. 316 paslanmaz çelik 302 ve 304'e göre daha iyi korozyon dayanımına sahiptir, 316 L ise 316'ya benzer, ancak kaynak veya gerilim giderme sonrasında taneler arası korozyona karşı da üstün dirence sahiptir. 304 ise 302'den daha iyi korozyon direncine sahiptir.
2.	Sökülebilir bağlantı elemanı malzemesi seçiniz.	Cıvata Pul Somun	- Korozyona uğrama ihtimali olan iç veya dış mekanlarda A4 kalite paslanmaz çelik kullanılmalıdır - Korozyona uğrama ihtimali olmayan iç alanlarda A2 veya A4 kalite paslanmaz çelik kullanılmalıdır.
3.	Sökülebilir bağlantı elemanı kullanım durumu seçiniz.	Cıvata Pul Somun	- Galvanik korozyon hızının azaltılması için somun malzemesinin vida malzemesi ile aynı seçilmesi gerekmektedir. - Genel korozyon hızının düşürülmesi için açıkta kalan kısma korozyon önleyici kimyasal yağlama ürünleri kullanılmalıdır. - Titreşim problemi bulunan noktalarda yapılacak olan bağlantılarda kilitli somunlar ve yaylı pul kullanılması gerekmektedir. Ayrıca vida kitleyici kimyasal kullanımı gerekmektedir. - Kaplama zararı meydana gelmemesi için, yüzey kaplamasını veya yüzey boyasının kalkmaması için düz pul kullanılması gerekmektedir. - Alüminyum malzemelere dış açıldığında mutlaka helicoil kullanılmalıdır.

Çizelge 3.2. (Devam) Mekanik sistem gereksinimleri için program soruları ve maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler	Seçim Girdilerinin Tasarıma Etkisi
4.	Vida kilitleyici kimyasal kullanımı için uygun olan kilitleyiciyi seçiniz.	Loctite 221 Loctite 242 Loctite 243 Loctite 270	▪ Küçük çaplı veya dış kısmı uzun bağlantı elemanları için Loctite 221 kullanılmalıdır. ▪ Sınırlı sökülecek olan dişli bağlantılar için Loctite 242 veya 243 kilitleyiciler tercih edilmelidir. ▪ Sökülmesi gerekmeyen mekanik bağlama elemanlarının kilitlenmesi için loctite 270 kullanılmalıdır.
5.	Korozyona yönelik tasarım için gereken malzeme tasarım önerilerini seçiniz.	Galvanik korozyon Paslanmaz Çelikler Alüminyum Malzeme	▪ Galvanik seride birbirine en yakın çiftler seçilmelidir. ▪ Paslanmaz çelikler arasında korozyon direnci en yüksek sayılanlarda birisi sıklıkla kullanılan AISI 316 serisidir.
6.	Askeri konektör Kullanımı için tasarım önerilerini seçiniz.	Konektör Malzemesi	▪ Deniz platformlarında korozyona karşı önlem için malzeme sınıfının “K” olarak belirlenmesi gerekmektedir. ▪ Malzemesi bronz veya paslanmaz çelik olmayan konektörleri korozyona karşı korumak için üzerlerine silikon bant ve sıvı neoprene uygulayınmalıdır ▪ Kara platformları, orta seviye bir korozyona maruz kalmayacağı düşünülen veya iç ortamlarda kullanılacak alüminyum, olive drab kadmiyum nikel kaplama konektör kullanılmalıdır. ▪ SMA tipi konektörler dış ortamda kullanılacak birimlerde kullanılmamalıdır. ▪ Güç hattı taşıyan kablo üzeri konektörlerin, herhangi bir yere çarpıp, düşüp veya açıkta bırakılması ihtimaline karşı konektörler pinlerinin kısa devre oluşturmaması için dışı tipte seçilmesi önerilmektedir.

Mekanik sistem gereksinimleri için belirlenen sorular için cevap seçenekleri Bölüm 3.3 içerisinde detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çevre koşul gereksinimleri için program soruları ve maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler		Seçim Girdilerinin SGÖ Dokümanına Etkisi
1.	Uygulanacak MIL-STD-810 Askeri çevre koşul test prosedürünü seçiniz.	Düşük Basınç	MIL-STD-810H Method 500.6	Birim, 660 mbar (~3500 m) basınç altında “MIL-STD-810H Method 500.6’e uygun olarak görev yapabilecektir.
		Yüksek Sıcaklık	MIL-STD-810H Method 501,7	Birim MIL-STD-810H, Metod 501.7 Prosedür I’e göre +65oC’de depolanabilecektir. Birim MIL-STD-810H, Metod 501.7 Prosedür II’ye göre +55°C’de çalışabilecektir.
		Düşük Sıcaklık	MIL-STD-810H Method 502,7	Birim MIL-STD-810H, Metod 502.7 Prosedür I’e göre -40°C’de depolanabilecektir. Birim MIL-STD-810H, Metod 502.7 Prosedür II’ye göre -32°C’de çalışabilecektir.
		Isıl Şok	MIL-STD-810H Method 503,7	Birim çalışmaz durumda iken, MIL-STD-810H, Metod 503.7, Prosedür I-C uyarınca -40°C ile +70°C arasında sıcaklık şoklarına maruz bırakıldıktan sonra çalışacaktır.
		Güneş Işıması	MIL-STD-810H Method 505.6	Birim, MIL-STD-810H Metod 505.6 Prosedür I Kategori A1’de tanımlanan güneş yükü altında çalışmaya uygun olacaktır.
		Yağmur	MIL-STD-810H Method 506.6	Birim, MIL-STD-810H, Metod 506.6, Prosedür I’e uygun olarak 10cm/saat yağmur altında işletmeye uygun olacaktır.
		Nem	MIL-STD-810H Method 507.6	Birim MIL-STD-810H, Metod 507.6 Prosedür II’ye göre +30°C (artı otuz) ile +60°C (artı altmış) sıcaklık aralığında bağıl nem oranı %95 olan bir ortamda bekletildiğinde zarar görmeyecek ve fonksiyonlarında bir eksiklik olmaksızın çalışabilecektir.
		Tuz Sisi	MIL-STD-810H Method 509.7	Birim, MIL-STD-810H w/Change 1, Method 509.7’ya %5’lik NaCl çözeltisi tarafından oluşturulan tuz sisi uygun olacak şekilde maruz bırakıldıktan sonra çalıştırılacak ve hasar görmeyecektir. Test esnasında konektörleri/vidaları takılı olacaktır.
		Toz ve Kum	MIL-STD-810H Method 510.7	Birim, MIL STD 810H Method 510.7 Yöntem II’e uygun olarak kumlu ortamlarda görev yapabilecektir. Kumlu ortamda optik camlar toz koruma filtresi ile kaplanacaktır.

Çizelge 3.3. (Devam) Çevre koşul gereksinimleri için program soruları ve maddeleri

Sıra No.	Kullanıcıya Yöneltilen Soru	Kullanıcıya Sunulan Seçenekler		Seçim Girdilerinin SGÖ Dokümanına Etkisi
	Uygulanacak MIL-STD-810 Askeri çevre koşul test prosedürünü seçiniz.	Daldırma	MIL-STD-810H Method 512.6	Birim, 30 dk süre ile 4m'ye kadar su derinliğine "MIL-STD-810H Method 512.6 Procedure I'e göre daldırılabilir.
		Titreşim	MIL-STD-810H Method 514.8	Sistem, MIL STD 810G, Method 514.6, Category 4, Composite wheeled vehicle vibration exposure, Table 514.6C-VI testi veya eşdeğer testte belirtilen gereksinimleri sağlayacaktır.
		Mekanik Şok	MIL-STD-810H Method 516.8	Birim, MIL-STD-810H Method 516.8'e uygun olarak fonksiyonel şoktan etkilenmeyecektir.
		TSE IP Sızdırmazlık	TSE 3033	Birim TSE 3033'e göre IP65 sızdırmazlığa sahip olacaktır.
2.	MTBF hesabı yapılacak olan elemanı seçiniz.	▪ Vidalar ▪ Rulmanlar ▪ Şaft ▪ Pim ▪ Kama ▪ Yaylar		Seçimi yapılan eleman için tasarım programı içerisinde yer alan hesaplama arayüzü çalıştırılmalıdır. Gereken girdi verileri programa işlendikten sonra mekanik elemanın MTBF sonucu tasarım dokümanlarına yazılmalıdır.

3.3. Mekanik Sistem Gereksinim Önerileri

3.3.1. Malzeme seçimi

- Kullanılacak malzemeler, ürün kullanımının amaçlandığı platforma uygun seçilmelidir. Askeri platformlarda korozyona uğrayacağı düşünülen bölgelerde kullanılacak malzemelerin seçiminde öncelikli olarak korozyon direnci yüksek malzemelerin tercih edilmesi uygun karşılanmaktadır. Farklı tasarım sınırlamaları nedeniyle korozyon direnci düşük malzeme seçimi söz konusu olduğunda malzemenin korozyon direncinin artırılabilmesi için uygun kaplama tipinin seçilmesi gerekmektedir.
- Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından, ana alaşım bileşeni olarak bakır içermeyenler, kirlenmemiş deniz suyuna dayanıklıdır. Dövülmüş alaşımlar arasında, 5XXX serisi deniz suyuna karşı en yüksek dirence sahiptir ve diğer istenen özellikleri göz önüne alındığında, deniz uygulamaları için en yaygın kullanılanlardır. Döküm alaşımları arasında "356.0" ve "514.0" tiplerinden olanlar denizcilik uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır [66].

- Bazı durumlarda, akış kaynaklı korozyonu önlemek için mevcut tek alternatif, daha korozyona dirençli bir alaşımın kullanılmasıdır. Bu genellikle en pahalı seçenektir ve genellikle son çaredir. Bir örnek, yüksek akış hızlarının karbon veya alaşımlı çelik için aşırı yüksek korozyon oranlarına neden olduğu bir durumda paslanmaz çeliğin kullanılmasıdır [66].

En sık kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve karşılaştırılması

Askeri sistemlerde gerek sistemlerde tasarım parçası olarak gerek birimin kendi tasarımında gerekse bağlantı elemanı olarak sıklıkla tercih edilen alüminyum alaşımlarının mekanik ve özellikleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bazı Al alaşımları için mekanik özelliklerin karşılaştırılması [78-83]

Mekanik Özellikler	2024 T3	2024 T4	6061 T6	5083 O	5083 H112	7075 T6
Yoğunluk (g/cc)	2,78	2,78	2,70	2,66	2,66	2,81
Sertlik, Brinell	120	120	95	77	81	150
Sertlik, Knoop	150	150	120	100	104	191
Sertlik, Rockwell B	75	75	60	-	50	87
Sertlik, Vickers	137	137	107	87	91	175
En yüksek çekme mukavemeti (UTS)	483 MPa*	469 MPa*	310 MPa*	290 MPa*	300 MPa*	572 MPa*
Akma Dayanımı, (Yield Strength)	345 MPa*	324 MPa*	276 MPa*	145 MPa*	190 MPa*	503 MPa*
Elastisite Modülü	73,1 GPa	73,1 GPa	68,9 GPa	71,0 GPa	70,3GPa	71,7 GPa
Erime noktası* (°C)	502-638	502-638	582-651,7	590-638	316-482	477-635

*: AA notuna sahip veri noktalarıdır, “Aluminium Association, Inc.” tarafından sağlanmıştır ve tasarım için uygun değildir. İlgili değerler sıcaklık, parça kalınlığı, çapı gibi değerler sebebiyle değişebilmektedir.

En Sık Kullanılan Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri ve Karşılaştırılması

Askeri sistemlerde gerek sistemlerde tasarım parçası olarak gerek birimin kendi tasarımında gerekse bağlantı elemanı olarak sıklıkla tercih edilen paslanmaz çeliklerin mekanik ve korozyon özellikleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.5. Bazı paslanmaz çeliklerin mekanik özellik karşılaştırılması [84-87]

Mekanik Özellikler	316 Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde	316L Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde	304 Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde	304L Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde
Yoğunluk	8,00 g/cc	8,00 g/cc	8,00 g/cc	8,00 g/cc
Sertlik, Brinell	149	146	123	-
Sertlik, Knoop	169	166	138	158
Sertlik, Rockwell B	80	79	70	82
Sertlik, Vickers	155	152	129	159
En yüksek çekme mukavemeti (UTS)	565 MPa	560 MPa	505 MPa	564 MPa
Akma Dayanımı, (Yield Strength)	250 MPa	235 MPa	215 MPa (%0,2 Uzama)	210 MPa
Elastisite Modülü	193 GPa	193 GPa	193 GPa	193-200 GPa
Erime noktası (°C)	1370-1400	1375-1400	1400-1455	1400-1450

Çizelge 3.6 Bazı paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı karşılaştırılması [84-87]

Malzeme	Korozyon Dayanımı
316 Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde	302 ve 304'e göre daha iyi korozyon dayanımına sahiptir, sodyum ve kalsiyum tuzlu sulara karşı direnir.
316L Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde	Üstün korozyon direnci için 316'ya benzer, ancak kaynak veya gerilim giderme sonrasında taneler arası korozyona karşı da üstün dirence sahiptir. Çoğu kimyasala, tuza ve aside karşı iyi korozyon direnci ve molibden içeriği deniz ortamlarına karşı direnç sağlar
304 Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde	Oksitleyici asit ve tuz spreyine karşı dayanıklıdır
304L Paslanmaz Çelik, tavllanmış, levha halinde	302'den daha iyi korozyon direnci.

Kompozitler

- Bir kompozit parçanın üretimi için kullanılacak malzemelerin seçimine müşteri istekleri, üretim olanakları ve ham malzeme özelliklerinin eşleştirilmesi ile başlanmalıdır.
- Kompozit katmanlarının yönleri saat yönünde pozitif olacak şekilde ve derece cinsinden ifade edilmektedir. Kompozit bir parçanın teknik resminde 0° yönü ve tüm katmanların

yönlerinin belirtilmesi gerekmektedir. Böylece parçanın analizlerinin ve üretiminin tasarlandığı şekilde yapılması garanti edilmiş olacaktır.

- Katmanlar herhangi bir açıda serilebilir, ancak üretim kolaylığı da göz önüne alındığında çok özel bir durum olmadığı sürece serimlerin 0° , 45° , -45° ve 90° derecede yapılması uygun görülmektedir.
- Karbon kompozit parçaların metal parçalara bağlanması durumunda galvanik korozyon sorunu ortaya çıkmaktadır. Karbon kompozit parçalar ile alüminyum parçaların kullanılması gerektiğinde özel önlemler alınması gerekmektedir. Galvanik korozyon sorununu en aza indirgeyebilmek için alüminyum yerine titanyum, paslanmaz çelik ya da karbon kompozit parçaların kullanımı değerlendirilmelidir. Alüminyum ile karbon kompozit parçaların birlikte kullanılması gerektiğinde alüminyum parçalar ile karbon kompozit parçalar arasına elektriksel olarak yalıtkan malzemeler yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla genellikle karbon kompozit parçanın alüminyum parça ile temas eden yüzeylerine en az bir kat cam kumaşı serilmesi uygun olacaktır. Tasarım dokümanlarında bu bilgiye yer verilmesi ve tasarımlarda dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Galvanik uyumluluk kadar ısı genleşme katsayısı uyumluluğu da parçaların birleştirilmesinde dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. Bazı malzemelerin ısı genleşme katsayılarının Çizelge 3.7 ile verilmektedir. Çizelgede verildiği üzere, karbon kompozit bir parça ile alüminyum bir parça birleştirildiğinde malzemelerin arasındaki farklı genleşme değerlerinden dolayı bağlayıcılarda ya da yapıştırıcılarda artan yükler oluşmaktadır. Bu nedenle tasarımlarda ısı genleşme katsayı farkları dikkate alınarak tasarımların bu sorunu azaltacak şekilde yapılmasına özen gösterilmelidir. Böyle bir durum söz konusu ise esnek yapıştırıcılar ile birleştirme methodları kullanılmalıdır.

Çizelge 3.7. Bazı malzemelere ait ısı genleşme katsayıları [88]

Malzeme	Isıl genleşme sabiti, $\times 10^{-6}/K$	
	Boyuna	Enine
Karbon-epoksi (0°)	0,43	29,2
Karbon-epoksi ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$)	3,4	3,4
Karbon kumaş-epoksi (24 x 23-SHS)	2,7	4,0
E-cam-epoksi (0°)	8,6	---
E-cam-epoksi (181 tip örgülü)	9,9	12,1
Aramid-epoksi (0°)	-5,4	---
Aramid-epoksi (181 tip örgülü)	-1,8	-1,8
Alüminyum alaşımları	23,4	
Çelik	10,8	
Titanyum	10,1	
Paslanmaz çelik	18	

- Bağlayıcıların (vida, cıvata, perçin, vb) kullanıldığı bağlantılarda bağlayıcı malzemesi seçimi kritik öneme sahiptir. Karbon kompozitlerle birlikte alüminyum alaşımlı bağlantı elemanlarının (perçin, vb) kullanılması kesinlikle önerilmemektedir [89]. Ayrıca metal parçalarda üstün korozyon direncinden dolayı tercih edilen kadmiyum kaplı bağlayıcılar da karbon kompozitler ile kullanıma uygun değildir. Karbon kompozit parçaların birleştirilmesinde titanyum ve paslanmaz çelik bağlayıcıların kullanılması tercih edilmesi önerilmektedir. Askeri sistemlerde sıklıkla tercih edilen karbon kompozitlerin çeşitli bağlama elemanlarıyla kullanımının uyumu için Çizelge 3.8 hazırlanmıştır.

Çizelge 3.8. Sıklıkla kullanılan metal malzemelerinin karbon kompozitle uyumu [90]

Tercih Sırası	Malzeme	Karbon Kompozit Uyumu
1	Titanyum, Titanyum alaşımları, Ti-Nb	Uyumlu
2	MP-35N*, Inco 600**	Uyumlu
3	Östenitik Paslanmaz Çelikler (300 serisi)	Uyumlu
4	A-286***, PH13-8Mo***	Az farkla uyumlu
5	Monel**	Az farkla uyumlu
6	Martensitik Paslanmaz Çelikler (400 serisi)	Uyumlu değil

*Nikel Kobalt süper alaşımıdır **Bir çeşit Nikel alaşım malzemesi *** Paslanmaz çelik türü

- Listede uyumlu olduğu belirtilen malzemeler kullanılarak üretilmiş bağlayıcılar kullanılsa bile metal bağlayıcıların karbon kompozit parçalarda kullanılması sırasında özel önlemlerin alınması gerekmektedir. En sık kullanılan önlem olan ıslak bağlayıcı yerleştirmede, bağlayıcının kafasının hemen altına bir miktar sızdırmazlık sağlayıcı ürün yerleştirilmekte, bağlayıcının ilerlemesi ile delik-bağlayıcı yüzeyi birbirinden ayrılmış olmaktadır.
- Tipik bir alüminyum-karbon kompozit bağlantısında öncelikle alüminyumun uygun bir şekilde (alodin veya sülfürik asitte yapılan eloksal gibi) kaplanması gerekmektedir. Ayrıca kromat dönüşüm kaplama kromik ya da sülfürik asitte yapılan eloksal kaplamaya oranla daha düşük korozyon direnci sağladığından ve iletken olduğundan dolayı tercih edilmemelidir. Epoksi astar ve poliüretan son kat boya uygulanarak alüminyum bağlantıya hazırlanmalıdır.

Bağlantı yöntemi seçilirken bu bilgilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir;

- Genel olarak incelendiğinde iki parça birbirine mekanik (vida, perçin gibi bağlayıcılar) ve yapıştırıcı ile birleştirilebilmektedir. Ancak mekanik birleştirmede kompozit parçalar

üzerinde delikler gerekmede, bu nedenle deliklerde gerilim yoğunluğu oluşmaktadır. Gerilim yoğunluğu oluşan bölgelerin güçlendirilmesi gerektiğinden ve bağlayıcılar genellikle yoğunluğu yüksek metallerden üretildiğinden ağırlık artışına neden olmaktadır.

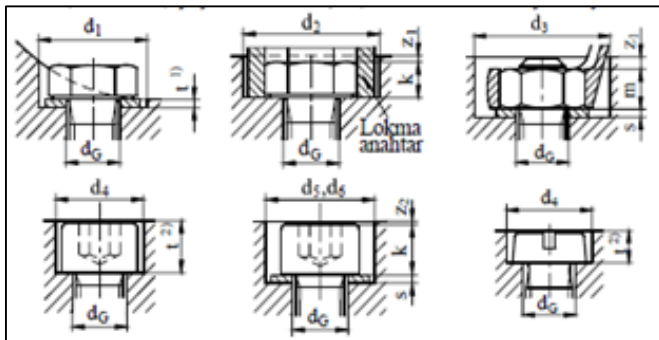
- Kompozit malzeme tasarımlarında üzerinde delik delinecek ise kompozitler için üretilmiş özel uçların kullanılması dokümanlara işlenmelidir. Özel bir gerek olmadıkça deliklerin kenarlarının yuvarlatılması katmanlara zarar vereceğinden gerek görülmemektedir.
- Kompozit parçalar birbirlerine yapıştırıcı kullanılarak da birleştirilmektedir. Yapıştırıcı ile birleştirilen bölgeler kesme yönünde oldukça yüksek yapısal mukavemete sahiptir, bu nedenle tasarımın yapışma bölgelerinde kesme yükü taşıyacak şekilde yapılması gerekmektedir. Yapıştırarak birleştirme yüksek gerilimin oluştuğu, dönüşümlü yüklerin olduğu ya da bağlayıcılar üzerinde çok yüksek yüklerin oluştuğu ince kalınlıktaki parçaların birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca fazla delik açma ve vidalama/perçinleme işlemi gerektiren montajlarda da yapıştırma yöntemi tercih edilebilmektedir. Yapıştırıcı birleştirmede özel yüzey hazırlığı gerekmede, yapıştırıcı çevresel şartlardan etkilenebildiğinden dolayı yapışma mukavemeti zamanla değişebilmekte, istenildiğinde kolayca sökmek mümkün olmamakta ve yapışma mukavemeti kolayca tahmin edilememektedir. Bu nedenle mümkün olduğunca mekanik bağlantı elemanlarının kullanılması tercih edilmelidir.

3.3.2. Sökülebilir bağlantı elemanları kullanım ve gereksinim önerileri

Vida/cıvata tipi seçerken dikkat edilmesi gerekenler;

- Askeri cihaz ve sistemlerde kullanılan vida, cıvata, pul ve somunlar herhangi bir tasarım gereksinimi yoksa paslanmaz çelik olmalıdır.
- Özellikle deniz platformlarında ve korozyon ihtimali bulunan dış ortamda kullanılacak bağlantı elemanları, aksine bir durum veya gerekçe olmadığı sürece A4 kalite paslanmaz çelik seçilmelidir. Yüksek mukavemetin gerekli olduğu durumlarda A4-70 kalite vida yerine A4-80 ve A4-100 kullanımına dikkat edilmelidir.
- Günümüzde BUMAX 109 sınıfı paslanmaz çelik vidalar da kullanılmaktadır. ASELSAN genelinde bu vidalar A4-100 sınıfı paslanmaz çelik olarak tanımlanmıştır. 1000 N/mm² çekme dayanımı gücüne sahip olan bu cıvatalar, pahalı olması sebebi ile zorunlu kalınan hallerde (tasarımsal ihtiyaç vs) tercih edilmelidir.

- Kara platformlarındaki iç mekânlarda ve korozyona uğrama ihtimali olmayan iç alanda kullanımlarında A2 veya A4 kalite paslanmaz çelik bağlantı elemanı kullanılmalıdır.
- Dış ortamda kullanılan vidaların, özel tasarım olmayan standart aletlerle kontrolsüz bir şekilde açılmasının ve sökölme/takılma sırasında vida başının aşınmasının engellenmesi için alyan başlı seçilmesi önerilmektedir.
- Ancak alyan başlı vidalar dış ortam platform montajlarında seçilirken içinde su birikme ihtimali olmayan durumlarda tercih edilmelidir. Su birikme olasılığı olan yerlerde altıgen başlı vidalar kullanılmalıdır.
- Birim veya cihaz içerisinde yapılacak olan bağlantılarda mercek veya havşa başlı yıldız vidalar tercih edilmelidir.
- Havacılık uygulamaları dışındaki endüstriyel uygulamalarda 82° veya 90° havşa vidalar kullanılmalıdır. 82° vidalar inç, 90° vidalar metrik serilerle kullanılmalıdır.
- 8.8 ve 10.9 kalite çelik vidaların kullanımı paslanma nedeniyle önerilmemektedir. Aksine bir ister veya durum olmadığı sürece bu kalitedeki vidaların kullanımından kaçınılması gerekmektedir.
- Somun ile vida bağlantısı yapılacaksa, vidaya kimyasal kilitleyici uygulanarak somun bağlantısının yapılması gerekmektedir.
- Civata boyu seçimi yapılacaksa, civata ucunun en az iki diş (2p: 2 x hatve) somun dışında olması gerekmektedir. Bu durumda civata ucundaki kavrama yapmayan dişler ve pah miktarları da civata boyu hesaplanırken göz önünde bulundurulmalıdır.
- Vida bağlantısı faturalı bir deliğe yapılacaksa, fatura genişliği Şekil 3.4 ve Çizelge 3.9'a göre belirlenmelidir. Yeterli bilgi olmadığı durumda fatura genişliğinin; $D \geq d_2$ (d_2 : lokma anahtar çapı) olarak belirlenmesi önerilmektedir. Fatura derinliği için vida başı (veya somun) yüksekliği + pul yüksekliği + yaylı pul yüksekliği +0,4-1,0 mm tolerans payı olacak şekilde belirlenmesi önerilmektedir.



Şekil 3.4. Vida başı için fatura ölçüleri [58]

Çizelge 3.9. Vida başı fatura ölçüleri [58]

Vida Anma Çapı	6 köşe başlı cıvata ve somun için gerekli dayanma yüzeyi				Silindir başlı cıvata için hücre boyutları			
d	d1	d2	d3	z1	d4	d5	d6	z2
M1,6	5	---	---	---	3,5	---	---	0,4
M2	6	---	---	---	4,4	5,5	6	0,4
M2,5	8	---	---	---	5,5	6	7	0,4
M3	9	11	11	0,4	6,5	7	9	0,4
M4	10	13	15	0,4	8	9	10	0,4
M5	11	15	18	0,4	10	11	13	0,4
M6	13	18	20	0,4	11	13	15	0,4
M8	18	24	26	0,6	15	16	18	0,6
M10	22	28	33	0,6	18	20	24	0,6
M12	26	33	36	0,6	20	24	26	0,6
M16	33	40	46	0,6	26	30	33	0,6
M20	40	46	54	0,6	33	36	40	0,6
M24	48	58	73	0,8	40	43	48	0,8
M30	61	73	82	1,0	50	54	61	1,0
M36	73	82	93	1,0	58	63	69	1,0

Somun tipi seçerken dikkat edilmesi gerekenler;

- Vida dişleri ile somun dişleri arasında galvanik korozyon olmaması için somun malzemesinin vida malzemesi ile aynı seçilmesi gerekmektedir.
- Deniz sistemlerinde somun ile sıkılan cıvata ucunda korozyon oluşmasının engellenmesi için somunu da kapsayacak şekilde açıkta kalan kısma korozyon önleyici kimyasal yağlama ürünleri kullanılmalıdır.
- Cıvata ile bağlantı sonrasında somunun bitiş dişlerine kimyasal kilitleyici uygulanması ile gevşeme riski sağlanabilir.
- Titreşim problemi çok fazla olan ve sık sık sökülüp takılma ihtiyacı olmayan platformlarda kilitli somunlar kullanılmalıdır.
- Pratiklik gerektiren iş kalıpları ve benzeri aparatları elle monte edip çözebilmek için kelebek somunlar kullanılmalıdır. Kelebek somunlar yalnızca el ile sıkılıp çözülmeli, hiçbir zaman el aletleriyle sıkılmamalıdır. Çabuk çözülme özelliği nedeniyle yapısal mukavemetin önemli olduğu bağlantılarda kesinlikle kullanılmamalıdır.
- Bağlantının yapılacağı konum sebebiyle cıvata ucunun dış darbe alması durumu söz konusuysa veya cıvata ucunun çeşitli yaralanmalara neden olabileceği durumlar varsa söz konusu olayları engellemek için şapkalı somun kullanılmalıdır.

- Bağlantının yapılacağı konumda vida eksenini ile somun eksenini arasında kayma oluşabileceği düşünülüyorsa oynar somun kullanılmalıdır.

Pul kullanılırken dikkat edilmesi gerekenler;

- Montaj sırasında vida başının, ana malzeme yüzeyindeki yüzey kaplamasını veya yüzey boyasının kalkmasına sebep olmaması için, bağlantının yapıldığı malzeme yüzeyinde stres arttırıcı çiziklerin oluşturulmaması için mekanik bağlantılarda düz pul kullanılması gerekmektedir.
- Sadece mekanik zarar sebebiyle değil, ana malzeme, vida ve somun arasında sürtünme korozyonu (galling) oluşmasını engellemek ve malzemeler arasında galvanik korozyon oluşmaması için pul kullanılması gerekmektedir.
- Düz pulun boya ile temas edecek yüzeyinin mutlaka çapaksız olması gerekmektedir. Bu nedenle pulların çapaksız yüzeylerinin, boyalı yüzeylere temas edecek şekilde montajının yapılması gerekmektedir.
- Titreşim sonucu gevşemesi öngörülen veya düşünülen bir noktaya bağlantı yapılıyorsa, düz pulun yaylı pul ile birlikte somun altında kullanılması gerekmektedir. Ancak titreşim için yeterli önlemlerin alınabilmesi için kimyasal kilitleyici kullanılması gerekmektedir.
- Titreşim dayanımı gerektiren bir kör deliğe bağlantı yapılacaksa, vida başının altında hem yaylı pul hemde düz pul konulup montaj ileminin yapılması gerekmektedir. Ana malzemeye temas eden pul çeşidi düz pul olmalıdır ve yaylı pul vida başı altına konulmalıdır.
- Yaylı pul kullanımında, yaylı pulun keskin köşesi vida başı altına gelecek şekilde takılmalıdır.
- Civata ile somun bağlantısı paralel olmayan iki yüzeyi birleştiriyorsa, civata veya somun altında konkav veya konveks pullar kullanılabilir.
- Tasarım gereksinimi gereği kanatlı pul kullanılıyorsa testere dişlerinin içe – dışa dönük olmasından dolayı civata ile montajlandığı yüzeyde kaplama, boya ve/veya malzemeye zarar verebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle bu tip pulların konumlandığı noktalarda korozyon engelleme amaçlı artı tedbir alınmasına dikkat edilmelidir.

Helicoil kullanımı konusunda dikkat edilmesi gerekenler,

- Alüminyum malzemelere dış açıldığında mutlaka helicoil kullanılmalıdır.
- Titreşim problemi olan bölgelerde kilitli helicoil kullanılması önerilmektedir.

3.3.3. Kimyasal kilitleyicilerin kullanım ve gereksinim önerileri

- Kimyasal kilitleyiciler dayanım gereksinimlerine göre farklı uygulamalarda kullanılabilirler. Askeri sistemlerde en sık kullanılan kimyasal kilitleyiciler Loctite çeşitleridir. Loctite 221, 242, 243 ve 270 kilitleyicilerin kullanım özellikleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.
- Sıklıkla sökülmesi gereken dişli bağlantılar için daha az dayanımlı olan Loctite 221, daha az sökülecek olan dişli bağlantılar için Loctite 242 veya 243 kilitleyiciler tercih edilmelidir. Loctite 242, 243, 221 uygulanan dişler, standart el aletleriyle açılabilir.
- Sökülmesi gerekmeyen mekanik bağlama elemanlarının kilitlemesi için Loctite 270 kullanılmalıdır. Ancak Loctite 270'in, M25'ten küçük çaplı vidalar için kullanımı önerilmemektedir.
- Loctite 270 uygulanan dişler veya Loctite 221, 242, 243 uygulanıp standart el aletleriyle açılmayan dişler için dişli parça bölgesel olarak 250°C'ye kadar ısıtılmalıdır. Yüksek sıcaklık kilitleyicinin dayanımını azaltmaktadır bu nedenle dişler veya parçalar sıcakken açılabilir.

Çizelge 3.10. Kimyasal kilitleyici çeşitleri ve kullanım alanları [91]

Kilitleyici	Dayanım	Renk	Akışkanlık	Kullanım Özelliği
221	Düşük	Mor	Düşük	Küçük çaplı veya diş kısmı uzun bağlantı elemanları için uygundur.
242, 243	Orta	Mavi	Orta	Paslanmaz çelik ve kaplamalı yüzeyler için uygundur. Yüzeye uygulandıktan sonra akma azdır.
270	Yüksek	Yeşil	Düşük	Standart el aletleri ile açılmaz, bu sebeple açılması gerekmeyen bağlantılar için uygundur.

- Kilitleyicinin uygulama sırasında solunması, cilde ve gözlere teması engellenmelidir. Bunun için gerekli önlemler alınmalıdır.

- Kullanım öncesinde raf ömrü ve uygun koşullarda, kapağı kapalı olarak, kuru ortamda, 8°C ile 21°C sıcaklık aralığında muhafaza edildiği kontrol edilmelidir.
- En yüksek performansa ulaşabilmek için, tüm parçaların temiz ve yağdan veya gresten arındırılmış olması gerekmektedir. Kurlenme sırasında kilitleyici uygulanmış dişli parçalar hareket ettirilmemelidir.

3.3.4. Korozyon tasarımı ve gereksinim önerileri

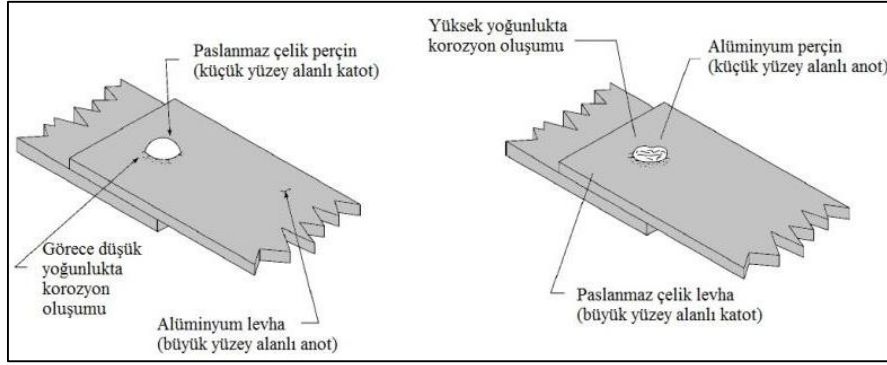
- Tasarımlarda özellikle cıvata, vida, pul, somun, perçin vb. bağlantı elemanlarında ve birbiriyle temas eden yüzeylerde galvanik korozyona karşı dikkatli olunmalıdır. Tasarımda kullanılması planlanan malzemelerin birbirleriyle galvanik uyumlarını öngörmek için Çizelge 2.22'den faydalanılmalıdır.
- Paslanmaz çelik vida ile temas halinde bulunan kadmiyum kaplı çelik pul benzeşmeyen metallerdir. Kadmiyum metali, paslanmaz çeliklere göre daha aktiftir ve bir arada temas edecek şekilde kullanılmaları uygun değildir. Arada bir yalıtım uygulanmadan kullanılan kadmiyum kaplı pul, paslanmaz çeliğe göre daha aktif olduğu için korozyona uğramaktadır.
- Paslanmaz çeliklerle alüminyum alaşımlarının bir arada kullanılması korozyon bakımından sakıncalıdır. Bundan dolayı tasarımlarda alüminyum ve paslanmaz çeliğin bir arada kullanıldığı bölgelerde uygun yalıtım malzemeleri kullanılmalıdır.

Deniz suyuna maruz kalacak metallerin aktifliklerini ve birbirleriyle galvanik uyumlarını öngörmek için Şekil 2.30'den faydalanılmalıdır. Aktiflik yönünden malzeme seçiminde aşağıdaki hususlar önem taşımaktadır:

- Sıcaklık artışı korozyon ilerleme hızını arttırdığından yapılacak olan tasarımlarda sıcaklığın homojen şekilde dağılmasını sağlayacak tasarımlar yapılması bölgesel korozyon hızı artışını engellemektedir.
- Tasarım malzemeleri veya elemanları, mümkün olan yerlerde metal olmayan malzemelerden seçilmelidir.
- Magnezyum korozyon yönünden en aktif metal olduğu için tasarımlarda kullanılması tercih edilmemelidir.

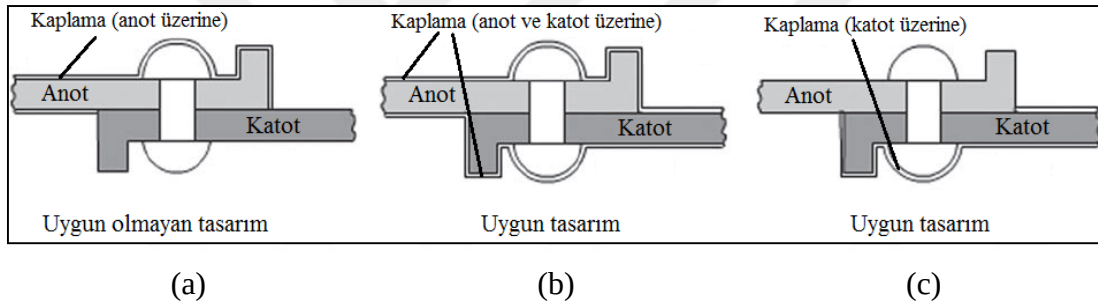
- Paslanmaz çelikler arasında korozyona karşı direnci en düşük olan çelik çeşidi 405 serisi paslanmaz çeliklerdir. Bu nedenle korozyon önlemi en önemli gereksinim olan tasarımlarda kullanılması tercih edilmemesi önerilmektedir.
- Paslanmaz çelikler arasında korozyon direnci en yüksek sayılanlarda birisi sıklıkla kullanılan AISI 316 serisidir. Bu nedenle deniz sistemlerinde kullanılacak tasarımlarda ve korozyondan korunma gereksinimi öncelikli istenen tasarımlarda, eğer çelik kullanılacaksa AISI 316 paslanmaz çelik kullanılması önerilmektedir. (Bu öneri genel korozyona uğrama durumu içindir) AISI 316 paslanmaz çelik genel korozyona karşı bu derece dayanıklı olsa da paslanmaz çelikler genel olarak çukurcuk korozyonuna karşı çok dayanıksızdır. Deniz ortamında oluşan çukurcuk korozyonu özellikle oksijen miktarındaki bölgesel değişimlerden dolayı oluşmaktadır. Bu nedenle dar bölgelerin tasarımlarında veya montaj uygulamalarında ortamdan yalıtılması gerekmektedir.
- 2024-T3 ve 2024-T4 alüminyum alaşımları yerine 2024-T8 ya da 5000/6000 serisi alüminyum alaşımlar kullanılması önerilmektedir.
- Grafit, katodik uca çok yakın olduğundan grafit içeren yağlandırıcı kullanıldığında temas ettiği metallerle galvanik korozyon riskini arttırmaktadır. Bu nedenle grafit içeren yağlandırıcılar kullanılmamalıdır.
- Elektronik parçalar, araçların egzoz gazlarından etkilenecek yerlerde bulunmamalıdır. Egzoz gazı korozyon yönünden aktif kirlilik bölgeleri oluşturmaktadır.
- Galvanik korozyonun büyüklüğü ve ilerleme hızı, katot olarak davranan metalin elektrolit alanı ile temas halinde bulunan yüzey alanının, anot olarak davranan metalin elektrolit ortam ile temas halinde bulunan yüzey alanına oranı ile belirlenmektedir. Eş.(3.1 ile ifade etmektedir. Denklem göre, yapılan tasarımda elektrolit ortam ile temas halinde olan katot yüzeyine göre daha küçük bir anot yüzeyi kullanılmışsa, anodun üzerinde büyük bir akım yoğunluğu oluşacaktır. Bu da anot metalinde hızlı korozyon gelişimine neden olacaktır. Şekil 3.5'te metallerin yüzey alanlarına göre galvanik korozyon karşılaştırılması yapılmıştır.

$$\text{Galvanik korozyon hızı} \sim \frac{\text{Katot yüzey alanı}}{\text{Anot yüzey alanı}} \quad (3.1)$$



Şekil 3.5. Katot/anot yüzey alanının korozyon hızına etkisi [92]

- Katot/anot yüzey alanı oranını azaltmak için tasarımın geometrisi ve yapısı önem taşımaktadır. Şekil 3.6'da verilen tasarımların, uygulanan kaplamanın katot/anot oranına yaptığı etkiye göre uygunluğu gösterilmiştir.



Şekil 3.6. (a) uygun olmayan, (b) uygun tasarım, (c) uygun tasarım [93]

Yapılacak tasarımlarda benzeşmeyen metallerin bir arada kullanılması gerekiyorsa, galvanik korozyonu önlemek amacıyla aşağıdaki önlemler alınmalıdır:

- Galvanik seride birbirine en yakın çiftler seçilmeli ve katodun yüzey alanı anodik metale göre çok daha düşük olacak şekilde tasarım yapılmalıdır. Örneğin, alüminyum levhaları birleştirmek için paslanmaz çelik cıvata ya da vida kullanımı uygun görülsede, çelik levhaları birleştirmek için alüminyum cıvata ya da vida kullanılmamalıdır. Çizelge 3.11'de sıklıkla kullanılan, birlikte kullanılması uygun veya uygun olmayan metalleri tablolastırılmış hali bulunmaktadır. Bu tabloya göre gerekli seçimler yapılabilir.

Çizelge 3.11. Belirli metal ve alaşımların arasındaki galvanik uyumluluk [53]

Ana parça	Bağlantı Elemanı (Vida,pul,somun gibi)							
	Alüminyum	Karbon Çeliği	Östenitik nikelli dökme demir	70-30, 90-10 Cu-Ni Alaşımları	Nikel	304 Paslanmaz Çelik	400 Ni-Cu Alaşımı	316 Paslanmaz Çelik
Alüminyum	Uygun	Uygun	U.D ^a	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun ^a	Uygun
Karbon Çeliği	U.D	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Östenitik nikelli dökme demir	U.D	U.D	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Bakır	U.D	U.D	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
70-30, 90-10 Cu-Ni Alaşımları	U.D	U.D	U.D	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Nikel	U.D	U.D	U.D	Uygun	Uygun ^b	Uygun ^b	Uygun	Uygun ^b
304 Paslanmaz Çelik	U.D	U.D	U.D	U.D	D ^c	Uygun ^c	Uygun	Uygun ^c
400 Ni-Cu Alaşımı	U.D	U.D	U.D	U.D	D ^c	D ^c	Uygun	D ^c
316 Paslanmaz Çelik	U.D	U.D	U.D	U.D	D ^c	D ^c	D ^c	Uygun ^c

Uygun: Birlikte kullanılmaları uygundur. U.D: Birlikte kullanılmaları korozyon oluşumuna sebep olmaktadır.

Beraber kullanılmaları önerilmez. D: Değişebilir,

a: Bağlantı elemanı galvanik korozyona karşı korunur. Fakat, alüminyum ana parçada bulunan bağlantı elemanı deliklerinde genişleme görülür.

b: Ana parça tarafından bağlantı elemanına sağlanan katodik koruma aralık korozyonu oluşumunu engelleyemeyebilir. Gerekli önlemlerin alınması önerilir.

c: Aralık korozyonu oluşma ihtimali yüksektir. Özellikle vida başlarına önlem alınmalıdır.

- Elektriksel olarak iletkenlik gerektiren tasarımların mekanik bağlantılarında benzeşmeyen metaller bir arada kullanılacaksa, benzeşmeyen metaller arasına galvanik olarak ikisiyle de uyumlu olan metalik bir conta ya da pul konulmalıdır veya benzeşmeyen bu metal çiftinin katodik üyesi, anotla galvanik olarak uyumlu olan bir metalle kaplanmalıdır.
- Elektriksel iletkenliğin önemli olmadığı tasarımların mekanik bağlantılarında benzeşmeyen metaller kullanılacağı zaman, benzeşmeyen metaller arasına emilim yapmayan kimyasal olarak pasif bir malzemeden yapılmış conta ya da pul konulması önerilmektedir.
- Sıvının ve nemin araya nüfuz etmemesi için birbirine temas eden yüzeylerin dış kenarları kapatılmalıdır.

- Tasarımda elektronik yapılar içeren kısımların çalışmasına engel olmayacağı öngörülen ve uygulanması mümkün olan durumlarda dıştaki bağlantı elemanlarının dış dünyaya bakan yüzeyleri uygun bir boyayla boyanmalıdır.
- Nem sızdırmaz tasarlanan korumalı ortamlarda nemin sürekli olarak sistemden uzaklaştırıldığı ve/veya sisteme girmediği biliniyorsa, benzeşmeyen metaller arasında galvanik korozyonu önlemek için sıkı tedbirler almaya gerek kalmaz. Ancak bu durum, yalnızca hermetik olarak kapatılmış ve kapatılmadan önce nemi alınmış kutular ve sistemler için geçerlidir. Bahsedilen korumalı sistem ve kutularda bulunan havanın hermetik kapatmadan sonra taşıdığı en yüksek nem miktarı, kutunun içindeki yüzeylerin maruz kalacağı en düşük sıcaklıktaki yoğuşmaya sebep olacak en düşük nem miktarının altında olmalıdır.

Bağlantı elemanlarının malzeme seçiminde korozyona karşı direnç bakımından aşağıdaki hususlar önemlidir:

- Deniz platformlarında kullanılan bağlantı elemanları korozyon direnci yüksek sınıftan seçilmiş olsa bile dış ortam ile birim içi arasında sızdırmazlığın sağlanması gereken durumlarda bağlantı elemanlarının uygulandığı deliklerin sızdırmazlığının sağlanması için bağlantı elemanlarına kimyasal sızdırmazlık elemanları uygulanmalıdır.
- Sızdırmazlık elemanı bağlantı elemanının dış duvarını çepeçevre kaplayacak ve bağlantı elemanının montajı sonrası dışa taşacak şekilde uygulanmalıdır. Pul kullanımı durumunda pulun iki yüzüne de uygulama yapılmalıdır.
- Sökülmesi öngörülen bağlantı elemanlarının başlarının altına korozyondan yalıtıcı kimyasal sürülerek montajları yapılmalıdır. Bu tür parçalarda deliğin içine ya da bağlantı elemanının dışlarına yalıtıcı uygulamak, demontaj esnasında büyük zorluklara hatta parçanın hasarlanmasına bile yol açacaktır. Bu tip riskleri engellemek için ıslak montajın vida başlarına uygulanması vida dışlarına ise uygun vida kilitleyicinin uygulanması önerilmektedir. Islak montaj; yalıtıcının deliğin içine uygulanması veya bağlantı elemanının yalıtıcı içine batırılması ve yalıtıcı kurumadan montajın tamamlanmasıdır. Montaj sonrası korozyondan korunma için, bağlantı elemanının kafası tamamen veya kısmen yalıtıcı yardımıyla kapatılmalıdır.
- Özellikle deniz platformlarında kullanılan M6'dan küçük vidalar için bağlantı elemanlarının dış atmosfere açık ve farklı metaller ile yaptıkları teması engelleyecek şekilde korozyondan koruyacak kimyasallarla kaplanması gerekmektedir. M6'dan büyük

vidalar için, vida başı altı ve montaj sonrası vida başı tamamen kapanacak şekilde korozyondan koruyacak kimyasal eleman ile yalıtımının sağlanması gerekmektedir.

- Deniz platformlarındaki birimlerin diğer metallerle temas halinde olduğu köşe kenarları, birimlerin kaynaklı yüzleri veya kenarları, mekanik bağlantı elemanları tamamen korozyondan yalıtım sağlayacak kimyasallarla yalıtılmalıdır.
- Pulların, yivli bağlantı elemanlarının ve perçinlerin, polisülfür, poliüretan, epoksi, asit buharları çıkarmayan silikon ya da benzeri sızdırmazlık ürünleriyle sızdırmazlıkları sağlanmalıdır.
- Alüminyum gibi yumuşak metallerin tasarımlarının yivli olmaması gerekmektedir. Eğer tasarımda yivli alüminyum kullanılması gerekiyorsa MIL-PRF-81733 standardına uygun sızdırmazlık malzemesiyle uygulanarak kullanılmalıdır. MIL-PRF-81733, korozyona karşı koruma için silahlar ve uçak sistemleri üzerindeki metal bileşenlerin sızdırmazlığı ve kaplamasında kullanılan hızlandırılmış, oda sıcaklığında sertleşen sentetik kauçuk bileşikler kapsayan standarttır.

Yarık korozyonunu engellemek için aşağıdaki tasarım prensipleri uygulanmalıdır:

- Yağmur suyu, deniz suyu ve pisliklerin birikmesini engellemek için keskin köşeler, cepler, çukurlar vb. geometrilerden sakınılmalıdır.
- Cihaz kutuları, içine giren suyun tümüyle atılabileceği şekilde tasarımlanmalıdır.
- Su emilimi yapıp suyu içinde tutabilecek yalıtım malzemeleri ve benzeri malzemeler metalik yüzeylere temas edecek şekilde tasarımlanmamalıdır. Contalar, su emilimi yapmayan katı veya kapalı hücreli malzemelerden seçilmelidir.
- Kaynak yapılan bağlantılarda nokta kaynak ya da perçin yerine uç uca kaynak tercih edilmelidir.
- Kaynak yapılacak yüzeyler korozif deniz ortamı yerine agresif olmayan ortama (örn. kontrollü atmosfer ortamı) bakacak yüzey yönünde seçilmelidir.

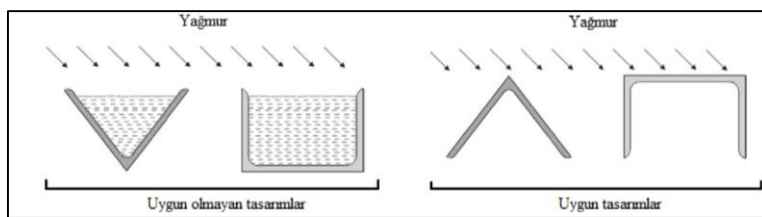
Boya altı korozyonunu engellemek için aşağıdaki tasarım prensipleri uygulanmalıdır:

- Ortamdaki bağıl neminin %70'in altında olması boya altı korozyonunu engellemektedir. Bu nedenle nem kontrolünün yapılabildiği ortamlar da bağıl nem seviyesi %70 altında tutulmalıdır.

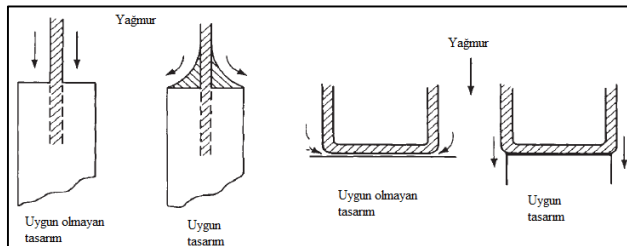
- Eğer sistem açık havayla temas halindeyse, söz konusu sistemin suyla yıkanması ya da yağmur suyuna maruz kalması, boya yüzeyindeki hava kirliliğinden gelen asidik kirleri temizlemektedir. Bu önlem ile boya altı korozyonu engellenmektedir.
- Boyanın metale mükemmel olarak tutunması sağlanmalıdır. Bunun için de boya öncesi yüzey hazırlama adımı ve astar boya uygulamasının muhakkak yapılması gerekmektedir.
- Karbon çeliklerinin boyanmasında katodik koruma sağlamasından dolayı yüksek çinko içeren boyaların kullanılması önerilmektedir.

Tasarımlarda biriken suyun giderimi için aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

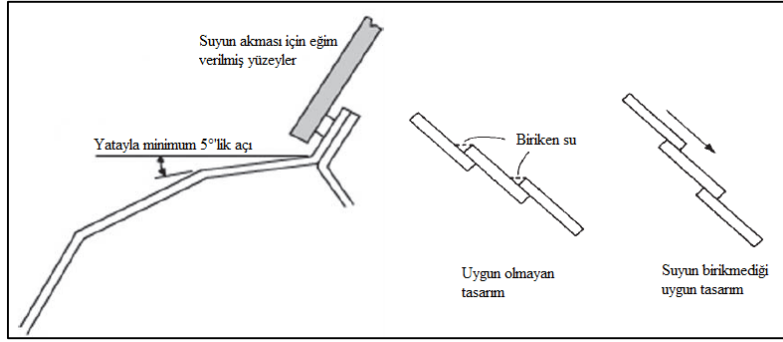
- Tasarımda nemin yoğunlaşmasına, suyun birikmesine yol açacak çukur, oyuk, girintili çıkıntılı bölgelerin bulunmasından kaçınılmalıdır. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 örnek tasarımları göstermektedir.
- Dış dünyaya bakan konektörlerin tamamı yatay şekilde konumlandırılmalıdır. Dikey olarak konumlandırılan konektörlerin birim veya panele bağlandıkları bölgelerde çukurlar yaratarak nem ve su birikmesine neden olmaktadır.
- Tasarımın elverdiği sürece dış ortama bakan bölge ve yüzeylerde yatayla minimum 5°'lik açı yapacak eğimli yüzeyler kullanılmalıdır. Bu sayede olası su girişleri yerçekimi ile akıtılacaktır. Şekil 3.9 örnek tasarımları göstermektedir.
- Tasarımda gider delikleri kullanılmışsa, gider yerleri ve büyüklükleri uygun olmalıdır.



Şekil 3.7. Uygun ve uygun olmayan tasarımlar [92]



Şekil 3.8. Uygun ve uygun olmayan tasarımlar [94]



Şekil 3.9. Tasarımlarda yapılabilecek eğimli yüzey önerileri [92, 94]

Alt gereksinim madde önerileri:

- Tasarımlara uygun olan durumlarda paslanmaya karşı dirençli metaller, plastikler, metalik olmayan malzemeler kullanılmalıdır.
- Mümkün olduğunca nemi sistemden uzaklaştırmaya yardımcı tasarımlar yapılmalı, korozyona neden olabilecek sıvılar ve gazlara karşı önlem alınmalıdır.
- Korozyon inhibitörlerinin kullanımı değerlendirilmelidir (koruyucu yağ, sprej vb).
- Gerekli durumlarda çevresel faktörlerden koruma amaçlı kaplamaların kullanılması değerlendirilmelidir.
- Galvanik çift oluşturulmamasına dikkat edilmesi, galvanik çift oluşturulmasına karşı önlem alınmalıdır.
- Gerekli olduğu durumlar değerlendirilerek imkân var ise kullanılan malzeme kalınlığı artırılmalıdır.
- Stres konsantrasyonu yaratabilecek tasarımlardan olabildiğince uzak durulmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır (keskin köşelerden uzak durmak gibi).
- Kullanılacak malzemeleri stres korozyon çatlağı oluşturabilecek ortamlardan korumak için önlemler alınmalıdır.
- Bölgesel olarak kirliliğin birikebileceği tasarımlardan uzak durulmalı (açıkta bırakılan delik, birikintiye müsait çukur bölgeler gibi).
- Korozyonun yüzeyden başlayacağını bilerek, yüzeylerin korunması ve önlem alınması konusuna dikkat edilmelidir.
- Her durumda korozyonun önüne geçmek mümkün olmayabilir, bu tip durumlarda korozyonun ilerlenmesi izlenmeli. Bu tarz durumlarda periyodik bakımlar vererek ya da ömürlü malzemeleri belirleyerek belirli aralıklarda değişikliğe gidilmelidir.

- Tereddütte kalınan durumlarda konunun uzmanlara danışılmalı, araştırılmalı, test ve deney yapılmalıdır.
- Daha ağır çevre koşullarında çalışacak parçalar için üst seviyede korozyon dayanımı olan paslanmaz çelikler (örn: süper östenitikler, dublex paslanmazlar gibi) seçilebilir ya da paslanmaz çeliklerin üzerine kaplama yapılabilir.
- Menteşe gibi hazır ürünlerden seçilen bağlantı elemanlarında kullanılan tüm parçaların paslanmaya karşı dirençli olmasına dikkat edilmelidir. Bazı firmaların kimi ürünlerinde alt parçalardan biri ya da birkaç tanesi paslanabilmektedir.
- Vidaların izole edilmesinin tasarım için çok kritik olduğu değerlendirilmelidir. Farklı metallerin temasının engellenmesi ve aynı zamanda çevre koşullarından koruma amaçlı olarak bu konu tasarım aşamasında değerlendirilmelidir.
- Müşteriye verilen ürünler kullanım dışı olduğu zamanlarda kılıflı bir şekilde muhafaza edilmesi korozyon gibi etkileri en alt düzeye indirecektir.
- Zorunlu olmadıkça tasarımlarda çukur bölge oluşturmaktan ve su birikmesinin önüne geçilmesinin gerekliliği kesin bir şekilde görülmektedir.
- Optik sistemlerin lenslerinin kaplama seçimlerine dikkat edilmesi gerekmekte ve mümkünse görev harici kapaklı muhafaza edilmesine önem verilmelidir.

3.3.5. Metalik kaplama tasarım ve gereksinim önerileri

- Korozyona dayanıklı paslanmaz çelikler, ASTM A967-01 veya SAE-AMS-QQ-P-35 standardına uygun bir şekilde pasive edilmelidir. QQ-P-35 Standardı iptal edildiğinden ASTM standardına göre gereksinim yazılması uygun olacaktır.
- Pasivasyon, mekanik işlem sonrası paslanmaz çelik yüzeylerin korunması için tercih edilmelidir ve uygulanmasına karar verildiğinde, pasivasyon işleminin doğru, anlaşılır ve hatasız yapılabilmesi için dokümanlara gereksinim olarak aşağıda verilen notların veya bu notlara denk gelen cümlelerin yazılması gerekmektedir:
- Pasivasyon, ASTM A967, Metod 1, Nitrik 2'ye uygun şekilde yapılacaktır.
- Pasivasyon, ASTM A967, Metod 1, Nitrik 1'ye uygun şekilde yapılacaktır.
- Pasivasyon, ASTM A967, Method 2'ye uygun şekilde yapılacaktır.
- 304-316 gibi sık kullanılan malzemeler için Nitrik 2; 431 için Nitrik 1 önerilir. Diğer alaşımlar için ilgili standart kontrol edilmelidir.
- Karbonlama (carburizing) veya Nitrürleme (nitriding) işlemi görmüş paslanmaz çeliklerin pasivasyonu önerilmemektedir.

- Yüksek miktarda karbon içeren martensitik paslanmaz çeliklere (440C vb) pasivasyon önerilmemektedir.
- Düşük karbonlu çelikler ve saf demir, kadmiyum, nikel ya da kalayla kaplanmaktadır. Yağ veya gres yağına sürekli olarak daldırılmış, ya da nem geçirmeyen kaplamaya sahip ya da hermetik kapatılmış üniteler içinde yer alan hassas parçaların ekstra kaplanmasına ihtiyaç yoktur.
- Genel olarak korozyon dayanımı için yağ veya gres yağının korozyona maruz kalması öngörülen tüm yüzeylere uygulanması önerilmektedir.
- Bütün alüminyum alaşımları, MIL-A-8625 standardına göre anodize (eloksal) edilmelidir.
- Bütün alüminyum alaşımları, MIL-P-23377 standardına veya bu standarda eşlenik olan bir standarda göre uygun astar boya uygulanmalıdır.
- Bütün alüminyum alaşımlarının, uygun bir son kat boyasıyla da boyanması önerilmektedir.
- Eloksallama uygulanan alüminyum yüzeylere yalıtıcılık sağladığından elektriksel iletkenlik istenen bölgelerde tercih edilmemelidir. Lokal bölgelerde istenen bir elektriksel iletkenlik mevcut ise, ilgili bölgelere kaplama sırasında maskeleme yapılarak elektriksel iletkenliğin korunması sağlanmalıdır.
- Sürekli olarak yüksek sıcaklıklara maruz kalınan tasarımlarda alüminyum kullanılacaksa anodizasyon (eloksallama) işlemi yerine uygun ısı karakteristikleri olan metal kaplamalar kullanılması tercih edilmelidir.
- Eloksallama (anodize film), alodin (kimyasal film), ya da metalik kaplamalar, mekanik talaş kaldırma veya benzeri üretim işlemleri tamamlandıktan sonra yüzeylere uygulanmalıdır. Bu bilginin dokümanlara işlenmesi önerilmektedir.
- Eloksallama uygulanmasına karar verildiğinde, eloksallama işleminin doğru, anlaşılır ve hatasız yapılabilmesi için dokümanlara gereksinim olarak aşağıda verilen notların veya bu notlara denk gelen cümlelerin yazılması gerekmektedir:
- Eloksallama işlemi, MIL-A-8625 standardı tip II, sınıf I'e göre en az 15 µm (renksiz sülfürik asit eloksallama) olacak şekilde uygulanacaktır.
- Eloksallama işlemi, MIL-A-8625 standardı tip II, sınıf II'e göresiyah ve 15 µm ile 20 µm (siyah sülfürik asit eloksallama) arasında kalacak şekilde uygulanacaktır.
- Eloksallama işlemi, MIL-A-8625 standardı tip II, sınıf I'e göre en az 15 µm, boyanabilir şekilde uygulanacaktır.

- Eloksal işlemi, MIL-A-8625 standardı tip III, sınıf I'e göre en az 25 µm, boyanabilir (sert eloksal) şeklinde uygulanacaktır.
- Eloksal işlemi, MIL-A-8625 standardı tip III, sınıf II, siyah, en az 50 µm (siyah sert eloksal) olacak şekilde uygulanacaktır.
- Anodizasyonun (eloksall) gerekmediği uygulamalar için MIL-DTL-5541 standardına uygun olan alodin, diğer adıyla kromat dönüşüm kaplaması gibi bir kimyasal film uygulaması yapılması önerilmektedir. Ancak, kromat dönüşüm kaplamasının anodizasyon ile aynı korozyon dayanımını sağlanması beklenmemelidir. Uygun olan durumlarda kimyasal filmler üzerine organik kaplama (boya uygulaması) yapılarak ek bir koruma sağlanabilmektedir. Boyasız yüzeylerde korozyon açısından eloksall kaplama daha güvenlidir.
- Alodin kaplama boyasız veya boya altına boyanın daha iyi yapışması için uygulanmaktadır.
- Alodin kaplama uygulanmasına karar verildiğinde, alodin kaplama işleminin doğru, anlaşılır ve hatasız yapılabilmesi için dokümanlara gereksinim olarak aşağıda verilen notların veya bu notlara denk gelen cümlelerin yazılması gerekmektedir:
- Kromat kaplama, MIL-DTL-5541 standardı, sınıf 1 (sarı alodin)'e göre uygulanacaktır.
- Kromat kaplama, MIL-DTL-5541 standardı, sınıf 2 (beyaz alodin)'e göre uygulanacaktır.
- Yapılan tasarımlarda bakır ve bakır alaşımları malzeme seçimi yapıldıysa, MIL-F-495 standardına uygun siyah oksit işlemi, kaplama, ya da boya işlemi uygulanabilmektedir. Tasarımda kaplanmamış bakır istenmişse, kararma önleyici ince bir silikon kürlü reçine filmi kullanılabilir.
- Bakır üstüne yapılan metal kaplamalarda, üst metal kaplama ile bakır arasına konulacak nikel tabakası sayesinde bakırın üst metale göç etmesi ve üstteki metalin gözeneklerinde oluşacak kızıl bakır metalinin görülmesi önlenabilmektedir.
- Tasarımlarda istenecek olan altın kaplama, MIL-G-45204 standardına uygun olarak yapılmalıdır.
- Deniz platformlarında, deniz ortamına açık kullanılacak sistemlerde altın kaplama kalınlığı en az 7,62 mikrometre olması önerilmektedir.
- Tasarımlarda istenecek olan gümüş kaplama, QQ-S-365 standardına uygun olarak yapılmalıdır.
- Gümüş kaplama tercih ediliyorsa göçü olayına ise ayrıca dikkat edilmesi gerekmektedir. Gümüş göçünü azaltabilmek için çeşitli methodlar izlenebilmektedir.

- Gümüş göçünü azaltabilmek için, iletkenlerin, MIL-I-46058 verildiği gibi organik bir nem bariyeriyle kaplanarak korunması önerilmektedir.
- Eğer ortam nem seviyesine müdahale edilebiliyorsa nem seviyesi, beklenen çalışma koşullarında yoğuşmaya neden olmayacak bir seviyede tutulmalıdır.
- Ayrıca, kaplama öncesinde iletken yüzeylerindeki kirletici maddelerin dikkatli bir temizlenmesi ve deiyonize su ile durulama yöntemleri gümüş göçü hızını azaltabilmektedir.
- Askeri sistem tasarımlarında kadmiyum kaplama standartları,QQ-P-416, MIL-C-81562 veya MIL-C-8837 olarak uygulamalarından seçilebilmektedir. QQ-P-416 standardı seçildiğinde kadmiyum kaplamanın sınıf 2 ve tip II ile; MIL-C-81562 standardına göre kadmiyum kaplama yapılması istendiğinde tip II ile ve kadmiyum kaplama buhar depozisyonu ile kaplanacaksa da MIL-C-8837 tip 2, sınıf II ile uyumlu olması istenmektedir.
- Kadmiyum ve kadmiyum kaplı parçalar korozif buharların saldırısına maalesef ki açıktır. Bu nedenle kapalı kutularda kadmiyumla birlikte asit, amonyak, yapıştırıcılar, organik kaplamalar, plastikler, vernikler ve korozif buhar salınımı yapan diğer organik malzemelerin birlikte kullanımı tercih edilmemelidir.
- Kalay kaplama, MIL-T-10727 standardına uygun olarak sıcak daldırma ya da akımlı yöntemle yapılmaktadır. Yapılan tasarımda elektriksel iletkenlik isteniyorsa MIL-P-23408 standardına uygun şekilde kalay-kadmiyum kaplama yapılmalıdır.
- Kalay-kurşun kaplama (lehim kaplaması), lehimlenebilirlik veya elektromanyetik uyumluluk nedeniyle, MIL-STD-2000 ya da MIL-P-81728 standartlarına uygun olacak şekilde sıcak daldırma veya akımlı yöntemle yapılması gerekmektedir.
- Askeri uygulamalarda için yapılan tasarımlarda krom kaplama yöntemi QQ-C-320 veya MIL-STD-1501 standardına uygun olarak yapılmalıdır. Krom kaplama, sertlik gerektiren ya da aşınma ile ilgili uygulamalar için kullanılmalıdır, korozyona karşı önleme amaçlı olarak uygulanmamalıdır.
- Nikel kaplama, akımlı (elektrolitik) yöntemle kaplanacaksa SA-M-005 (QQ-N-290) standardına, akımsız olarak kaplanacaksa MIL-C-26074 veya AMS 2404 standardına uygun olacak şekilde yapılmalıdır. Korozyon dayanımı AMS 2404 standardında belirtilen gerekliliklere uymalıdır.
- Elektriksel iletkenlik ve kontak gerektiği zaman, nikel-kadmiyum kaplama AMS 2416 standardına uygun olmalıdır. Yüksek mekanik dayanım ve sertlik gereken uygulamalarda altın üzerine veya rodyum-altın üzerine nikel kaplanması da önerilmektedir.

3.3.6. Boya gereksinim ve tasarım önerileri

- Askeri sistemlerin boya uygulamalarında, genellikle akrilik, epoksi ve poliüretan esaslı standart boyaların yanında infrared ışımayı emici özellikteki boyalar da kullanılmaktadır.
- Alkid reçine esaslı tek bileşenli yaş boyalar diğer çift bileşenli yaş boyalara göre yüzeylere daha zayıf tutunmaktadırlar. Buna ek olarak kimyasal dayanımları da daha zayıftır. Bu nedenlerden dolayı müşteri istemediği sürece kullanımı tercih edilmemelidir.
- Ayrıca, alkid reçine esaslı boyaların kürlenme süresinin uzun, kimyasal dayanımının daha düşük olması gibi nedenlerden dolayı deniz sistemleri için yapılan tasarımları içeren sistem veya cihazlarda poliüretan esaslı boyalar kullanılması önerilmektedir.
- Vida ve somunların sıkılması sırasında sıkma işleminin boyaya zarar vermemesi için düz pul kullanılması gerekmektedir. Vida başı veya somun, pul üzerinde döneceği için boyaya verilecek zarar en aza indirgenmiş olacaktır. Düz pulun boya ile temas edecek yüzeyinin mutlaka çapaksız olması gerekir. Bu konu ile ilgili olarak “pulların çapaksız yüzeylerinin, boyalı yüzeylere temas edecek şekilde montajı yapılmalıdır” ifadesi veya benzer ifadelerinin özellikle montaj veya enstalasyon gereksinimleri dokümanlarında yer alması gerekmektedir.
- Vida dış delikleri boyanmamalıdır. Maskeleme yapılacak yüzey ve yerler tasarım dokümanında mutlaka tanımlanmalıdır.
- Kullanım sırasında sıklıkla sökülüp takılan, söküldüğünde kaybolmaması istenen veya operatörün sıklıkla kullandığı malzemelerin boyaya zarar vermemesi için uygun bir yere bağlanmaları ve söküldükten sonra takılacakları veya depolanacakları yerlerin oluşturulmasına özen gösterilmesi gerekmektedir.
- Hareketli yüzeyler (menteşe, kavrama ve kilitleme elemanları gibi) boyanmamalıdır. Bu yüzeylere kaplama ve gerekiyorsa yüzey sertleştirilmesi yapılmalıdır.
- Askeri sistem tasarımlarının dış ortama maruz kalacak yüzeylerinde, birimlerinde veya parçalarında aksi belirtilmedikçe mat boyalar kullanılmalıdır.
- Tasarımlarda boya uygulaması yapılacaksa, boyanın kesintiye uğramadan uygulanmasına özen gösterilmelidir. Mekanik parça veya birim tasarımlarında keskin kenar yerine mümkünse yuvarlatılmış kenarların kullanılması tercih edilmesi gerekmektedir.
- Elektriksel iletkenlik gibi nedenlerle boyanın kesintiye uğraması durumu kaçınılmaz ise, boyanın kenar ve köşelerde bitmeyecek şekilde devam ettirilerek dönmesine özen gösterilmelidir.

- Deniz platformlarında kullanılacak sistem veya cihazların dış yüzeyleri genellikle RAL 7001 rengine boyanmaktadır. İç sistem birimlerinde ise genellikle RAL 7032 veya RAL 7035 tercih edilmektedir. Boya seçiminde bu bilgiye dikkat edilmelidir.
- Boya tonunun tam tutabilmesi için referans olarak boya katalogları alınmalı ve mümkünse tek bir katalog üzerinden seçimin yapılması önerilmektedir.
- Astar boyanın tümüyle kürlenmesi beklenmeden son kat boya uygulanması durumunda ve çözücü buharlarının yeterince buharlaşmasına imkân verilmediği durumlarda boya katmanları arasında kabarmalar görülebilmektedir. Bu nedenle kürlenme süresine uyulmalıdır.
- Sistem seviyesindeki tasarımlarda şalter, jeneratör, vb. alt sistemlerin platform ile aynı renkte olmasına özen gösterilmesi gerekmektedir.
- Elektriksel iletkenlik gerektiren yüzeyler, boya uygulaması sırasında boya ve boya buharı ile kirlenmesini önlemek amacıyla maskelenmesi gerekmektedir.

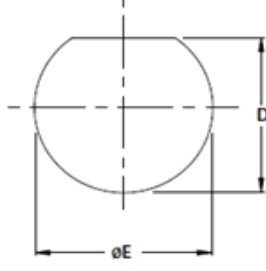
3.3.7. Askeri konektörlerin kullanım tasarım ve gereksinim önerileri

- Askeri sistem tasarımları için kablo takımlarının veri taşıyan koaksiyel, ethernet, fiber optik gibi özel hatlar haricinde, konektörleri MIL-DTL-38999 seri III ailesinden seçilmelidir.
- Askeri sistem tasarımlarında güç taşıyan konektörler D38999 olabileceği gibi, VG95234 Electrical connectors with bayonet coupling; pressure-water tight, up to 245A; mounting, tools; detail specification standardından da seçilebilmektedir.
- Deniz platformlarında korozyona karşı paslanmaz çelik sınıfı konektörlerin kullanılması önerilmektedir. Bu nedenle konektör tanımında malzeme sınıfının “K” olarak belirlenmesi önem taşımaktadır.
- Malzemesi bronz veya paslanmaz çelik olmayan konektörleri korozyona karşı korumak için üzerlerine silikon bant ve sıvı neoprene uygulanabilmektedir. Bu sayede konektör korozyona neden olabilecek çevre koşullarından izole edilmiş olmaktadır. Uygulama yönteminde silikon bant, birim/kablo konektörlerini ve arkılığı kapatacak şekilde tüm metal parçaların üzerine sarılmaktadır ve ardından bantın üzerine sıvı neopren sürülerek kurumaya bırakılmaktadır. Bu uygulamadan sonra konektörlere müdahale etmek bir miktar güçleşmekte ve her müdahale ihtiyacında bu işlemin tekrarlanması gerekmektedir.

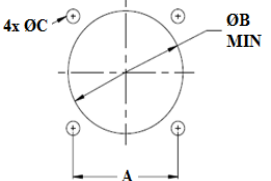
- Bronz konnektörler, yeşilimsi renkte oksit tabakası oluşturmaktadır. Bu tabaka “patina” olarak adlandırılmaktadır. Oluşan oksit tabakası altında bulunan bronzu korumaktadır. Bronz üzerinde oluşabilecek bu tabakayı önlemek için çok sıkı bir koruyucu bakım gerekmektedir. Bu bakım yapılmadığında patina tabakası oluşmaktadır ancak bu tabakanın oluşması fonksiyonel bir kayba neden olmamaktadır.
- Kara platformların da orta seviye bir korozyona maruz kalmayacağı düşünülen veya iç ortamlarda kullanılacak birimlerde alüminyum malzeme konektörler tercih edilmesinde sakınca görülmemektedir. Bu malzeme sınıfında en çok tercih edilen ve kullanılması önerilen konektör sınıfı alüminyum, olive drab kadmiyum nikel kaplama konektör sınıfıdır. Bu nedenle kara platformları veya iç ortamlarda korozyona maruz kalmayacak tasarımlarda “W” sınıf konektör seçimi hem maliyet hem de tedarik anlamında önem taşımaktadır.
- Hazır alınan birimlerin üzerinde, alüminyum dışında farklı bir malzemeden yapılmış konnektör olması durumunda bu konnektörlere bağlanacak kablo takımlarının tasarımıda kullanılacak olan konnektörler ve arkalıklar da aynı malzemeden seçilmelidir.
- SMA tipi konektörler montaj sırasında aşınmalar ve buna bağlı olarak oluşan korozyon problemleri nedeniyle dış ortamda kullanılacak birimlerde kullanılmamalıdır.
- Kullanılacak konektörler, konektöre yapılacak bağlantının kolayca yapılıp sökülebilmesine izin verecek şekilde düz veya 90 derece olarak seçilmelidir.
- Birim içi kablo takımları ve kablo ağaçlarında yer alan panel tipi konnektörler, panele içeriden takılabilecek tipte seçilmelidir.
- Lehimli tip konektörler, lehim fazlası, alkol ve reçine gibi nedenlerden dolayı yüksek gerilim testlerinde sorun yaratmaktadır. Tasarımlarda lehimli yerine olabildiğince krimppli tip konektörlerin tercih edilmesi önerilmektedir.
- Güç hattı taşıyan kablo üzeri konektörlerin, herhangi bir yere çarpıp, düşüp veya açıkta bırakılması ihtimaline karşı konektörler pinlerinin kısa devre oluşturmaması için dişli tipte seçilmesi önerilmektedir.
- Birim üzeri veya kablo üzeri farketmeksizin, konektörler kullanım dışı ise mutlaka koruyucu kapak ile korunması gerekmektedir. Birim üzeri ise konektörün kendi kapağı takılabilmektedir. Ancak özellikle kablo tarafı konektörler için kullanılmadıkları sürece plastik veya statik dağıtıcı kapaklar kullanılarak muhafaza edilmesi önerilmektedir. Statik dağıtıcı kapaklar pozitif ESD sağlaması sebebiyle değişik büyüklükteki standart konnektörler için fiziksel koruma sağlamaktadır. Ayrıca dişli olmayan bayonet tipi konnektörler için de uygundur.

- Konektörlerin birim üzeri konumlandırılmasına ait tasarımlarda açılması gereken delik ve tolerans boyutları sızdırmazlık önlemleri için önem taşımaktadır. Buna göre, konektörlerin takılacağı panel et kalınlığının 1,57 mm ile 3,18 mm arasında olması tavsiye edilmektedir.
- Konektörlerin panele takılacağı delik çap ve tolerans bilgileri konektör boyutuna göre değişmektedir. Panele veya birim duvarına somun ile bağlanan jam nut tipi konektörler için çap ve tolerans bilgileri Çizelge 3.12’de verilmiştir. Panele veya birim duvarına vidalı bağlantı ile bağlanan D38999 konektörlere ait çap ve tolerans bilgileri Çizelge 3.13 ile verilmiştir.

Çizelge 3.12. Jam-nut tipi D38999 konektörler için çap ve tolerans bilgileri [95]

Konektör Boyutu ve Harfi	ØD (mm)		ØE (mm)		Konektör Görünümü	Ölçüleri
	Tolerans:	+0.00 -0.25	Tolerans:	+0.25 -0.00		
A (9)		16.70		17.78		
B (11)		19.59		20.96		
C (13)		24.26		25.65		
D (15)		27.56		28.83		
E (17)		30.73		32.01		
F (19)		33.91		35.18		
G (21)		37.08		38.35		
H (23)		40.26		41.53		
J (25)		43.43		44.70		

Çizelge 3.13. Flanşlı D38999 konektörlere ait çap ve tolerans bilgileri [95]

Konektör Boyutu ve Harfi	A (mm)	ØB (mm)		ØC (mm) Tolerans: ±0.13	Konektör Görünümü	Ölçüleri
		Flanş Montajı Arkadan	Flanş Montajı Önden			
A (9)	18.26	16.66	13.11	3.25		
B (11)	20.62	20.22	15.88	3.25		
C (13)	23.01	23.42	19.05	3.25		
D (15)	24.61	26.59	23.01	3.25		
E (17)	26.97	30.96	25.81	3.25		
F (19)	29.36	32.94	28.98	3.25		
G (21)	31.75	36.12	32.16	3.25		
H (23)	34.93	39.29	34.93	3.91		
J (25)	38.10	42.47	37.69	3.91		

Kablo kullanım önerileri;

- Kablo donanımı ve tasarım gereksinimleri, sistem gereksinimleri ile birlikte belirlenmektedir. Bunun sebebi olarak, sistemin kullanılacağı platform ve çevre koşullarının kablo donanımı için seçilecek malzemeleri etkilemesi olarak görülebilir.
- Kablo takımında kullanılan başlıca malzemeler konnektör, arkalık, teller, kablo, ekran, şekilli makaronlar, etiketler ve kablo takımı içindeki bağlantılarda kullanılan lehimli makaronlardır. Bunların dışında zaman zaman sistemdeki ihtiyaca bağlı olarak konnektör kapakları gibi farklı malzemeler de kullanılabilir.
- Kabloların entegrasyon platformuna yerleşimi esnasında kabloların koruma altında kalması sağlanmalı, mümkün olan yerlerde kablo kanalından geçirilmelidir.
- Kablo donanımının entegrasyonu esnasında kabloların keskin yüzeylerden zarar görmeyecek şekilde montajı sağlanmalıdır.
- Entegrasyon sırasında kablo büküm çapları dikkate alınarak kablo takımları monte edilmeli, kablolarda hasara ve sinyal kaybına neden olabilecek fazla bükülmeler engellenmelidir.
- Kablo uçlarındaki konnektörlere ve bunlar üzerindeki kontaklara yük binmesini engellemek için kablo bağlarıyla kablo takımları gerekli yerlerden sisteme tutturulmalıdır.
- Hareketli kablolarda kablonun burulması veya bükülmesini engellemek, azaltmak ve konnektöre yük binmesini engellemek için kablo yerleşimine ve kablo bağlarıyla tutturulmasına özen gösterilmelidir.
- Kablaj tasarımında kullanılan malzemeler VG 95343 Part 14 Heat Shrinkable Componenets- Part 14: compatibility test for component groups, requirements, tests standardı ile uyumlu olmalıdır.
- Tasarım koşulları, IPC/WHMA-A-620 kablo ve kablaj takımları kabul gereklilikleri standardına uygun üretim yapılabilecek şekilde oluşturulmalıdır.
- Kabloların çalışma sıcaklığı aralığı sistemin çalışma sıcaklığı aralığını karşılamalıdır. Sıcaklık alt limitlerinde kablo esnekliğini korumalı, kılıfı kırılmamalıdır.
- Kablo takımlarının boyları ayarlanırken monte edilen yerdeki ölçülere veya sistemlerin üzerinden alınan ölçülere, gerilmelere maruz kalmayacak ve en az bir kez onarımı tolere edebilecek şekilde paylı boylar verilmesi gerekmektedir.
- Kablo içindeki teller ve kablo kendinden sönmülenebilen/alev almayan yapıda olmalıdır.
- Kılıf ve yalıtım malzemesi olarak PVC kullanılmamalıdır.

- Güneş ışımasına maruz kalan sistemlerdeki veya dış ortama maruz kalacak kablo takımlarının malzemeleri, güneş ışıması etkisine karşı korumalı olmalıdır.
- Dış ortamda kullanılacak kablo takımları sözleşmede geçmese bile en azından yağmura karşı su sızdırmaz olmalıdır. Projede sızdırmazlık gereksinimi varsa bu seçilen malzemeler ve tasarımla sağlanmalıdır. Uygun malzeme bulunamıyorsa bant ve sıvı neopren kullanılarak entegrasyon sırasında konnektörler karşılığına takıldıktan sonra sızdırmazlık sağlanmalıdır.
- Tasarımda korozyona karşı malzeme seçimi ile önlem alınamıyorsa entegrasyon bant ve sıvı neopren uygulamasıyla korozyon önlenmelidir.
- Kablolar, hidrolik yağlardan ve kimyasal maddelerden etkilenmeyen, mekanik aşınmaya karşı dayanıklı, askeri şartlara uygun kılıflara sahip olmalıdır.
- Sistemin kablo donanımında kullanılan kablolar kablay ve mekanik yerleşimi olumsuz yönde etkilemeyecek kadar esnek yapıda olmalı, mümkün olduğunca küçük çaplı ve hafif olmalıdır.
- Kablo ekranlarının 360° süreklilik sağlayacak şekilde konnektör gövdesine bağlantısını sağlayacak metal arkalıklar kullanılmalıdır. Arkalık malzemelerinin, konnektör malzemesi ile aynı olmasına dikkat edilmelidir.
- Kontaklar üzerine güç binmesine engel olacak şekilde tasarım yapılmalı, arkalık seçimine dikkat edilmelidir.
- Özel bir durum yoksa iletkenler kalay kaplı bakır olmalıdır.
- Uzatma kablosu gibi yerde sürüklenilecek, makaraya sarılıp açılacak, serilirken çekme kuvvetine maruz kalabilecek kabloların seçiminde kablonun bu şartlar altında deformasyon yaratmayacak yapıda olmasına dikkat edilmelidir.
- Kabloların üzerinde çatlak, yırtık, çentik gibi hatalar olmamalıdır.
- Gemi platformlarında kullanılacak olan birimlere proje gereklerine göre makaron kullanılamayacak ise iç ortamlarda plastik, dış ortamlarda paslanmaz çelik etiketler kullanılabilir. Uyarı etiketlerinde ve dış ortamda kullanılacak tüm etiketler paslanmaz çelik olmalıdır.

3.4. Çevre Koşul Gereksinim Önerileri

Güvenilirlik, bir sistemin, bileşenin veya cihazın belirtilen çalışma koşulları altında belirli bir süre boyunca hatasız çalışma olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Güvenilirlik mühendisliği disiplini temel olarak arızanın nedenleri, dağılımı ve tahmini üzerine bir

çalışmadır. Askeri sistemler mekanik ve elektronik sistemlerin, birleşimini oluşturan tasarımlardan oluşmaktadır. Dolayısıyla sistemin genel güvenilirliği, her bir alt birimin kendi arıza oranına doğrudan bağlı olmaktadır. Birimler tasarım konsepti aşamasındayken yapılan uygulamalar ve sistem faaliyete geçtiğinde yapılan uygulamalar sisteminin güvenilirliğini belirlemektedir.

Bir mühendislik sisteminin yaşayabileceği arızalar genellikle tasarım hataları, üretim hataları, bakım onarım ihmalleri, tasarım sınırlarının aşılması gibi başlıklara bölünebilmektedir. Tasarımsal hatalar arasında en önemlileri, çalışma faktörlerinin tasarıma dâhil edilmemesi, yükler ve çevre koşulları hakkında eksik bilgiler, hatalı hesaplamalar ve kötü malzeme seçimi sayılabilmektedir. Bir sonraki aşamanın üretim olduğu düşünüldüğünde, yapılan tasarımlar hatasız olsa dahi, üretimin herhangi bir aşamasında oluşan kusur tasarımı bozabilmektedir. Yorulma çatlaklarına yol açan kötü yüzey kalitesi, keskin kenarlar veya işlemler sonrası oluşan çapaklar gibi kusurlar üretim hatalarına sebep olmaktadır. Ayrıca, cihaz veya sistemlerin kullanımı esnasında operatör, kullanım sınırlaması getirilen sıcaklık, hız veya başka bir değişkenin sınırlarını aşarsa, ekipmanın arızalanması muhtemel olmaktadır. Sistemler veya birimler, belirlenen aralıklarda yeterli bakıma alınacak şekilde tasarlanmaktadır. Bakım faaliyetleri günlük, haftalık, aylık, 6 aylık veya yıllık seviyelerde olabilmektedir. Bu süreler bakım faaliyetinin niteliğiyle alakalı olmaktadır. Sistemlerin bakımları ihmal edildiğinde veya uygun şekilde yapılmadığında cihazların kullanım ömürleri kısalmaktadır.

Oluşan arızalar genellikle aşırı elastik deformasyon, aşırı plastik deformasyon, kırılmalar veya aşınma sebebiyle parça geometrisinin kaybı gibi sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Mekanik bileşenler için en genel hata ve arıza sebepleri Çizelge 3.14’ te verilmiştir.

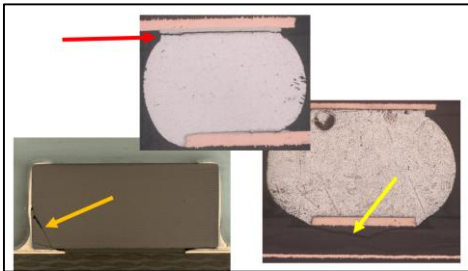
Çizelge 3.14. Mekanik bileşenler için arıza modları

Elasik Deformasyon	Darbe
Akma	Sürtünme
Kırılma	Sürünme
Sünek kırılma	Stres Kopması
Gevrek Kırılma	Termal Şok
Yorulma	Burkulma
Korozyon	Oksidasyon
Aşınma	Erozyon
Sızdırmazlık	Yapıştırma Hataları

Cihazların yağmur, yüksek nem ve buz gibi çevre koşullarına göre tasarlanmadığı durumlara maruz bırakılması genellikle arıza modlarının oluşmasını tetiklemekte, hızlandırmakta ve cihazın hizmet ömrünü önemli ölçüde kısaltmaktadır.

Yine korozyon önlemleri kapsamında ilk adım mekanik tasarım aşamasında başlamaktadır. Askeri sistem tasarımlarının büyük bir kısmı elektronik kartlar ve donanımlardan oluştuğundan birimlerin sızdırmazlığı cihaz sağlığı ve kullanım ömrü açısından önemli hale gelmektedir. Özellikle mekanik bağlantı elemanları ile montajı yapılan ve sızdırmazlık beklenen cihazlarda önlemlerin bağlantı noktaları ve bağlatı yüzeyleri çevresinde yoğunlaştırılması gerekmektedir. Vida yerleşimi, conta kullanımı, conta yerleşimi gibi parametreler ancak doğru tasarlanmış ise koruma sağlamaktadır. Sistemlerin bu gereksinimlere göre tasarlanıp tasarlanmadığını test edebilmek ve saha da yaşanabilecek arızalara erken müdahalenin sağlanabilmesi için nem testi, tuz sisi testi gibi tahrip edici testler uygulanarak sonuçlara göre alınması gereken önlemler belirlenmektedir. Test sonucu alınan önlemler ile fabrikada veya sahada yaşanan işçilik ve zaman kayıpları en alt seviyeye düşürülmektedir.

Askeri ortamlar, sıcaklık atermalizasyonu, boresight tutma ve titreşim stabilizasyonu ile ilgili olarak ciddi tasarım sınırlamaları getirmektedir. Bu nedenle platform bazlı ilk tasarım gereksinimleri, elektronik kartların ve lehimli entegrelerin platform veya yaşam şartları sebebiyle yaşamış olduğu titreşim, mekanik ve termal şoktur. Bu etkiler sebebiyle PCB'ler genellikle yorulma ve kırılma gibi mekanik arızalar yaşamaktadırlar. Şekil 3.10 içerisinde ok ile gösterilen noktalara platformdan gelen mekanik şok ile kırılan lehim bağlantıları görülmektedir. Bu kırılma sebebiyle kart fonksiyonunu yerine getirememekte ve arıza yaşanmaktadır.



Şekil 3.10. Mekanik şok sebebiyle PCB üzerindeki lehim kırılması [96]

Sistemlerin bu gereksinimlere göre tasarlanıp tasarlanmadığını test edebilmek ve saha da yaşanabilecek arızalara erken müdahalenin sağlanabilmesi için taşıma titreşimi, platform titreşimi, mekanik şok, termal şok veya düşürme gibi tahrip edici testler uygulanmaktadır. Sonuçlara göre alınması gereken önlemler belirlenmektedir. Platform titreşim seviyesine göre seçilen ağırlaştırılmış test profilleri ile arızaların erken tespiti ve arıza sonrası önlemler alınmaktadır.

Sistem güvenilirliğini artırmak, entegrasyon sonrası arıza oranını en aza indirmek, performansı ve sahada hayatta kalma kabiliyetini ölçmek ve optimize etmek için her sistem, çeşitli konuşlandırılmış platform türlerine göre (örneğin kara, deniz vb.) seçilen çevre koşul testlerine tabii tutulmaktadır. MIL-STD-810 standardı ile cihazların ömür devrinde çevresel streslere maruz kaldığında nasıl tepki vereceğini ve en önemlisi bu şartlar altında ve sonrasında cihaz performansını belirlenmektedir. Cihaz tasarımının, kullanılan malzemelerin, cihaz üretim ve montaj sürecinin doğrulanması veya eksiklerini belirlenmesi için, cihazdaki kusurların ortaya çıkması için yapılmaktadır.

3.4.1. Çevre testleri önerileri ve sıralamaları

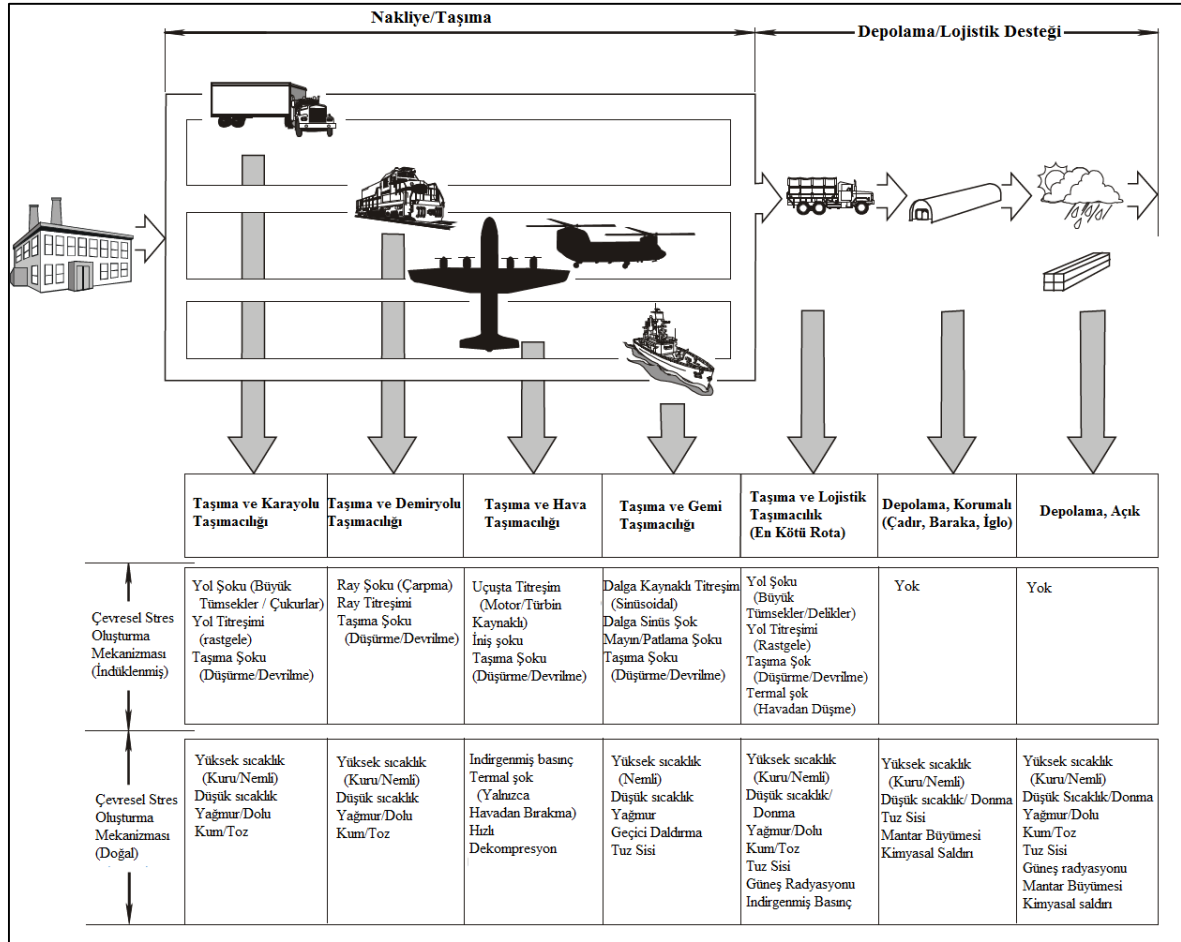
Entegrasyon platformundan bağımsız olarak askeri sistemlerde kullanılacak birimlere düşük ve yüksek sıcaklık için çalışma ve depolama testlerinin yapılması gerekmektedir. Deniz platformlarında dış ortamda çalışacak birimlerin asgari tuz sisi testine, nem testine, titreşim testine, şok testine, yağmur testine, güneş ışıması testine maruz bırakılması ve bu testlerden başarıyla geçebilmesi gerekmektedir. Deniz platformlarında iç ortamda kullanılan birimlerin ortamın korunma şartlarına bağlı olarak sıralanan testlerden bazılarına maruz bırakılması mecburi değildir. Kara sistemlerinde kullanılan dış ortam birimlerinin asgari titreşim, nem, şok, toz ve kum, güneş ışıması, ısı şok, yağmur testine maruz bırakılıp bu testlerden başarı ile geçebilmesi gerekmektedir. Kara sistemlerinde su ile temasta kullanılacak olan dış ortam birimlerinin sıvı kirlenmesi, daldırma testlerine maruz bırakılması gerekmektedir. Kara sistemlerinde kullanılan iç ortam birimlerinin ortam koşulu göz önüne alınarak sıralanan testlerden bazılarının çıkartılabilmektedir.

Standarta göre maruz kalma durumları genel olarak, cihazların depolama, taşıma, nakilye durumları ve operasyonel kullanım senaryoları için gruplandırılmıştır. Standart içerisinde

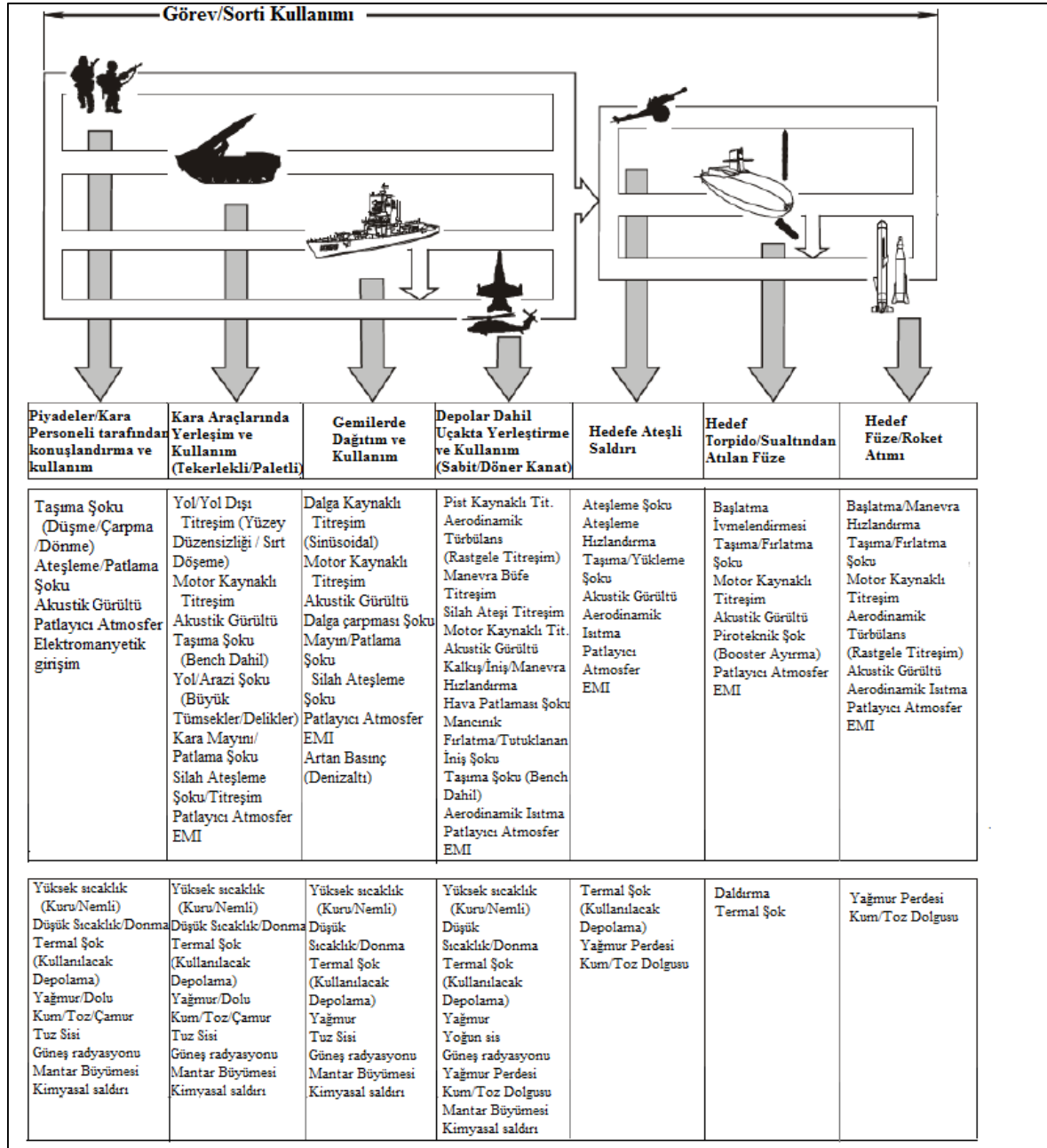
yer alan test yönergeleri, sistemin yaşamı boyunca maruz kalacağı şartlar düşünülerek seçilmektedir.

Sistemlerin yaşayabileceği çevresel faktörler standarda göre, endüktif ortam ve doğal maruz kalma ortamı olarak gruplandırılmaktadır. Askeri sistemler için genelleştirilmiş bir yaşam döngüsünde depolama koşulları için maruz kalınan çevresel faktörler Şekil 3.11’de, operasyonel çalışma koşulları için ise Şekil 3.12’ de verilmiştir.

Şekil 3.12’de verilen genelleştirilmiş yaşam döngüsü çevresel faktörleri, sistem tasarımlarının ve test koşullarının, maruz kalınacak ve çalışılacak çevresel koşullara göre uyarlanmasını sağlamaya yardımcı olan sistem mühendisliği yaklaşımlarını kullanmaktadır. Verilen şekiller, genelleştirilmiş bilgiler içermektedir ve test uygulamalarının platform bazlı seçimleri için fikir vermektedir. Örneğin, bir geminin endüktif ortamı, dalga kaynaklı titreşim (sinüzoidal), motor kaynaklı titreşim, akustik gürültü, dalga çarpması şoku, mayın/patlama şoku, silah ateşleme şoku, patlayıcı bir atmosfer, elektromanyetik girişim ve artan basınçtan (denizaltı) oluşmaktadır. Doğal maruz kalma ortamı ise, yüksek sıcaklıklar (kuru/nemli), düşük sıcaklıklar/donma, termal şok (kullanmak için depolama), yağmur, tuz sisi, güneş radyasyonu, mantar oluşumu ve kimyasal saldırıdan oluşmaktadır.

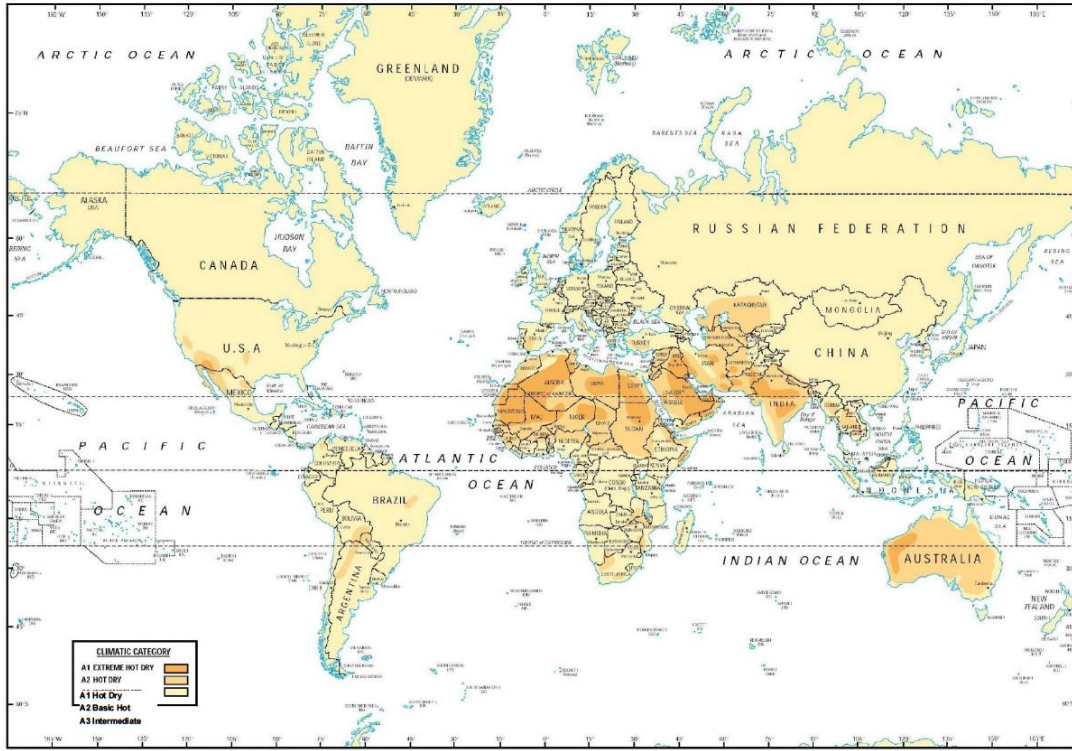


Şekil 3.11. Maruz kalınan indüklenmiş ve doğal çevre faktörleri, depolama [73]

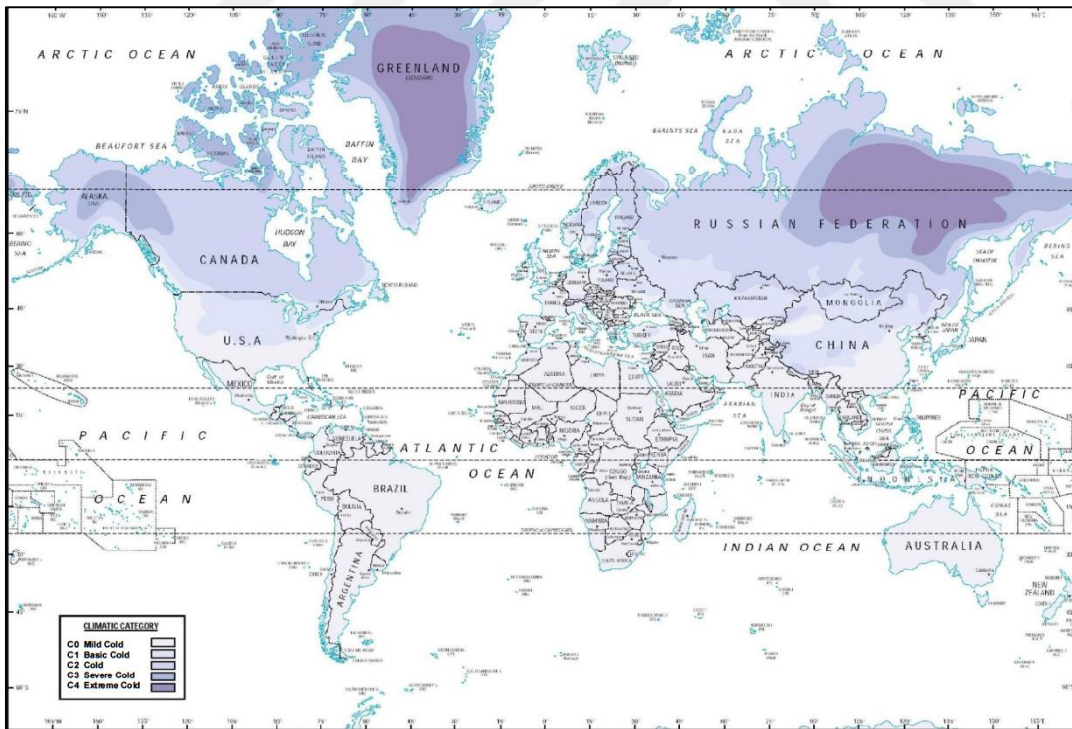


Şekil 3.12. Maruz kalınan indüklenmiş ve doğal çevre faktörleri, çalışma [73]

Askeri çevre koşulları standardına göre, ülkeler iklimsel kategorilere/bölgelere ayrılmıştır. Yüksek sıcaklık çalışma ile depolama ve düşük sıcaklık çalışma ile depolama testleri için referans sıcaklıklar, bu bölgeler baz alınarak belirlenmektedir. İklim kategorileri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 ile verilmiştir. Türkiye, Şekil 3.13'e göre sıcak iklim kategorileri arasında "A2, Basic Hot" olarak adlandırılan temel sıcak kategorisine, Şekil 3.14'e göre soğuk iklim kategorileri arasında ise "C1, Basic Cold" olarak adlandırılan temel soğuk iklim kategorisine dâhil edilmiştir.



Şekil 3.13. MIL-STD-810 standardı revizyon H'ye göre sıcak iklim kategorileri [73]



Şekil 3.14. MIL-STD-810 Standardı revizyon H'ye göre soğuk iklim kategorileri [73]

Belirlenen iklimsel bölgelerin çevre koşul testleri yapılırken referans alınması gereken sıcaklık değerleri Çizelge 3.15 ve Çizelge 3.16 içerisinde verilmektedir. Temel sıcak

kategorisi için yüksek sıcaklık çalışma ve depolama testlerinde cihazlar +43°C ile +63°C arasında daha önce gereksinim olarak belirlenmiş olan bir sıcaklığa tabii tutulmaktadır. Düşük sıcaklık çalışma ve depolama testleri için cihazlar -25°C ile -32°C arasında daha önce gereksinim olarak belirlenmiş olan bir sıcaklığa tabii tutulmaktadır. Ancak test sıcaklıkları projeye, cihazın öngörülen çalışma alanına, ihtiyaç makamı isterlerine veya konumuna göre sıcaklık değerleri değişebilmektedir.

Çizelge 3.15. MIL-STD-810 Standardı revizyon H'ye göre sıcak iklim sıcaklıkları [73]

Kategori	Lokasyon	Hava Sıcaklığı °C (°F)	Maruz Bırakılan °C (°F)
Temel Sıcak (A2)	Güneybatı Amerika Birleşik Devletleri, Kuzeybatı Meksika, Orta ve Güneybatı Amerika Birleşik Devletleri'nin kuru sıcak kategorisinden dışa doğru uzanan dünyanın birçok bölgesi. Batı Avusturalya, Sahra Afrika, Güney Amerika, Güney İspanya ve Güneybatı ve Güney Orta Asya	30-43 (86-110)	30-63 (86-145)
Kuru Sıcak (A1)	Güneybatı ve GüneyOrta Asya, Güneybatı Amerika Birleşik Devletleri, Sahra Afrika, Orta ve Batı Avusturalya ve Kuzeybatı Meksika	32-49 (90-120)	33-71 (91-160)

Çizelge 3.16. MIL-STD-810 Standardı revizyon H'ye göre soğuk iklim sıcaklıkları [73]

Kategori	Lokasyon	Sıcaklık	
		Hava Sıcaklığı °C (°F)	İndüklenmiş Çevre (Depolama ve Nakliye) °C (°F)
Temel Soğuk (C1)	Avrupa'nın çoğu; Kuzey bitişik ABD; Kıyı Kanada; Yüksek enlem kıyıları (örneğin, Alaska'nın güney kıyıları); Alçak enlemlerde Yüksek Rakımlar	-21 ile -32 arası (-5 ile -25 arası)	-25 ile -33 arası (-13 ile -28 arası)
Soğuk (C2)	Kanada, Alaska(iç kısım hariç);Grönland ("soğuk kutup" hariç);Kuzey İskandinavya; Kuzey Asya(bazı bölgeler), Yüksek Rakımlar (Kuzey ve Güney Yarım Küre); Alpler; Himalayalar; And Dağları	-37 ile -46 arası (-35 ile -50 arası)	-37 ile -46 arası (-35 ile -50 arası)
Şiddetli Soğuk (C3)	Alaska'nın içi; Yukon(Kanada);Kuzey Adaları içi; Grönland buz örtüsü; Kuzey Asya	-51 (-60)	-51 (-60)

Genel anlamda test uygulama sıralamasında iki tür yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki test ögesinin ömrünü korumaya yönelik bir test yaklaşımıdır ve yüksek ve düşük sıcaklık testleri gibi en az zarar verici olarak algılanan testleri test uygulama dizisinin başlarında

uygulamaktır. Diğer bir yaklaşım ise, sinerjik etkilerin ortaya çıkma olasılığını en üst düzeye çıkaran testleri uygulamaktır. Bu yaklaşıma göre, yüksek ve düşük sıcaklık testleri, titreşim ve şok testi gibi dinamik testlerden sonra uygulanmaktadır.

Tuz sisi, kum ve toz veya nem testlerinden önce mantar testi yapılmaması önerilmektedir. Bunun sebebi, yüksek konsantrasyonda tuz ve nemin çimlenen mantar gelişimini etkileyebilmesidir. Bunlara ek olarak kum ve toz, mantar gelişimine besin sağlayabilmektedir. Böylece test ögesinin biyo-duyarlılığının yanlış bir göstergesine yol açmaktadır.

Birden fazla iklim testi için aynı test ögesi kullanılacaksa, tuz birikintileri sonuçları etkileyebileceğinden, genellikle diğer iklim testlerinden sonra tuz sisi testinin yapılması önerilmektedir. Aynı test ögesi üzerinde tuz sisi, mantar ve nem testlerinin yapılması genellikle uygun karşılanmamaktadır. Bu testler oldukça tahrip edici testlerdir ve üç ortamdan gelen etkilerin birikmesi gerçekçi sonuçlar elde edilmesini engelleyebilmektedir. Ancak tek test ögesi bulunuyor ve bu testlerin yapılması gerekiyorsa, mantar ve nem testlerinden sonra tuz sisi testi yapılması gerekmektedir.

Kum ve toz testi, nem, mantar ve tuz sisi testleri de dahil olmak üzere diğer MIL-STD-810 standardındaki testlerinin sonuçlarını etkileyebilecek kadar test numunelerinde ciddi bir toz kaplaması bırakabilmektedir. Bu nedenle, özellikle kum ve toz testi için test sıralamasının neresinde olduğunu belirlemek önem taşımaktadır.

Bir test ögesinin, ömrünü daha az zararlı olduğu düşünülen ortamlarda sürdüreceği düşünülüyorsa, test sıralamasının son bölümünde patlayıcı atmosfer testi gerçekleştirilebilmektedir.

Titreşim, şok ve termal stres, sızdırmaz bir parçanın sızdırmazlık etkinliğini azaltabileceğinden ve yanıcı bir atmosfer daha kolay tutuşabileceğinden, test sıralaması başlarında titreşim, şok ve sıcaklık testleri yapılması önerilmektedir.

Diğer çevresel parametrelerle birlikte tozun varlığı, korozyona veya küf oluşumuna neden olabildiğinden sıcak ve nemli bir ortam, kimyasal olarak agresif tozun varlığında korozyona neden olabilmektedir.

Daldırma testi için iki veya daha fazla yaklaşım bulunmaktadır. Bir yaklaşım, test ögesinin ömrünü korumak için önce en az zarar veren ortamları uygulamaktır. Bu yaklaşımda, daldırma testi genellikle diğer iklim testlerinin çoğundan önce yapılmaktadır. Başka bir yaklaşım ise, ardarda gelen sorunları ortaya çıkarma olasılığını artıran bir sırayla farklı çevresel testler uygulamaktır. Bu yaklaşımda, test ögesinin dinamik testlere karşı direncini belirlemeye yardımcı olmak için, şok ve titreşim testi gibi yapısal testlerden önce ve sonra daldırma testi uygulanmaktadır. İfade edilen dinamik testler, titreşim ve şok testlerini, sıcaklık testleri yüksek ve düşük sıcaklıkları ve iklim testleri güneş radyasyonu (güneş ışığı), yağmur, nem, mantar, tuz-sis, daldırma ve donma/çözülme testleri ile sıcaklık testlerini içermektedir.

Akustik gürültü, sıcaklık, nem, basınç ve elektromanyetik alanlar gibi diğer çevresel koşullar altında malzeme performansını etkileyen stresleri indükleyebilmektedir. Bu nedenle test uygulama sıralamasının ilk aşamalarında gerçekleştirilmelidir.

Şok testinin sıralamasının belirlenmesi, test öğelerinin genel kullanılabilirliğine ve test amacının türüne göre değişebilmektedir. Normalde şok testleri, test sıralamasında başlarda, ancak herhangi bir titreşim testinden sonra planlanmalıdır. Şoklar birimlerin ömürlerinde genellikle titreşimlerden sonra meydana gelmektedir ve titreşimsiz şok testi anlamlı sayılmamaktadır.

Testin geliştirme, sertifikasyon veya dayanıklılık için olup olmadığına ve test örneğinin genel kullanılabilirliğine bağlı olarak bir silah ateşi şok testi yapılabilir. Bu test genellikle, titreşim, sıcaklık ve mekanik şok testlerinden sonra test sıralamasının başlangıcında gerçekleştirilmektedir. Test dizisinin ikinci kısmına genellikle bir balistik şok testi atanmaktadır. Bunun nedeni, bu test koşulunun genellikle savaş sırasında veya yaşam döngüsünün sonunda ortaya çıkmasıdır. Bu test, olağandışı ve özel özelliklerinden dolayı diğer testlerden bağımsız olarak da değerlendirilebilmektedir.

Genel test sıralama kılavuzu olarak, olayların beklenen yaşam döngüsü sırasını kullanılması önerilmektedir. Yine de en sık kullanılan çevresel testleri ve gerekli test sıralamaları, verilen önerilere dayanarak toplam üç çeşitle Çizelge 3.17 içerisinde verilmektedir. Üçüncü öneri, en az uygulanabilir olduğu için MIL-STD-810 tarafından tavsiye edilmemektedir ancak gerekirse sırası takip edilebilir.

Çizelge 3.17. Çeşitli test sıralamaları

1. Öneri	2. Öneri	3. Öneri
Titreşim Testi	Daldırma Testi	Nem Testi veya Mantar Testi
Şok Testi	İklimsel Testler	
Yüksek Sıcaklık ve Düşük Sıcaklık Testi veya Nem Testi	Sıvı Kirlenmesi Testi veya Tuz Sisi Testi	Tuz Sisi Testi
		Kum ve Toz testi

3.5. EMI-EMC Gereksinim Önerileri

- EMC etkilerinden korunmak için topraklama, ekranlama (izolasyon), ferritleme, filtreleme ve fiziksel ayırma gibi teknikler bulunmaktadır. Fiziksel ayırma haricindeki tedbirler tasarımsal etkilerdir ve birimler veya kablolar tasarlanırken dikkate alınması gerekmektedir.
- Kabloların dışında EMI koruma sağlamak amacıyla minimum %90 kapatma sağlayan örgü ekran olmalıdır.
- EMI ve EMC gereksinimlerine göre kablo takımları kategorize edilmeli ve gerekiyorsa entegrasyon platformlarında farklı kanallardan aralarında belirli mesafe kalacak şekilde yerleştirilmelidir.
- Platform seviyesi askeri birim entegrasyonlarında EMI/EMC gereksinim bilgileri MIL-STD-464 standardı ile verilmektedir. Bu standart, MIL-STD-461 gibi bir test prosedürü değildir. Kılavuz nitelik ile kullanılmaktadır. Farklı platformlarda ait EMI tehlikelerini tanımlamaktadır.

3.6. MTBF Hesaplama

Belirli bir sistemin güvenilirlik ve idame edilebilirliğin en önemli göstergelerinden biri Hatalar Arası Ortalama Süre (MTBF)'dir. Bu gösterge sistemde ortalama ne kadar sürede hata oluşacağını belirlemek için kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle MTBF, kullanım ömrü boyunca birbirini izleyen arızalar arasında geçen sürenin ortalama değeridir. Ancak MTBF kavramı, kullanım ömrü ile aynı kavramlara karşılık gelmemektedir. Örneğin MTBF değeri 800,000 saat (yaklaşık 90 yıl) olan bir birimin 90 yıldan çok daha önce kullanım ömrü dolmaktadır ve yaşlanma süreci başlamaktadır.

Güvenilirlik analizinin temel amacı; sistemler, cihazlar ve birimler için, geliştirme veya tasarım aşamasındaki ürünler için tasarımcıya geri bildirimde bulunularak, tasarım uygunluğunun değerlendirilmesini, tasarım alternatiflerinin karşılaştırılmasının, zayıf noktaların belirlenmesini ve güvenilirlik gereksinimlerinin doğrulanmasını sağlamaktır. Analiz ile sistemi oluşturan mekanik, elektronik ve elektro-mekanik parçaların, belirlenmiş metotlar, formüller ve modeller kullanılarak tahmini arıza oranı hesaplanmaktadır.

Mekanik MTBF değerinin hesaplanması için “Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment” adlı yayın referans alınmıştır. Elektronik birimlerin MTBF değerlerinin hesaplanması için genellikle MIL-HDBK-217 ve MIL-STD-756 standartlarında belirtilen güvenilirlik modelleri esas alınmaktadır.

Arıza oranları (failure rate) ve MTBF değerleri, sistemi oluşturan bileşenler için standartlarda tanımlanmış denklemlerin kullanılması ile hesaplanmaktadır. Bu denklemler, malzemelere ait stres parametrelerini, sıcaklık, çalışma voltajı, maksimum voltaj değeri, güç oranları, malzeme kalitesi ve çevre faktörleri gibi bilgileri içermektedir.

MIL-HDBK-217’de tanımlanan parça sayım methodu ve parça stres methodu olarak bilinen iki ampirik güvenilirlik tahmin yöntemi, elektronik ekipmanın ortalama ömrünü, MTBF cinsinden tahmin edilebilmesi için kullanılmaktadır. Parça sayım methodunda MTBF değeri, elektronik bir sistem veya cihaz içerisindeki tüm bileşenler için arıza oranlarının jenerik tablolardan alınan değerleri toplamının tersi alınarak belirlenmektedir. Kullanılan komponentlerin kategorisi ve sayısının bilinmesi bu analizin yapılması için yeterli olmaktadır. Ancak parça stres metoduna göre daha kaba ve kötümser bir sonuç vermektedir. Ayrıca bu yöntem ile hesaplama yapılırken elektriksel ve sıcaklık stresleri göz ardı edilmektedir. Parça stres methodu (part stress analysis prediction method) ise bir malzemenin arıza oranını belirleyen faktörü, malzemenin dayanıklılık seviyesi ile maruz kaldığı stres seviyesi arasındaki etkileşime bağlamaktadır. Farklı stres seviyelerindeki malzemeler, farklı arıza oranlarına sahip olmaktadır. Bu yöntem, malzemenin maruz kalacağı stres bilgisine (sıcaklık, nem, titreşim, voltaj, akım, güç gibi) ve bu streslerin malzemenin arıza oranına etkisine dayandırılmaktadır. Parça stres analizi sistem için oldukça detaylı bir güvenilirlik analizi yapılmasına imkân tanımaktadır. Ancak stres oranlarının, sıcaklık, uygulama ve çevre verisinin belirlenmesi gibi bilgiler tasarımın ilerleyen aşamasında netleştikten, ön

tasarım aşamasında uygulanamamaktadır. Bu metotta arıza oranı hesabı, her bir kategori için farklı modellere sahip olmaktadır.

MTBF değerini hesaplayabilmek için öncelikle cihaz, birim veya sistemdeki mekanik parçalar mekanik elemanlara ayrılıp listelenmektedir. Ardından her parça için MTBF değeri hesaplanması ve daha sonra toplam MTBF değerinin belirlenmesi ile toplam hesaplama yapılmaktadır. Bu bölümde mekanik birimlerden vida, rulman, şaft (mil), pim, kama ve dişliler, elektronik birimler için ise analiz yöntemleri ve MTBF hesaplama methodları anlatılmıştır.

3.6.1. Dişli bağlantı elemanlarında hata oranı hesaplama

Dişli vidalarda hata oranı “ λ_F ” ile temsil edilmektedir. Hata/milyon saat cinsinden Eş. (3.2) kullanılarak hesaplanmaktadır [97]. Eşitlik açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

$$\lambda_F = \lambda_{F,B} \times C_{SZ} \times C_L \times C_T \times C_I \times C_K \quad (3.2)$$

$\lambda_{F,B}$ =Vida temel hata oranı, hata/milyon saat (Çizelge 3.18)

C_{SZ} =Boyut çarpma faktörü

C_L =Farklı yükleme uygulamalarının etkileri için düzeltme katsayısı

C_T =Yüksek sıcaklık için düzeltme faktörü

C_I =Darbe yükü sıklığı için düzeltme katsayısı

C_K =Bağlantı elemanı dişleri için stres yoğunluğu düzeltme katsayısı

Çizelge 3.18. Temel hata oranı listesi [97]

Malzeme Sınıfı	Çap (inç)	Yük kpsi	Temel Hata Oranı hata/milyon saat
SAE 1	1/4 – 1 1/2	33	0,260
SAE 2	1/4 – 3/4	55	0,156
SAE 2	3/4 – 1 1/2	33	0,260
SAE 4	1/4 – 1 1/2	65	0,132
SAE 5	1/4 – 1	85	0,101
SAE 5	1 – 1 1/2	74	0,116
SAE 5	1 1/2 – 3	55	0,156
SAE 7	1/4 – 1 1/2	105	0,082
SAE 8	1/4 – 1 1/2	120	0,072
ISO 4.6	–‘den 1 1/2	33	0,260
ISO 5.8	–‘den 1 1/2	55	0,156
ISO 8.8	–‘den 1 1/2	85	0,101

Çizelge 3.18 (Devam) Temel hata oranı listesi [97]

Malzeme Sınıfı	Çap (inç)	Yük kpsi	Temel Hata Oranı hata/milyon saat
ISO 10.9	–‘den 1 1/2	120	0,072
ASTM A325	1/2 – 1	85	0,101
ASTM A325	1 1/8 – 1 1/2	74	0,116
ASTM A354, BB	1/4 – 2 1/2	80	0,107
ASTM A354, BB	2 3/4 – 4	75	0,114
ASTM A354, BC	1/4 – 2 1/2	105	0,082
ASTM A354, BC	2 3/4 – 4	95	0,090
ASTM A354, BD	1/4 – 1 1/2	120	0,072
ASTM A490	1/2 – 1 1/2	120	0,072

Küçük bağlantı elemanları veya mekanik parçalar, kendilerine göre daha büyük olanlardan daha fazla yorulma mukavemeti göstermektedirler. Daha büyük yüzeyler genel olarak daha fazla kusur barındırdığından, büyük mekanik parçalarda arıza olma olasılığı daha yüksek çıkmaktadır. Boyut çarpma faktörü, deneysel yorulma ömrü verilerinin bulunduğu ve farklı bir boyutu yansıtan bir ayarlamının yapılacağı durumlar için geçerlidir. Sabit dönme olmadan katı dairesel malzemelerin bükülmesinin ek olarak boyut farkını da hesaba katmak için bir düzeltme faktörü oluşturulmuştur. Bu düzeltme faktörü C_{SZ} olarak simgelenen boyut düzeltme faktörüdür ve Eş. 3.3 ile hesaplanmaktadır [97].

$$C_{SZ} = \left(\frac{0,370 \times D}{0,3} \right)^{-0,1133} \quad (3.3)$$

Burada D ile ifade edilen birim cıvata veya vidanın en büyük çapıdır ve birimi inç cinsindendir. Eş. 3.3 yalnızca 2 inç veya daha küçük çapa sahip vidalar için geçerli olmakla birlikte daha büyük çaptaki bağlantı elemanları için sabit “1” değeri alınmaktadır. Formül çap birimi olarak inç aldığından, metrik vida çapının 25.4 mm değerine bölünerek kullanılması gerekmektedir.

C_L değeri farklı yükleme uygulamaları için düzeltme katsayısıdır. Farklı yükleme tipleri için belirlenmiş katsayılar bulunmaktadır. Bu katsayılar Çizelge 3.19’da verilmiştir.

Çizelge 3.19. Çeşitli yüklemeler için düzeltme katsayısı [97]

Yükleme Tipi	C_L
Eksenel Yükleme ($UTS \leq 220$ kpsi)	1,09
Eksenel Yükleme ($UTS > 220$ kpsi)	1,00
Bükülme	1,00
Burulma ve Kesme	1,72

Yüksek sıcaklıklardaki bağlantı elemanlarının kullanımında statik ve dinamik mukavemet, sürünme ve termal genleşmedeki azalmanın etkilerinde düzeltme elde etmek için bir düzeltme faktörü oluşturulmuştur. Bu düzeltme faktörü C_T olarak simgelenen yüksek sıcaklık düzeltme faktörüdür ve Eş. 3.4 ile hesaplanmaktadır [97].

$$C_T = \left(\frac{460 + T_0}{620} \right) \quad (3.4)$$

Burada T_0 ile ifade edilen birim çalışma sıcaklığıdır ve birimi $^{\circ}\text{F}$ cinsindendir. Eş. 3.4 çalışma sıcaklığı 160°F 'dan büyük sıcaklıklar için geçerli olmakla birlikte daha yüksek sıcaklıklar için sabit "1" değeri alınmaktadır. Formül sıcaklık birimi olarak fahrenheit aldığından, celsius derece cinsinden çalışıldığı zaman birim dönüşümlerinin yapılarak (derecenin 1,8 katı ile 32 değerinin toplanarak) kullanılması gerekmektedir.

Şok, darbe yükleri söz konusu olduğunda düzeltme faktörü kullanılması gerekmektedir. Buna göre darbe yükleme sıklığı hafif, orta, ağır ve çok ağır olmak üzere dört ana grupta toplanmıştır. Normal titreşim koşulları ve devamlı yüksek titreşim koşullarına maruz kalma durumlarına göre katsayılar değişmektedir. Bu düzeltme faktörü C_I olarak simgelenen darbe sıklığı düzeltme katsayıları düzeltme faktörüdür ve Çizelge 3.20 ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.20. Darbe sıklığı düzeltme katsayıları [97]

Darbe Kategorisi	C_I	
	Normal Titreşim	Sürekli Ağır Titreşim
Hafif (dönen makine motorları, türbinler, santrifüj pompalar)	1,00	1,50
Orta (döner ve ileri geri hareket makineleri-sıkıştırma, pompalar)	1,25	1,88
Ağır (aletler ve kalıplar için presler, makaslar)	1,67	2,50
Çok Ağır (çekiciler, haddehaneler, kırıcılar)	2,50	3,75

Vida dişlerinin yuvarlatılmış veya kesilmiş olması tipik cıvata hatalarına da neden olduğu görüldüğünden bağlantı elemanlarının dişleri için bir düzeltme faktörünün hesaplara dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu düzeltme faktörü C_K olarak simgelenen stres yoğunlaşması düzeltme faktörüdür ve Çizelge 3.21 ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.21. Stres yoğunlaşması için düzeltme katsayıları [97]

SAE Sınıf Cıvata	Yuvarlatılmış Dişler	Kesilmiş Dişler
	C_K	C_K
0-2	2,2	2,8
4-8	3,0	3,8

Sistem üzerinde kullanılan vida veya cıvata için yapılan MTBF analizi toplam analize aktarılmadan önce analizi yapılan vidanın kullanım adediyle çarpılarak hesaba aktarılmaktadır.

3.6.2. Rulman hata oranı hesaplama

Sistemlerde kullanılan rulmanların hata oranı “ λ_{BE} ” ile temsil edilmektedir. Hata/milyon çalışma saati cinsinden Eş. 3.5 kullanılarak hesaplanmaktadır [97]. Eşitlikte yer alan ifadeler aşağıda açıklanmıştır.

$$\lambda_{BE} = \lambda_{BE,B} \times C_Y \times C_R \times C_V \times C_{CW} \times C_t \times C_{SF} \times C_C \quad (3.5)$$

$\lambda_{BE,B} = 1/L_{10h}$ ve burada; $L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{L_S}{L_A} \right)^y$ ile ifade edilmektedir.

L_{10h} =Rulman ömrü (%90 güvenilirlik için) çalışma saati,

L_S =Rulmanın dinamik yük derecesi, N,

L_A =Rulmanın üzerindeki bileşke radyal yük, N,

y=Sabit, bilyeli rulmanlar için 3,0; makaralı rulmanlar için 3,3

n=Çalışma hızı, tur/dak.

C_Y =Yüklemeye için ömür düzeltme katsayısı

C_R =Güvenilirlik için ömür düzeltme katsayısı,

C_V =Yağlayıcı için ömür düzeltme katsayısı,

C_{CW} =Yağlayıcıya karışan su miktarı için ömür düzeltme katsayısı,

C_{SF} =Çalışma hizmet koşulları için ömür düzeltme katsayısı

C_C =Yağlayıcı kirlenme seviyesi için ömür düzeltme katsayısı

C_R güvenilirlik düzeltme katsayısı %90 güvenilirlik için “1” alınmaktadır. Diğer güvenilirlik değerleri için Çizelge 3.22 referans alınmaktadır.

Çizelge 3.22. Güvenilirlik düzeltme katsayısı [97]

Güvenilirlik R, %	L _a	Güvenilirlik ömrü düzeltme katsayısı
90	L ₁₀	1,00
95	L ₅	1,62
96	L ₄	1,88
97	L ₃	2,29
98	L ₂	3,01
99	L ₁	4,79
50	L ₅₀	0,29

C_V değeri, tasarlanan yağlayıcıdan farklı bir yağlayıcı kullanılırsa düzeltme katsayısı olarak kullanılmaktadır. Tasarlanan ve kullanılan yağlayıcı aynı ise katsayı değeri “1” olarak alınmalıdır. Eş. 3.6 yağlayıcı için ömür düzeltme katsayısı değerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Bu eşirlikte v_0 ifadesi tasarlanan yağlayıcının vizkozitesi olup v_L ise kullanılan yağlayıcının vizkozitesidir [97].

$$C_V = \left(\frac{v_0}{v_L} \right)^{0,54} \quad (3.6)$$

C_{CW} yağlayıcıya su karışması durumunda hesaplamalara dâhil edilmesi gereken bir düzeltme katsayısıdır. Rulmanın kullanıldığı birim sızdırmazlığı sağlanmış ve sızdırmazlık açısından yalıtılmış bir tasarım ise rulman yağlayıcısına su karışmayacaktır. Böyle durumlar için bu katsayı değeri “1” olarak alınmalıdır. Aksine olan durumlar için Eş. 3.7 kullanılmaktadır. Eş. 3.7 içerisinde geçen “CW” ifadesi yağlayıcıya karışan suyun yüzdesidir. Yağlayıcıya karışan su miktarı yüzdesi 0,8’den büyük olduğu durumlar için C_{CW} değeri sabit “11” olarak alınmaktadır [97].

$$C_{CW} = 1 + 25,50CW - 16,25CW^2 \quad (3.7)$$

C_t çalışma sıcaklığı için belirlenmiş bir düzeltme katsayısıdır. Bu değer sıcaklığın yüksek olduğu değerlerde hesaplamalara dâhil edilmektedir. Bu ifadeye göre 183°C altındaki sıcaklıklarda C_t düzeltme katsayısı sabit “1” değeri almaktadır. 183°C’den büyük olan yüksek sıcaklıklarda Eş. 3.8 kullanılmaktadır. Eş. 3.8 içerisinde yer alan T₀ değeri rulmanın çalışacağı yüksek sıcaklık değeridir. Birimi celcius derecedir [97].

$$C_t = \left(\frac{T_0}{183} \right)^3 \quad (3.8)$$

C_{SF} rulman için ömür devrinde yaşayacağı çalışma uygulama koşullarına ait bir düzeltme katsayısıdır. Kullanılan uygulamaya bağlı olarak belirlenmiş değerler almakla birlikte bu değerler rulmanın bilyalı veya makaralı olmasına göre değişmektedir. Dolayısıyla bu düzeltme katsayısının hesaplamaya katılabilmesi için rulman yükleme çeşidine ve rulman tipinin kesin olarak biliniyor olması gerekmektedir. Çizelge 3.23, C_{SF} değeri için kullanılmaktadır.

Çizelge 3.23. Rulman çalışması kullanım koşulları düzeltme katsayısı [97]

Uygulama Tipi	C_{SF}	
	Bilyalı Rulman	Makaralı Rulman
Sabit ve kararlı yükleme, şok yükü yok	1,0	1,0
Normal kullanım, hafif şok yükü	1,5	1,0
Orta düzey şok yükü	2,0	1,3
Ağır şok yükü	2,5	1,7
Çok ağır ve belirsiz şok yükü	3,0	2,0
Hassas dişli	1,2	
Ticari dişli	1,3	
Dişli kayışlar		1,2
V-Kayışlar		1,8
Düz kayışlar		3,0

C_C yağlayıcının kirlenme seviyeleri için hesaba katılması gereken düzeltme katsayısıdır. Kirlilik düzeyine göre belirli değerler almakla birlikte bu değerler rulman çapına göre değişerek hesaplamaya etki etmektedir. C_C düzeltme katsayıları Çizelge 3.24'te verilmektedir.

Çizelge 3.24. Rulman kirlenme seviyesi düzeltme katsayısı [97]

Kirlilik Koşulları	C_C	
	Rulman çapı <100mm	Rulman çapı >100mm
Aşırı temizlik durumu, parçacık boyutu yaklaşık olarak yağlayıcı film tabakası kalınlığındadır (laboratuvar koşulları)	1,0	1,0
İyi seviyede temizlik durumu, 10 μm 'den küçük ince filtreden filtrelenen yağ	1,4	1,2
Normal temizlik, yağlayıcıda hafif düzey kirlenme	1,8	1,4
Hafif düzey kirlenme, yağlayıcıda hafif kirlenme, 10 μm 'den büyük sert parçacıklar	2,5	2,0
Şiddetli kirlenme, kaba filtreleme, entegre bir conta kullanımı yok	5,0	3,3

3.6.3. Şaft hata oranı hesaplama

Şaft veya diğer isimlendirmesiyle millerin hata oranı “ λ_{SH} ” ile temsil edilmektedir. Hata/milyon çevrim saat cinsinden Eş. 3.9 kullanılarak hesaplanmaktadır. Çevrim yerine tur ifadesi de kullanılabilir [97]. Eşitlikte yer alan ifadeler aşağıda açıklanmıştır.

$$\lambda_{SH} = \lambda_{SH,B} \times C_f \times C_T \times C_{DY} \times C_{SC} \quad (3.9)$$

$\lambda_{SH,B} = 1/N$, Şaft temel hata oranı, hata/milyon çevrim,

C_f =Şaft yüzey kalitesi için düzeltme katsayısı,

C_T =Şaft çalışma sıcaklığı için düzeltme katsayısı,

C_{DY} =Şaft yer değiştirmesi için düzeltme faktörü,

C_{SC} =Şaft düzensizliği stres konsantrasyonu için düzeltme katsayısı.

$\lambda_{SH,B}$ hesabı yapılırken kullanılan hesaplama methodunda geçen “N” ifadesi belirli bir stres seviyesine kadar atılabilen tur sayısıdır. N değeri genellikle tasarım dokümanlarından alınmaktadır.

C_f şaftın yüzeykalitesi için düzeltme katsayısı olup farklı yüzey kaliteleri için farklı sabit sayı veya formüllerle ifade edilmektedir. Çizelge 3.25, C_f değerleri için referans alınmaktadır. Verilen eşitliklerde geçen T_s ifadesi, şaft malzemesinin çekme mukavemetidir ve formülde $kpsi$ ile kullanılması gerekmektedir. Hesaplama yapılırken çekme mukavemeti MPA cinsinden kullanılacaksa ilgili mukavemet birim çevrimlerinin yapılması gerekmektedir.

Çizelge 3.25. Şaft yüzey kalitesi düzeltme katsayısı [97]

Yüzey kalitesi	C_f
Parlatılmış	1,0
Taşlanmış	0,89
Sıcak haddelenmiş	$0,94 - 0,0046 T_s + 8,37 \times 10^{-6} (T_s)^2$
İşlenmiş veya soğuk çekilmiş	$1,07 - 0,0051 T_s + 2,21 \times 10^{-6} (T_s)^2 - 3,57 \times 10^{-8} (T_s)^3$
Dövülmüş	$0,75 - 4,6 \times 10^{-3} T_s + 7,58 \times 10^{-6} (T_s)^2$

C_T şaftın çalışma sıcaklığı için belirlenmiş bir düzeltme katsayısıdır. Bu değer sıcaklığın yüksek olduğu değerlerde hesaplamalara dâhil edilmektedir. Bu ifadeye göre 160°F altındaki çalışma sıcaklıklarında C_T düzeltme katsayısı sabit “1” değerini almaktadır. 160°F’den

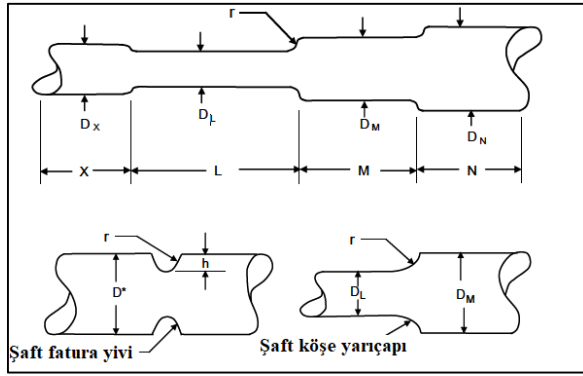
büyük olan yüksek sıcaklıklarda Eş. 3.10 kullanılmaktadır. Eş. 3.10 içerisinde yer alan T_{AT} değeri şaftın çalışacağı yüksek sıcaklık değeridir. Birimi fahrenheit derecedir [97].

$$C_T = \frac{460 + T_{AT}}{620} \quad (3.10)$$

C_{DY} şaftın yerdeğişimi için belirlenmiş bir düzeltme katsayısıdır ve hata oranı hesaplamasına dâhil edilmesi gereklidir. Şaft yer değiştirme faktörü, şaftın göreceği yük miktarına göre değişmektedir. Şaftın yanlış hizalanması ve aşırı sapma, şaft üzerine monte edilen mil yataklarının ve contaların güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şaft sapma tahmini, şaftın ağırlığına, fiziksel boyutlarına ve sıvı akışının neden olduğu herhangi bir dengesizlik kuvvetine bağlıdır [97]. Eğer şaft akışkan bulunan bir ortamda kullanılmıyorsa bu değer sabit “1” olarak alınmalıdır. Eş. 3.11 verilen ifade C_{DY} hesaplama yöntemidir [97].

$$C_{DY} = \frac{0,0043 \times F}{E \times b} \left[\frac{X^3}{I_X} + \frac{L^3}{I_L} + \frac{M^3}{I_M} + \frac{N^3}{I_N} \right] \quad (3.11)$$

Bu eşitlikte verilen ifadelerden X, L, M ve N şafta ait uzunluklardır. Uzunluklara ait detaylar Şekil 3.15’te verilmiştir. Eşitlikte bulunan “b” ifadesi şafta ait sapma değeridir. Sapma değeri şaftın kullanıldığı uygulamaya bağlı olarak sabit değerler almaktadır. Bu değerler Çizelge 3.26 ile verilmektedir. E değeri şaft malzemesinin elastik modülüdür ve birimi lbs/in²’dir. Elastik modül için GPa kullanılacağı zaman mukavemet birim çevrimlerinin yapılması gerekmektedir. Eşitlik içerisinde yer alan “F” ifadesi akışkanın radyal dengesizlik kuvveti veya kütle bilgisidir. Birimi lb’dir. Eşitlikteki “I” ifadesi şaftın atalet momentidir, dairesel olduğundan hesabı $\pi d^4/64$ ile hesaplanabilir. Birimi inç olup metrik düzende çalışılıyorsa birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.15. Genel bir şaft montaj görseli [97]

Çizelge 3.26. İzin verilen şaft sapması [97]

Uygulama	İzin verilen şaft sapma değeri, inç
Eyleyici	0,007
Komprasör	0,025
Motor	0,010
Pompa	0,007

C_{SC} şaftın stres birleşimlerinin etkisi için kullanılan bir düzeltme katsayısıdır ve Eş. 3.12 ile hesaplanmaktadır [97].

$$C_{SC} = C_{SC,R} + C_{SC,G} \quad (3.12)$$

Burada $C_{SC,R}$ şaft üzerindeki radyus devamsızlığı için, $C_{SC,G}$ ise şaft fatura yivi devamsızlığı için belirlenen değerlerdir. Radyus devamsızlığı için Eş. 3.13 kullanılmaktadır. Şaft fatura yivi devamsızlığı için ise Çizelge 3.27 kullanılmaktadır. Eğer şaft üzerinde yivli fatura devamsızlığı bulunmuyorsa bu değer sabit “1” olarak alınmalıdır [97].

$$C_{SC,R} = \left(\frac{0,3}{r/d} \right)^{0,2} \times \left(\frac{D}{d} \right)^{\left(1 - \frac{r}{d}\right)} \quad (3.13)$$

Burada “r” ile ifade edilen sembol şaftın köşe yarıçapıdır ve birimi inç cinsindendir. “D” ile ifade edilen sembol şaftın başlangıçtaki çapıdır, örnek olması amacıyla Şekil 3.15’te görülen D_L çapı referans sayılabilmektedir. Birimi inç cinsindendir. “d” ile ifade edilen sembol şaftın sonraki çapıdır, örnek olması amacıyla Şekil 3.15’de görülen D_M çapı referans sayılabilmektedir. Birimi inç cinsindendir [97].

Çizelge 3.27. Şaft fatura yiv devamsızlığı için stres konsantrasyonu [97]

h/D	h/r						
	0,1	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
0,05	1,10	1,45	1,60	2,00	2,05	-	-
0,10	1,00	1,27	1,40	1,70	2,00	2,25	-
0,2	1,00	1,10	1,20	1,31	1,60	1,75	2,00
0,3	1,00	1,10	1,10	1,20	1,35	1,48	1,55

3.6.4. Pimler ve kamalar için hata oranı hesaplama

Pim hata oranı, λ_P ile temsil edilmektedir ve hata/saat cinsinden ortalama 0,35 hata/milyon saat olarak alınmaktadır. Kama hata oranı, λ_K ile temsil edilmektedir ve hata/saat cinsinden ortalama 0,35 hata/milyon saat olarak alınmaktadır [97].

3.6.5. Yaylarda hata oranı hesaplaması

Sistemlerde kullanılan yayların hata oranı λ_{SP} ile temsil edilmektedir. Hata/milyon çalışma saati cinsinden Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanmaktadır ve içerisinde yer alan ifadeler aşağıda açıklanmıştır [97].

$$\lambda_{SP} = \lambda_{SP,B} \times C_G \times C_{DW} \times C_{DC} \times C_N \times C_Y \times C_L \times C_K \times C_{CS} \times C_R \times C_M \quad (3.14)$$

$\lambda_{SP,B}$ = Yay temel hata oranı; 23,8 hata/milyon saat,

C_G = Malzeme katılık modülünün temel hata oranına etkisi için düzeltme katsayısı,

C_{DW} = Yay tel çapının temel hata oranına etkisi için düzeltme katsayısı,

C_{DC} = Ortalama yay çapının temel hata oranına etkisi için düzeltme katsayısı,

C_N = Aktif sarım sayısının temel hata oranına etkisi için düzeltme katsayısı,

C_Y = Yay malzemesi çekme mukavemetinin etkisi için düzeltme katsayısı,

C_L = Yay sıkıştırma miktarı etkisi için düzeltme katsayısı,

C_K = Yay konsantrasyon faktörü etkisi için düzeltme katsayısı,

C_{CS} = Yay basma devri etkisi için düzeltme katsayısı,

C_R = Yay aşındırıcı ortamın etkisi için düzeltme katsayısı,

C_M = Üretim sürecinin temel hata oranına etkisi için düzeltme katsayısı

C_G , malzeme katılık modülünün temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Çizelge 3.28 kullanılarak veya Eş. 3.15 kullanılarak hesaplanmaktadır. C_G lbs/inç² cinsinden kullanılmaktadır. Metrik sistem kullanılacağı zaman birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir.

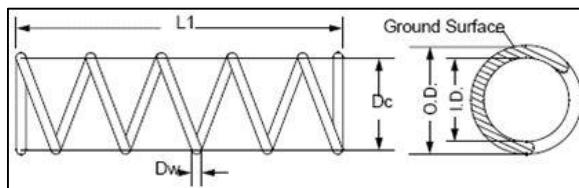
Çizelge 3.28. En sık kullanılan yay malzemelerinin elastisite ve kayma modülleri [97]

Malzeme	Kayma (Rijitlik) Modülü, G_M , lbs/in ² x 10 ⁶	C_G	Elastisite Modülü, E_M , lbs/in ² x 10 ⁶	C_E
Demirli Metaller:				
Krom Çelik	11.2	0,92	29,0	1,05
Silikon manganez	10.8	0,83	29,0	1,05
Paslanmaz çelik, 304,306,316	10.0	0,67	28,0	0,98
Paslanmaz çelik, 17-7 PH	10.5	0,76	29,5	1,04
Paslanmaz çelik, 420	11.0	0,88	29,0	1,05
Paslanmaz çelik, 431	11.4	0,97	29,5	1,11
Demir dışı metaller:				
Pirinç yay	5,0	0,08	15,0	0,15
Fosfor bronz	6,0	0,14	15,0	0,15
Berilyum bakır	7,0	0,23	17,0	0,21
Inconel*	10,5	0,76	31,0	1,09
Monel**	9,5	0,56	26,0	0,76

*Inconel, nikel bazlı bir alaşım malzemesidir.

** Monel, nikel ve bakırdan oluşturulan bir alaşım malzemesidir.

$$C_G = \left(\frac{G_M}{11,5 \times 10^6} \right)^3 \text{ veya } C_E = \left(\frac{E_M}{28,5 \times 10^6} \right)^3 \quad (3.15)$$



Şekil 3.16. Temel yay ölçü temsilleri [97]

Şekil 3.16 ile temel yay ölçüleri temsilen gösterilmektedir. C_{DW} , yayın tel çapının temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Eş. 3.16 ile hesaplanmaktadır. D_W inç cinsinden tel çapıdır. Metrik sistem kullanılacağı zaman birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir [97].

$$C_{DW} = \left(\frac{D_W}{0,085} \right)^3 \quad (3.16)$$

C_{DC} , ortalama yay çapının temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Eş. 3.17 ile hesaplanmaktadır. D_C inç cinsinden ortalama yay çapıdır. Metrik sistem kullanılacağı zaman birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir [97].

$$C_{DC} = \left(\frac{0,58}{D_C} \right)^6 \quad (3.17)$$

C_N , aktif sarım sayısının temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Eş. 3.18 ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte geçen N_a ifadesi yaya ait aktif sarım sayısıdır [97].

$$C_{DC} = \left(\frac{14}{N_a} \right)^3 \quad (3.18)$$

C_Y , yay malzemesi çekme mukavemetinin temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Eş. 3.19 ile hesaplanmaktadır. T_S yay malzemesine ait çekme mukavemetidir ve lbs/inç² cinsinden kullanılmaktadır. Metrik sistem kullanılacağı zaman birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir [97].

$$C_Y = \left(\frac{190 \times 10^3}{T_S} \right)^3 \quad (3.19)$$

C_L , yay sıkıştırma miktarının temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Eş. 3.20 ile hesaplanmaktadır. L_1 ve L_2 inç cinsinden yay sıkışma miktarıdır. Metrik sistem kullanılacağı zaman birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir [97].

$$C_Y = \left(\frac{L_1 - L_2}{1,07} \right)^3 \quad (3.20)$$

C_K , yay konsantrasyon faktörünün temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Eş. 3.21 ile hesaplanmaktadır. D_C inç cinsinden ortalama yay çapı ve D_W inç cinsinden tel çapıdır. Metrik sistem kullanılacağı zaman birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir [97].

$$C_K = \left(\frac{K_W}{1,219} \right)^3 ; K_W = \frac{4r-1}{4r-4} + \frac{0,616}{r} ; r = \frac{D_C}{D_W} \quad (3.21)$$

C_{CS} , yay basma devrinin temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Eş. 3.22 ile hesaplanmaktadır. CR yay basma devridir ve devir/dk ile temsil edilmektedir [97].

$$CR \leq 30 \frac{\text{devir}}{\text{dak}} \text{ için } C_{CS}=1 \quad \text{veya} \quad CR > 30 \frac{\text{devir}}{\text{dak}} \text{ için } C_{CS} = \left(\frac{CR}{300} \right)^3 \quad (3.22)$$

C_R , yay aşındırıcı ortamın temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Standarda göre, yayın üretimi sırasında aşındırıcı maddelere maruz kalmadığında bu katsayı değeri “1” olarak alınmaktadır [97].

C_M , üretim sürecinin temel hata oranına etkisi için kullanılan düzeltme katsayısıdır. Standarda göre yayın üretimi sonrasında kalite kontrol sürecine alındığı için bu katsayı değeri “1” olarak alınmaktadır [97].

3.6.6. Sistem seviyesi MTBF hesaplamaları

Güvenilirlik tahmini analizleri, genellikle seçilen bir güvenilirlik modeline dayandırılmaktadır. Arıza oranını hesaplayan bu matematiksel modeller, malzemelerin arıza oranlarını içeren listeleri değil, arıza oranlarını hesaplamakta kullanılan denklemleri içermektedirler. Bu denklemlerin karmaşıklığı ve istenen parametrik değerler, malzeme türüne göre değişiklik göstermektedir. Elektronik bileşenlerin güvenilirlik tahminlerinin yapılabilmesi için çeşitli standartlar kullanılmaktadır. MIL-HDBK-217 standardı, güvenilirlik analizi veya tahmini için en sık kullanılan el kitabıdır. Standart, entegre devreler, transistörler, diyotlar, dirençler, kapasitörler, röleler, anahtarlar ve konektörler gibi çok sayıda elektronik bileşen için arıza oranı modelleri içermektedir. Her ne kadar MIL-HDBK-217 en sık kullanılan MTBF hesap standardı olsada, doküman teknolojiye yetişemediğinden eski kalmıştır. Yeni çalışmalarda dokümana revizyon atlatılacağı düşünülsede, elektronik ekipmanların MTBF hesaplamalarında, güncel hesaplama ve analiz programları kullanılmaktadır. Analiz programları hesaplama yöntemleri birçok standardı esas alabilmektedir. Çoğu bu seçenekleri kullanıcıya sunmaktadır. Ancak genelleme yapılacak olursa askeri aktif sistemler için MIL-HDBK-217 standardını esas alarak hesaplama yapılmaktadır. Örnek olarak, askeri sistemlerde güvenilirlik tahmini analizi için PTC firmasının ürünü olan “Windchill Quality Solutions” (eski adı Relex) yazılımı sıklıkla

kullanılmaktadır. Yazılım kütüphanesindeyaklaşık olarak 400,000 adet parça bilgisi bulunmakta ve analizler bu parçaların seçilmesi ile başlatılmaktadır.

Çevresel gerilmeler, standardın hesaplama methodları için arıza oranının belirlenmesinde büyük etken kaynağı sayılmaktadır. Bunun sebebi olarak çevresel gerilmelerin, donanımların çalışma ortamına göre değişkenlik göstermesi görülmektedir. Bu nedenle, MIL-HDBK-217 standardına göre tüm parçaların güvenilirlik hesaplama formülleri, π_E ile temsil edilen çevresel faktörleri içermektedir. Bu sayede çevresel streslerin MTBF hesaplarına etkilerinin hesaplamalara yansıtılması sağlanmaktadır. Standardın esas aldığı toplam 14 adet çevresel ortam koşulu bulunmaktadır. Çizelge 3.29 içerisinde standarda ait çevresel şartlar verilmiştir. Bu ortamlar etki türlerine göre katsayılar içererek hesaplamalara katılmaktadır ve sonuç olarak güvenilirlik hesaplama sonuçlarını değiştirmektedir.

Çizelge 3.29. MIL-HDBK-217 çevresel faktörler ve tanımları [98]

Ortam Koşulu		Sembol	Açıklama
Ground, Benign	Kara, İyi ortam, çevreye duyarlı,	G_B	Bakım için kolayca erişilebilen, mobil olmayan, hareketsiz, sıcaklık ve nem kontrollü ortamlar; laboratuvar aletleri ve test ekipmanları, tıbbi elektronik ekipmanlar, iş ve bilimsel bilgisayar kompleksleri ve yer silolarındaki füzeleri ve destek ekipmanları içermektedir.
Ground, Fixed	Kara, Sabit Konum,	G_F	Orta derecede kontrollü ortamlar, örneğin yeterli soğutma havası olan kalıcı raflara kurulum ve ısıtılmayan binalara kurulum olasılığı; hava trafiği iç kontrol radarı ve iletişiminin kalıcı kurulumunu içerir tesisler.
Ground, Mobile	Kara, Mobil	G_M	Tekerlekli veya paletli araçlara takılan ekipman ve manuel olarak taşınan ekipman; taktik füze yer destek teçhizatı, mobil iletişim teçhizatı, taktik atış yönlendirme sistemleri, el tipi iletişim teçhizatı, lazer işaretleri ve mesafe bulucuları içerir
Naval, Sheltered	Deniz, Korunaklı	N_S	Yüzey gemilerindeki korunaklı veya güverte altı koşulları ve denizaltılara kurulu teçhizatı içerir.
Naval, Unsheltered	Deniz Korunaksız,	N_U	Hava koşullarına maruz kalan korunmasız yüzey gemi ekipmanı ve tuzlu suya batırılmış ekipman. Hidrofil gemilere kurulu sonar ekipmanı ve ekipmanı içerir.
Airborne, Inhabited, Cargo	Hava, Personel bulunduran, Taşıma	A_{IC}	Bir hava mürettebatı tarafından kullanılabilir kargo kompartımanlarındaki tipik koşullar. Basınç, sıcaklık, şok ve titreşimin aşırı çevre uçları minimumdur. Uzun görev uçakları bunlara örnektir
Airborne, Inhabited, Fighter	Hava, Personel bulunduran, Savaş Uçağı	A_{IF}	AIC ile aynıdır, ancak avcı uçakları ve avcı uçakları gibi yüksek performanslı uçaklara monte edilir. Bunlara örnek olarak F15, F16, F111, F/A18 ve A10 uçakları verilebilir.

Çizelge 3.29 (Devam) MIL-HDBK-217 çevresel faktörler ve tanımları [98]

Ortam Koşulu		Sembol	Açıklama
Airborne, Uninhabited, Cargo	Hava, İnsansız, Taşıma	A_{UC}	Uçuş sırasında bir hava mürettebatının yaşayamayacağı, çevresel olarak kontrol edilmeyen alanlar. Çevresel aşırılıklar, basınç, sıcaklık ve şok şiddetli olabilir.
Airborne, Uninhabited, Fighter	Hava, İnsansız, Savaş Uçağı	A_{UF}	A_{UC} ile aynı, ancak yüksek performans üzerine kurulu avcılar ve önleyiciler gibi uçaklar. Örnekler arasında F15, F16, F111 ve A10 uçağı sayılabilir.
Airborne, Rotary Winged	Hava, Döner Kanatlı	A_{RW}	Helikopterlere takılan ekipmanlar, Lazer işaretleyiciler, yangın kontrol sistemleri ve iletişim ekipmanları gibi hem dahili hem de harici olarak monte edilmiş ekipmanlar için geçerlidir.
Space, Flight	Uzay, Uçuş	S_F	Dünya yörüngesindeki, İyi huylu zemin koşullarına yaklaşıp. Araç ne motorlu uçuşta ne de atmosferik yeniden girişte; uyduları ve mekikleri içerir.
Missile, Flight	Füze, Uçuş	M_F	Havada ilerleyen füzelerin, seyir füzelerinin ve güçsüz serbest uçuştaki füzelerin motorlu uçuşu ile ilgili koşullar.
Missile, Launch	Füze, Fırlatma	M_L	Füze fırlatma (hava, kara ve deniz), uzay aracının yörüngeye yükselmesi ve aracın paraşütle yeniden girişi ve inişi ile ilgili ağır koşulları kapsamaktadır. Ayrıca katı roket motoru tahrikli uçuş ve denizaltılardan torpido ve füze fırlatma için de geçerlidir.
Cannon, Launch	Top, Fırlatma	C_L	155 mm'lik topun fırlatılmasıyla ilgili son derece ağır koşulları içermektedir. Fırlatmadan hedef çarpmasına kadar mermi için koşullar geçerlidir.

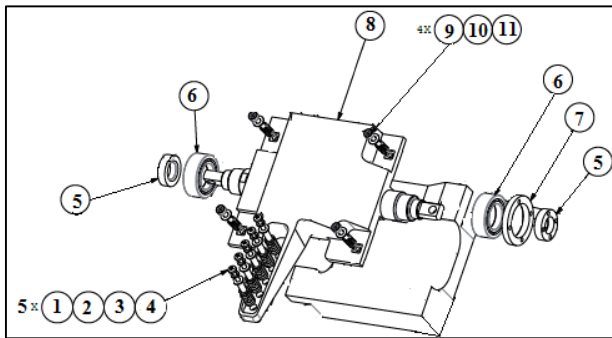
MIL-HDBK-217'ye göre sistem seviyesi yapılan MTBF hesaplamalarında, elektro-optik sistemler için özellikle elektronik kartlar, kart takımları, kablolar veya kablo takımları, dedektör takımları, güç filtreleri, kameralar ve optik takımlar gibi bileşenler kullanılmaktadır. Genellikle takım seviyesi arıza oranları, takım altındaki bütün malzeme arıza oranlarının toplamı, birim seviyesi arıza oranı bütün takımların arıza oranlarının toplamı ve sistem seviyesi arıza oranı da bütün birimlerin arıza oranlarının toplamı ile elde edilmektedir. Bu doğrultuda güvenilirlik tahmini analizi yapılırken, hangi methoda göre yapılacağı, analizi yapılacak sistemin kullanım ve görev profili, analizin yapılacağı çalışma ortamı, sistemin kullanım yüzdesi ve sistemin çalışma ortam sıcaklığı gibi bilgilerin seçilmesi veya girilmesi gerekmektedir. Analizi yapılamayan birimler veya entegreler için ise çeşitli kaynaklardan alınan sabit değerler kullanılmaktadır.

3.6.7. Genel elektronik ekipmanların hata oranı analizi

LED, batarya, lazer diyot gibi bazı hazır temin edilen komponentler zaman içinde performans kaybına uğrayarak kendisinden beklenen gereksinimleri sağlayamaz hale gelmektedirler. Örneğin, mesafe ölçme aralığı 25 km ve kullanım ömrü 20 yıl olması beklenen bir lazer mesafe ölçer biriminin günde ortalama 10 ölçüm yaptığı ve 1 ölçüm için 1200 atım gerekli olduğu varsayılırsa, 20 yıl sonunda 8 760 000 atım yaptıktan sonra bile, lazerlerin mesafe ölçme aralığının 25 km'den büyük kalacağından emin olunmalıdır. Tasarım aşamasından >8 760 000 atımı sağlayacak lazerlerin seçilip kullanılması veya sistem tasarımının bu kriterleri karşılayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Buna ek olarak kullanım ömrünün kullanım koşullarına göre değiştiği de bilinerek tasarımlar yapılmalıdır. Örneğin, bir üreticisi kondansatörün kullanım ömrünü 105°C'de 2,000 saat olarak tanımlanmış bir hazır elektrolitik kondansatör sistem tasarımı 45°C'de kullanılacaksa kullanım ömrü değişmektedir. Kondansatörler için sıcaklığın her 10°C azalmasında kullanım ömrü genellikle iki katına çıkmaktadır. Bu nedenle tasarım için seçile bu kondansatörün kullanım ömrü 45°C'de 64,000 saat olarak değişmektedir. Dolayısıyla MTBF hesaplamalarına da bu hesaplama ile katılması gerekmektedir.

3.6.8. MTBF analizi uygulaması

Bir gimbal sistemi tasarımında hassas hareket iletimi sağlayabilmek adına Resim 3.2 ve Resim 3.8 ile gösterilmiş olan mekanik yansıtıcı eleman parçası ve gimbal ana şaft mekanizması tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan ana elemanlar şekiller üzerinde yuvarlak işaretlemeler ile belirtilmektedir. Analitik analiz yöntemi ile her iki şekilde verilen elemanların hata oranları hesaplanarak toplam sistem hata oranı hesaplanmaktadır.



Resim 3.2. Mekanik yansıtıcı eleman parçası montajı

Mekanik yansıtıcı eleman parçası montajına ait parça listesi Çizelge 3.30 ile verilmiştir. Çizelge içerisinde “E” ile belirtilen ifadeler evet, “H” ile belirtilen ifadeler hayır anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.30. Parça listesi

Parça No	Parça Tanım	Adet	Hesaplama Dahili
1	Yay aralayıcı	5	E, dişli eleman
2	Yay basma pszcl 6,75X1,5X25,5	5	E, yay
3	Yaylı pul, paslanmaz çelik, A4-70	5	H, mekanik
4	Vida, silindirik mercimek yıldız, paslanmaz çelik, M8x30	5	E, dişli eleman
5	Rulman yüzüğü, M12x0,5	2	E, dişli eleman
6	Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	2	E, rulman
7	Rulman yüzüğü, M31x1	1	E, dişli eleman
8	Balans parçası	1	H, mekanik
9	Vida, silindirik alyen, paslanmaz çelik, M8x40	4	E, dişli eleman
10	Pul, paslanmaz çelik, M8	4	H, mekanik
11	Yay basma pszcl 7X1,1X28,8	4	E, yay

Hesaplama:

Rulman hata oranı, λ_{BE} , hata/milyon saat cinsinden Eş. 3.5 kullanılarak bulunmuştur. Rulman hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.3 ile verilmektedir.

- Dinamik yük derecesi 0,21 kN’dur. “210” N olarak hesaplamalara dâhil edilmektedir. Rulman üzerine gelen bileşke radyal yük “50”N olarak belirlenmiştir. Sistem sadece hassas açısal hareket yapmaktadır ve hız “3,3” olarak alınmaktadır.
- C_R , Çizelge 3.22 kullanılarak %90 güvenilirlik için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_V , kullanılan standarda göre tasarlanan yağlayıcıdan viskozitesi daha farklı bir yağlayıcı kullanılırsa düzeltme katsayısı kullanılmalıdır. Fakat gimbal sisteminde tasarlanan ve kullanılan yağlayıcılar aynıdır. Bu nedenle, bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_{CW} , gimbal sistemi yalıtılmış ortamda çalıştığı için rulman yağlayıcılarında su bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_t , bölüm 3.6.2’ye göre çalışma sıcaklığı 183°C’den az olduğu için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.

- C_{SF} , Çizelge 3.23 kullanılarak bilyalı rulmanlarda orta şok yükü çalışma koşulları için bu katsayı değeri “2,0” olarak alınmıştır.
- C_C , Çizelge 3.24 kullanılarak normal temizlik koşullarında (yağlayıcıda hafif kirlenme) rulman çapı 100 mm küçük olduğundan katsayı değeri “1,8” olarak alınmıştır.

Tanım	Miktar	L_S (N)	L_A (N)	y	n (rpm)	L_{10h} (mil.hr/f)	$I_{BE,B}$ (f/mil.hr)	C_R	C_I	CW (%)	C_{CW}	C_t	C_{SF}	C_C	I_{BE} (f/mil.hr)	$I_{BE,T}$ (f/mil.hr)	$I_{BE,T}$ (f/hr)
Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	2	210	50	3	3.3	3.74E+05	2.67E-06	1	1	0	1	1	2	1.8	9.62E-06	1.92E-05	1.92E-11
Ara Toplam																1.92E-11	

Resim 3.3. Bilyalı rulman MTBF hesabı

Yay hata oranı, λ_{SP} , hata/saat cinsinden Eş. 3.14 kullanılarak hesaplanmıştır. Yay hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.4 ile verilmektedir.

- $\lambda_{SP,B}$, yay temel hata oranı, 23,8 hata/milyon saat olarak alınmıştır.
- C_G , Çizelge 3.28 kullanılarak seçilmiş olan yay malzemesi için bu katsayı değeri “0,67” olarak alınmıştır.
- C_R Bölüm 3.6.6’ya göre yayın üretimi sırasında aşındırıcı maddelere maruz kalmadığı için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_M , bölüm 3.6.6’ya göre yayın üretimi sonrasında kalite kontrol sürecine alındığı için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.

Tanım	Miktar	$\lambda_{SP,B}$ (f/hr)	C_G	D_W (mm)	C_{DW}	D_C (mm)	C_{DC}	N_A	C_N	C_Y	L_1-L_2 (mm)	C_L	r	K_W	C_K	C_R	C_S	C_R	C_M	λ_{SP} (f/hr)	$\lambda_{SP,T}$ (f/hr)
Yay basma pszl 6,75X1,5X25,5	5	2.38E-05	0.67	1.50	0.34	7.50	57.44	4.00	42.88	0.59	5.50	0.01	5.00	1.31	1.24	0.01	0.10	1.00	1.00	7.73E-06	3.86E-05
Yay basma pszl 7X1,1X28,8	4	2.38E-05	0.67	1.10	0.13	7.55	55.19	7.00	8.00	0.59	12.50	0.10	6.86	1.22	1.00	0.01	0.10	1.00	1.00	5.48E-06	2.19E-05
TOTAL																				6.05E-05	

Resim 3.4. Baskı yayı MTBF hesabı

Vida hata oranı, λ_F hata/saat cinsinden Eş.(3.2 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Mekanik yansıtıcı eleman parçasında kullanılan vidaların tamamı M8 olup vida yalnızca boyları farklıdır. Malzeme bilgisi de dâhil olmak üzer diğer tüm özellikleri ortaktır. Bu nedenle sistemde bulunan toplam vida sayısı baz alınmıştır. Vida hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.5 ile verilmektedir.

- C_L , Bölüm 3.6.1’ya göre kesme yüküne maruz kaldığından için bu katsayı değeri “1,72” olarak alınmıştır.
- C_T , bölüm 3.6.1’e göre çalışma sıcaklığı 183°C’den az olduğu için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_I , bölüm 3.6.1’e göre normal titreşim altında orta düzey darbeye maruz kalarak çalışacağından bu katsayı değeri “1,25” olarak alınmıştır.
- C_K , bölüm 3.6.1’e göre vidaların tamamı kesilmiş diş ve malzeme sınıfı SAE 4-8 alınabilir olduğundan bu katsayı değeri “3,80” olarak alınmıştır.

Tanım	Adet	$I_{F,B}$ (f/hr)	C_{SZ}	C_L	C_T	C_I	C_K	I_F (f/hr)	$I_{F,I}$ (f/hr)
Vida, silindirik alyen, paslanmaz çelik, M8x40	4	7.20E-08	1.11	1.72	1.00	1	3.8	5.22E-07	2.09E-06
Vida, silindirik mercimek yıldız, paslanmaz çelik, M8x30	5	7.20E-08	1.11	1.72	1.00	1	3.8	5.22E-07	2.61E-06
Toplam									4.70E-06

Resim 3.5. Vida MTBF hesaplaması

Rulman yüzüğü iç diş (dişi) bulunduran bir dişli bağlantı elemanıdır. Bu nedenle rulman yüzüğü hata oranı, λ_F hata/saat cinsinden Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Mekanik yansıtıcı eleman parçasında kullanılan rulman yüzüklerinin malzeme bilgisi ve varsayılan kabullerinin tamamı aynı olup yalnızca çapları farklıdır. Rulman yüzüğü hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.6 ile verilmektedir.

- C_L , Bölüm 3.6.1’ya göre eksenel yüke ve kesme yüküne maruz kaldığından bu katsayı değeri “1,72” olarak alınmıştır.
- C_T , bölüm 3.6.1’e göre çalışma sıcaklığı 183°C’den az olduğu için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_I , bölüm 3.6.1’e göre normal titreşim altında çalışacağından bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_K , bölüm 3.6.1’e göre kesilmiş diş ve malzeme sınıfı SAE 4-8 olduğundan bu katsayı değeri “3,80” olarak alınmıştır.

Tanım	Adet	$l_{F,B}$ (f/hr)	C_{SZ}	C_L	C_T	C_I	C_K	l_F (f/hr)	$l_{F,T}$ (f/hr)
Rulman yüzüğü, M12x0,5	2	7,20E-08	1,06	1,72	1,00	1	3,8	4,99E-07	9,98E-07
Rulman yüzüğü, M31x1	2	7,20E-08	0,95	1,72	1,00	1	3,8	4,47E-07	8,94E-07
Toplam									1.89E-06

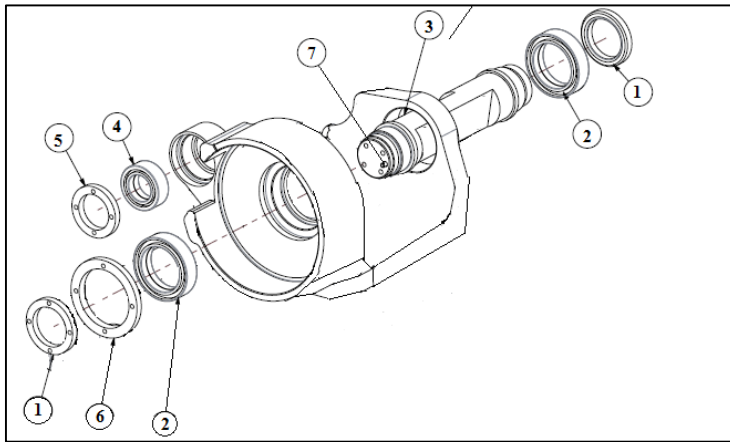
Resim 3.6. Rulman yüzüğü MTBF hesaplaması

Yay aralayıcı iç diş (dişi) bulunduran bir dişli bağlantı elemanıdır. Bu nedenle yay aralayıcı hata oranı, λ_F hata/saat cinsinden Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.7 ile verilmektedir.

- C_L , Bölüm 3.6.1'ya göre kesme ve burulma yüklerine maruz kaldığından için bu katsayı değeri "1,72" olarak alınmıştır.
- C_T , bölüm 3.6.1'e göre çalışma sıcaklığı 183°C'den az olduğu için bu katsayı değeri "1" olarak alınmıştır.
- C_I , bölüm 3.6.1'e göre normal titreşim ve hafif darbe altında çalışacağından bu katsayı değeri "1" olarak alınmıştır.
- C_K , bölüm 3.6.1'e göre vidaların tamamı kesilmiş diş ve malzeme sınıfı SAE 4-8 kabulü yapıldığından bu katsayı değeri "3,80" olarak alınmıştır.

Tanım	Adet	$l_{F,B}$ (f/hr)	C_{SZ}	C_L	C_T	C_I	C_K	l_F (f/hr)	$l_{F,T}$ (f/hr)
Yay aralayıcı	5	7,20E-08	1,11	1,72	1,00	1	3,8	5,22E-07	2,61E-06
Toplam									2,61E-06

Resim 3.7. Yay aralayıcı MTBF hesaplaması



Resim 3.8. Gimbal ana şaft montajı

Gimbal ana şaft montajı Resim 3.8 ile; parça listesi ise Çizelge 3.31 ile verilmiştir. Çizelge içerisinde “E” ile belirtilen ifade evet, “H” ile belirtilen ifade hayır anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.31. Parça listesi

Parça No	Parça Tanım	Adet	Hesaplama Dahili
1	Rulman yüzüğü, M25x0,5	2	E, dişli eleman
2	Rulman bilyalı, 26,987x38,10x9,525	2	E, rulman
3	Şaft	1	E, şaft
4	Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	1	E, rulman
5	Rulman yüzüğü, M31x1	1	E, dişli eleman
6	Rulman yüzüğü, M47x1	1	E, dişli eleman
7	Pim	2	E, pim

Hesaplama:

Rulman hata oranı, λ_{BE} , hata/milyon saat cinsinden Eş. 3.5 kullanılarak bulunmuştur. Rulman hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.9 ile verilmektedir.

- Dinamik yük derecesi 0,11 kN ve 0,08 kN’dur. “110” ve “80” N olarak hesaplamalara dâhil edilecektir. Rulman üzerine gelen bileşke radyal yük “60” ve “50” N olarak belirlenmiştir. Sistem sadece hassas açısal hareket yaptığından hız “3,3” olarak alınabilmektedir.
- C_R , %90 güvenilirlik için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır. (Bkz. Çizelge 3.22).
- C_V , kullanılan standarda göre tasarlanan yağlayıcıdan viskozitesi daha farklı bir yağlayıcı kullanılırsa düzeltme katsayısı kullanılmalıdır. Fakat gimbal sisteminde tasarlanan ve kullanılan yağlayıcılar aynıdır. Bu nedenle, bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_{CW} , gimbal sistemi yalıtılmış ortamda çalıştığı için rulman yağlayıcılarında su bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_t , bölüm 3.6.2’ye göre çalışma sıcaklığı 183°C’den az olduğu için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_{SF} , bilyeli rulmanlarda orta şok yükü çalışma koşulları için bu katsayı değeri “2,0” olarak alınmıştır. (Bkz. Çizelge 3.23)

- C_C , normal temizlik koşullarında (yağlayıcıda hafif kirlenme) rulman çapı 100 mm küçük olduğundan katsayı değeri “1,8” olarak alınmıştır. (Bkz. Çizelge 3.24).

Tanım	Miktar	L_S (N)	L_A (N)	γ	n (rpm)	L_{10h} (mil.hr/f)	$L_{BE,B}$ (f/mil.hr)	C_R	C_T	CW (%)	C_{CW}	C_I	C_{SF}	C_C	L_{BE} (f/mil.hr)	$L_{BE,T}$ (f/mil.hr)	$L_{BE,T}$ (f/hr)
Rulman bilyalı, 26,987x38,10x9,525	2	110	60	3	3,3	3,11E+04	3,21E-05	1	1	0	1	1	2	1,8	1,16E-04	2,31E-04	2,31E-10
Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	1	80	50	3	3,3	2,07E+04	4,83E-05	1	1	0	1	1	2	1,8	1,74E-04	1,74E-04	1,74E-10
Ara toplam																	4,05E-10

Resim 3.9. Gimbal ana montaj bilyalı rulman MTBF hesabı

Rulman yüzüğü iç diş (dişi) bulunduran bir dişli bağlantı elemanıdır. Bu nedenle rulman yüzüğü hata oranı, λ_F hata/saat cinsinden Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Mekanik yansıtıcı eleman parçasında kullanılan rulman yüzüklerinin malzeme bilgisi ve varsayılan kabullerinin tamamı aynı olup yalnızca çapları farklıdır. Rulman yüzüğü hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.10 ile verilmektedir.

- C_L , Bölüm 3.6.1’e göre yalnızca aksel yüklemeye maruz kaldığından için bu katsayı değeri “1,09” ve C_{SZ} değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_T , bölüm 3.6.1’e göre çalışma sıcaklığı 183°C’den az olduğu için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_I , bölüm 3.6.1’e göre normal titreşim altında çalışacağından bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_K , bölüm 3.6.1’e göre kesilmiş diş ve malzeme sınıfı SAE 4-8 olduğundan bu katsayı değeri “3,80” olarak alınmıştır.

Tanım	Adet	$L_{F,B}$ (f/hr)	C_{SZ}	C_L	C_T	C_I	C_K	L_F (f/hr)	$L_{F,T}$ (f/hr)
Rulman yüzüğü, M25x0,5	2	7,20E-08	1	1,09	1,00	1	3,8	2,98E-07	5,96E-07
Rulman yüzüğü, M31x1	1	7,20E-08	1	1,09	1,00	1	3,8	2,98E-07	2,98E-07
Rulman yüzüğü, M47x1	1	7,20E-08	1	1,09	1,00	1	3,8	2,98E-07	2,98E-07
Toplam									1,19E-06

Resim 3.10. Gimbal ana montaj rulman yüzüğü MTBF hesaplaması

Pim hata oranı, λ_P ile temsil edilmektedir ve hata/saat cinsinden ortalama 0,35 hata/milyon saat olarak alınmaktadır.

Mil hata oranı, λ_{BE} , hata/milyon saat cinsinden Eş. (3.9) kullanılarak bulunmuştur. Mil hata oranı, eşitlik içerisindeki formüle dayanan faktörlerin verilen eşitliklere göre hesaplanması

ve aşağıdaki kabullerin yapılması ile hesaplanmıştır. Hesap sonucu Resim 3.11 ile verilmektedir.

- $\lambda_{SB,B}$ belirli stres seviyesinde hataya kadar atılan tur sayısı N değeri tasarım dokümanlarından alınmıştır. ($N=2,20 \times 10^{13}$)
- Sistem sadece hassas açısal hareket yaptığından n (rpm) değeri “3,3” olarak alınmıştır.
- Çekme mukavemeti mil malzemesi olan 17-4 PH paslanmaz çelik için 1103 MPa olarak alınmıştır.
- Sistemin en fazla 60°C’de kullanılması planlanmaktadır.
- C_f , gimbal ana montaj shaft yüzeyi işlenmiş veya soğul çekilmiş yüzey olarak kabul edilmiş ve ilgili eşitlik kullanılmıştır. (Bkz. Çizelge 3.25)
- C_T , bölüm 3.6.3’e göre çalışma sıcaklığı 183°C’den az olduğu için bu katsayı değeri “1” olarak alınmıştır.
- C_{DY} , bölüm 3.6.3’e göre, mil akışkan bir ortamda bulunmadığından bu katsayı değer “1” olarak alınmıştır.
- C_{SC} , mil süreksizliği için düzeltme katsayısı, Eş. 3.2 ve Eş. 3.13 kullanılarak hesaplanmıştır.
- $C_{SC,G}$, mil üzerindeki yarık devamsızlığı, çizelge üzerinden seçilmiştir. (Bkz. Çizelge 3.27).
- Mil için ölçüler Çizelge 3.32 içerisinde verilmiştir ve hesaplamalar bu ölçülere göre yapılmıştır.

Çizelge 3.32. Mil ölçüleri

X (mm)	D _X (mm)	L (mm)	D _L (mm)	M (mm)	D _M (mm)	N (mm)	D _N (mm)	r (mm)	D (mm)	d (mm)
9,3	27,1	96,7	27,5	9,3	27,1	7,0	25,0	0,50	19,50	27,00

Tanım	Miktar	$l_{SH,B}$ (f/mil.cycl)	C_f	C_T	C_{DY}	$C_{SC,R}$	$C_{SC,G}$	C_{SC}	l_{SH} (f/mil.cycl)	$l_{SH,T}$ (f/mil.cycl)	n (rpm)	$l_{SH,T}$ (f/hr)
Mil, Gimbal Ana Montaj	1	4,55E-08	0,674	1,00	1,00	1,62	2,05	3,67	1,12E-07	1,12E-07	3,3	2,23E-11
TOPLAM												2,23E-11

Resim 3.11. Gimbal ana montaj mil MTBF hesaplaması

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda sisteme ait toplam MTBF alt parçaların hata oranları toplamıdır. Çizelge 3.33 ile toplam hata oranı hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.33. Sistem toplam MTBF hesabı

Eleman Tanım	Sembol	Değer
Toplam Mekanik Yansıtıcı Eleman Parçası Rulman Hata Oranı	$I_{BE, TOPLAM}$ (hata/saat)	1,92E-11
Toplam Mekanik Yansıtıcı Eleman Parçası Yay Hata Oranı	$I_{SP, TOPLAM}$ (hata/saat)	6,05E-05
Toplam Mekanik Yansıtıcı Eleman Parçası Rulman Yüzüğü Hata Oranı	$I_{F, TOPLAM}$ (hata/saat)	1,89E-06
Toplam Mekanik Yansıtıcı Eleman Parçası Vida Hata Oranı	$I_{F, TOPLAM}$ (hata/saat)	4,70E-06
Toplam Mekanik Yansıtıcı Eleman Parçası Yay Aralayıcı Hata Oranı	$I_{F, TOPLAM}$ (hata/saat)	2,61E-06
Toplam Gimbal Ana Montaj Rulman Hata Oranı	$I_{BE, TOPLAM}$ (hata/saat)	4, 50E-10
Toplam Gimbal Ana Montaj Rulman Yüzüğü Hata Oranı	$I_{F, TOPLAM}$ (hata/saat)	1,19E-06
Toplam Gimbal Ana Montaj Mil Hata Oranı	$I_{SH, TOPLAM}$ (hata/saat)	2,23E-11
Toplam Pim Hata Oranı	$I_{P, TOPLAM}$ (hata/saat)	7,00E-07
SİSTEM Toplam Hata Oranı	$I_{SİSTEM}$ (hata/saat)	7,16E-05
SİSTEM Hatalar Arası Ortalama Süre	$MTBF_{SİSTEM}$ (saat/hata)	13959,16

Sonuç: Sistem içerisinde yer alan bu birimler +7 ile -17 dereceler arasında hareket etmektedirler. Kısıtlanmış bu aralıktaki hareket, mil ve rulmanların dönüş hız değerlerini oldukça düşürmektedir. Bu nedenle hesaplamalarda rpm dönüş hızı değerleri “3,3” olarak kabul edilmiştir. Sistem MTBF değerinin yüksek çıkmasının en büyük sebebi olarak rulman ve mil kullanımının yalnızca hassas açısal değişimler için olması görülmektedir.

MTBF Analizi Doğrulaması

Bu alt bölümde amaç, tez kapsamında oluşturulan tasarım programı hesaplama bölümü doğrulamasının yapılmasıdır. Bu doğrultuda mekanik yansıtıcı eleman parçası ve gimbal ana montajı için analitik yöntemle yapılan MTBF analiz çalışması, PTC Windchill Reliability Prediction adlı analiz programı üzerinden tekrar gerçekleştirilmiştir. Analitik analizde kullanılan tüm parçalar, Resim 3.12 ile gösterildiği gibi programa eklenmiştir. Tasarım programında kabul edilen varsayımlar ve kritik tasarım parametreleri, analitik yöntemle aynı alınmıştır.

Description	Part Classification	Category	Subcategory
System	General		
Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	General	Mechanical Part	Bearing
Yay basma pszcl 6,75X1,5X25,5	General	Mechanical Part	Spring
Vida, silindirik alıyen, paslanmaz çelik, M8x40	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
Vida, silindirik mercimek yıldız, paslanmaz çelik, M8x30	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
Rulman yüzüğü, M12x0,5	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
Rulman yüzüğü, M31x1	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
Yay aralayıcı	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
Rulman yüzüğü, M25x0,5	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
Rulman yüzüğü, M31x1	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
Rulman yüzüğü, M47x1	General	Mechanical Part	Threaded Fastener
PİM	General	Mechanical Part	
MİL	General	Mechanical Part	Shaft
Rulman bilyalı, 26,987x38,10x9,525	General	Mechanical Part	Bearing
Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	General	Mechanical Part	Bearing
Yay basma pszcl 7X1,1X28,8	General	Mechanical Part	Spring

Resim 3.12. Doğrulaması yapılan MTBF analiz parçaları

PTC Prediction üzerinden yapılan doğrulama çalışması ile tasarım programına eklenen rulman, yay, vida, pim ve mil için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Toplam sistem MTBF değeri, tasarım programında 13959,16 saat çıkarken PTC Prediction programında 14183 saat çıkmıştır. Nihai sonuçlar Resim 3.13 içerisinde yıldız ile işaretlenerek verilmiştir. Analitik yöntem ile PTC'nin verdiği sonuçlar arasında ihmal dâhilinde kalacak bir fark ortaya çıkmıştır. Bu farkın nedeni olarak sayısal değerlerde yapılan yuvarlamalar görülmektedir. Sisteme ait her bir alt parçanın MTBF hesaplamalarına ait detaylar ve sonuçlar Ek-1 içerisinde verilmiştir.

Sonuç olarak; hem sistem hem de alt parçalar seviyesinde elde edilen sonuçlar ile tasarım programındaki hesaplama arayüzünün doğru ve güvenilir bir şekilde çalıştığı doğrulanmıştır.

Description	Part Classification	Category	Subcategory	System Tree Identifier	Quantity	Calculation Model	Failure Rate, Predicted	MTBF, Predicted
System	General			System	1		70,504471	14183
Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	General	Mechanical Part	Bearing	System1	2	Mechanical 2011	0,000019	5e+010
Yay basma pszcl 6,75X1,5X25,5	General	Mechanical Part	Spring	System2	5	Mechanical 2011	38,858375	25734
Vida, silindirik alıyen, paslanmaz çelik, M8x40	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System3	4	Mechanical 2011	2,095205	477280
Vida, silindirik mercimek yıldız, paslanmaz çelik, M8x30	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System4	5	Mechanical 2011	2,619006	381824
Rulman yüzüğü, M12x0,5	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System5	2	Mechanical 2011	1,000685	999315
Rulman yüzüğü, M31x1	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System6	2	Mechanical 2011	0,898609	1e+006
Yay aralayıcı	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System7	5	Mechanical 2011	2,619006	381824
Rulman yüzüğü, M25x0,5	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System8	2	Mechanical 2011	0,596448	2e+006
Rulman yüzüğü, M31x1	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System9	1	Mechanical 2011	0,298224	3e+006
Rulman yüzüğü, M47x1	General	Mechanical Part	Threaded Fastener	System10	1	Mechanical 2011	0,298224	3e+006
PİM	General	Mechanical Part		System11	1	Mechanical 2011	0,350000	3e+006
MİL	General	Mechanical Part	Shaft	System12	1	Mechanical 2011	0,000026	4e+010
Rulman bilyalı, 26,987x38,10x9,525	General	Mechanical Part	Bearing	System13	2	Mechanical 2011	0,000231	4e+009
Rulman bilyalı, 15,875x26,987x9,525	General	Mechanical Part	Bearing	System14	1	Mechanical 2011	0,000174	6e+009
Yay basma pszcl 7X1,1X28,8	General	Mechanical Part	Spring	System15	4	Mechanical 2011	20,870239	47915

Resim 3.13. Sistem MTBF analiz sonucu

3.7. Titreşim ve Şok İzolatör Seçimi

Bu bölümde titreşim ve şoka maruz kalan platformlarda çalışacak olan sistem veya cihazlara yönelik izolatör seçim yöntem ve hesapları anlatılmaktadır. Ayrıca verilen kısa notlar ile seçim hususunda bilgilendirmeler yapılmaktadır.

İzolatör seçimi için bazı kısa notlar:

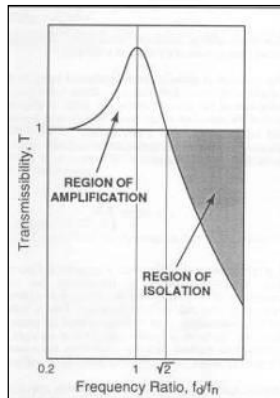
- Entegrasyon platformunun oluşturduğu titreşim veya şok, cihaz üzerinde etki oluşturuyorsa genellikle izolatörler kullanılmaktadır. Bununla birlikte sistem ve cihazlar, çalışma ortamlarına dayanabilecek sağlamlıkta ise veya platform salınımı sistem üzerinde bir sorun oluşturmuyorsa, izolatörün ilk doğal frekansında sisteme enerji vermesi, maliyeti ve yer kaplaması nedeniyle izolatörün kullanımı tavsiye edilmemektedir.
- Doğal kauçuk, sentetik kauçuk izolatörlerle karşılaştırıldığında çok daha iyi dayanıma (strength) sahiptir. Çok iyi yorulma karakteristiğine sahiptir. Düşük veya orta seviyede sönümlenmeye sahiptir. Yüksek sönümlenmeye sahip olması istenen bir durumda kullanılması önerilmemektedir. Bunun sebebi, izolasyon yapılan bölgede damping ilave edilmesi geçirgenlik değerini arttırmaktadır. Doğal kauçuk yapılı izolatörler, en fazla 82°C olan ortam koşullarında çalışabilmektedir.
- Sentetik kauçuklardan silikon ise, en geniş sıcaklık aralığına sahip sınıftır (18-150°C). Bu tip izolatörler askeri elektronik ekipmanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Doğal kauçuk kadar iyi yük taşıma kapasitesine sahip olmasa da geniş sıcaklık aralığına sahip olması nedeniyle tercih edilmektedirler.
- İzolatörlerin montajı için yaylı pul ve kilitleyici (loctite 270 veya 242) kullanılması ve belirlenmiş tork uygulanması gerekmektedir.

İzolatör seçim süreci, izolatörün entegrasyon yapılan platformuna (kara, hava, deniz vb.) ve platformun hangi bölgelerinde kullanılacağına göre belirlenerek yapılmaktadır. İzolatörler karşılaşacakları dinamik ortamda; yalnız şok, yalnız titreşim veya her ikisi birlikte olmasına göre seçilmektedir.

3.7.1. Titreşim yüküne maruz kalan platformlar için izolatör seçimi

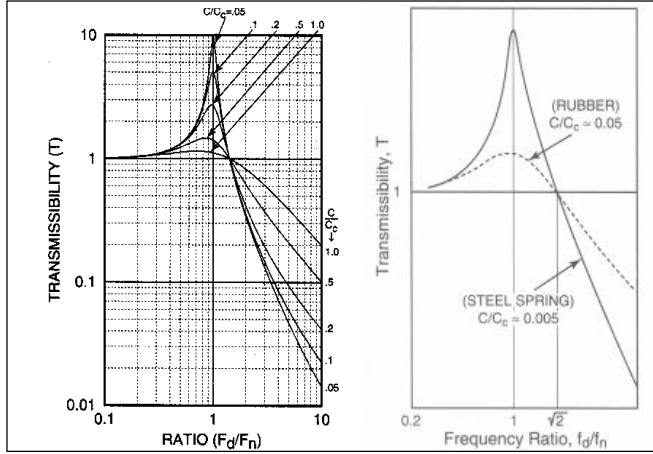
Titreşim izolatörü seçiminde öncelikle, cihaz üzerine gelecek ilk baskın tahrik frekansı belirlenmelidir. Askeri platformların çalışma sıcaklık aralıkları, takılacak birimlerin ağırlık-hacim değerleri de izolatör seçim için dikkat edilmesi gereken konulardır.

İzolatörler yay ve damperden oluşan titreşimin ve şokun etkisini azaltan sönümleyicilerdir. İzolatörün üzerine konulan cismin kütlesi, izolatörün doğal frekansını belirlemektedir. İzolatör seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise, izolatörün üzerine gelen tahrik frekansının, f_d , izolatörün kütle ile sahip olacağı doğal frekansından, f_n , $1.41 (\sqrt{2})$ kat daha büyük olması gerektiğidir. Şekil 3.17’de tek serbestlik dereceli bir sisteme gelen titreşim frekansının sistemin doğal frekansına oranının izolasyona etkisi gösterilmektedir. Geçirgenlik (T), sistemin izolatörler üzerine oturtulması durumunda zemine iletilen kuvvetin, sistemin doğrudan doğruya zemine oturtulması durumunda geçen kuvvete oranı olarak tanımlanmaktadır. Boyutsuz frekans oranı (f_d/f_n) ise sistemin tahrik frekansının sistemin doğal frekansına oranıdır.



Şekil 3.17. Tek serbestlik dereceli bir sistemin izolasyon bölgesini gösteren grafik [99]

İç sönümlenme oranı izolatör materyalinin sönümlenme katsayısının sistemin kritik sönümlenme katsayısına oranıdır ve birimsizdir. İç sönümlenme değerinin izolasyona etkisi Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18. Sönümleme değerine göre izolasyon karakteristiklerini gösteren eğriler [99]

Testler ve literatür araştırmalarından elde edilen bilgiler doğrultusunda tahrik frekansına bağlı olarak analitik yöntemlerle izolatör seçim adımları özetlenmiştir:

İlk olarak birim veya sisteme ait f_d ile belirtilen baskın tahrik frekansının belirlenmesi gerekmektedir. Bu frekans rastsal titreşim yükleri altındaki sistemlerde, PSD grafiğinde ilk belirgin PSD seviyesine karşılık gelen frekans değeridir. Sistem büyüklüğüne bağlı olarak birden fazla tahrik edici frekans olabilmektedir. Böylesi bir durumda, önce en düşük frekansa odaklanılması gerekmektedir. Sistemdeki en düşük frekans izole edilirse, diğer tüm yüksek frekanslar da izole edilecektir.

Seçilecek izolatörün en düşük doğal frekansı Eş. 3.23 ile bulunmaktadır. Eğer seçilecek izolatörün doğal frekansı Eş. 3.23 ile bulunan değerden büyük ise istenen izolasyon aralığı sağlanamayacak ve ilk tahrik frekansı ile rezonansa girme ihtimali olacaktır. Dolayısıyla izolatöre binecek yük değeri de göz önüne alınarak, doğal frekansı f_n (maks)’den küçük bir izolatör seçilmesi gerekmektedir [99].

$$f_n = f_d \times \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.23)$$

Eş. 3.23 ile bulunan f_n değerinde bir izolatör seçilecek olursa ilk tahrik frekansı sönümlenmeyecek ancak daha yüksek frekanslar sönümlenecektir. Eğer belirlenen bir izolasyon değeri var ise istenen izolasyon değerini sağlayacak doğal frekans ise Eş. 3.24 ile hesaplanabilmektedir.

Sistemde hesaplanan tahrik edici yük frekansı ile doğal frekans arasındaki oran Eş. 3.25 ile belirtildiği gibi 1'den büyük olursa izolator geçirgenliğinin Eş. 3.25 ile hesaplanması gerekmektedir. Eş. 3.24 ile verilen f_{nt} , geçirgenliğe göre seçilmiş doğal frekanstır. Bazı sistem veya cihazlarda bu değer sistem gereksinimi olabilmekte ve hesaplanmadan, sistem girdisi olarak kullanılabilir [99].

$$\frac{f_d}{f_{nt}} > 1 \text{ ise; } f_{nt} = f_d \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{T}}} \quad (3.24)$$

$$\text{veya; } T = \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{f_d}{f_{nt}}\right)^2} \right| \quad (3.25)$$

Sistemde kullanılacak izolatörden istenen izolasyon değeri aynı zamanda izolator geçirgenliğini de ifade etmektedir. İstenen geçirgenlik değeri formülde de geçtiği gibi "T" ile sembolize edilmektedir ve yüzdelik ifadelerle temsil edilmektedir. Çok özel durumların haricinde genelde %80 izolasyon, uygulamalar için oldukça iyi bir izolasyon yüzdesidir.

İzolatöre binecek yük değeri de göz önüne alınarak doğal frekansı f_n 'den küçük bir izolator seçilmesi gerekmektedir. Bu seçim yapılırken sistemin ağırlığının da dikkate alınması şarttır. Seçilen izolatörün (iç sönümlmeli) doğal frekansı göz önüne alınarak statik deplasmanın bulunması gerekmektedir. Statik deplasman temelde Eş. 3.26 yardımıyla bulunmaktadır. Bu eşitlikte "m" izolatörün üzerindeki sistem veya birimin ağırlığı, "K" izolator direngenliği ve "g" ise yer çekimidir.

$$\delta = \frac{m g}{K} \quad (3.26)$$

Deplasman değerinin, izolator limitleri içinde kalıp kalmadığı muhakkak kontrol edilmelidir. Eğer hesaplanan deplasman miktarı izolatörün maksimum deplasmanından düşük çıkarsa seçilen izolatörün kullanımı güvenlidir kabulü yapılmaktadır. Statik deplasman eşitliklerinin kullanılabilmesi için izolatörün yay sabitinin doğrusal olması gerekmektedir. Ayrıca sönümleme malzemesinin statik ve dinamik direngenliği aynı olmalıdır. Dolayısıyla bu eşitlik elastomer tip izolatörler için doğru değildir. Çünkü bu tip

izolatörlerde dinamik ve statik direngenlik değerleri (doğrusal olmayan; artan, azalan) farklıdır.

Eş. 3.26 içerisindeki “K” bilinmediği için, sönümlemenin dahil edildiği doğal frekans formülünden K çekilir ve aşağıdaki Eş. 3.27 statik deplasman (δ) değeri elde edilmektedir [99].

$$\delta = \frac{g \left(1 - \left(\frac{C}{C_c} \right)^2 \right)}{4\pi^2 f_n^2} \quad (3.27)$$

Bu eşitlikte C/C_c oranı iç sönümleme oranı olarak adlandırılmaktadır ve bazı kataloglarda verilmekte veya T (ve T_{max}) grafiği bulunan kataloglardan Eş. 3.28 alınmaktadır [99].

$$T_{max} = \frac{1}{2 \left(\frac{C}{C_c} \right)} \quad (3.28)$$

Statik deplasman Eş. 3.27 ile hesaplanmaktadır ancak iç sönümleme ihmal edilirse diğer bir deyişle $C/C_c = 0$ kabul edilirse ve $g = 9,81 \cdot 1000 \text{ mm/s}^2$ olarak alınırsa, Eş. 3.29 kullanılmaktadır. Birimi mm olarak geçmektedir.

$$\delta = \frac{248,5}{f_n^2} \quad (3.29)$$

Bu deplasmanın izolatörün yapabileceği maksimum deplasman değerinden küçük olması gerekmektedir.

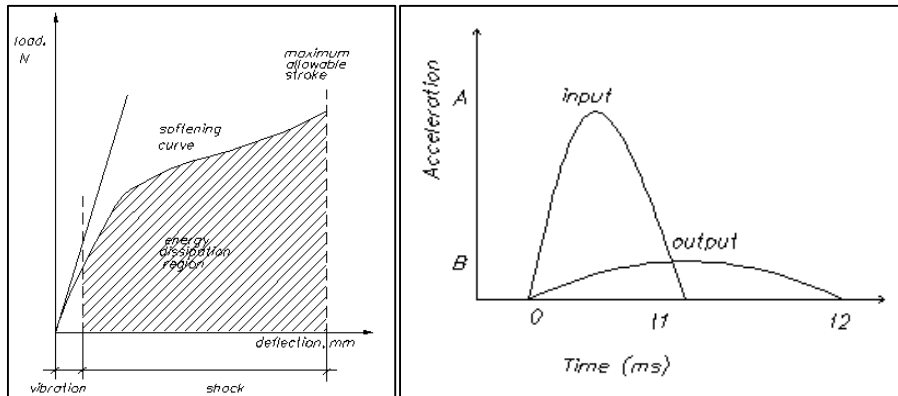
Hesaplamalar sonrasında istenen izolasyon değerini (seçim yapılmadan önce seçim kriteri olarak belirlenir) sağlayacak (en fazla olabilecek) doğal frekans değeri ve izolatör seçilmesinden sonra izolatörün üst limit ağırlığında kullanılmasında oluşacak doğal frekans kontrol edilebilmektedir. Üst limit ağırlığı “müstlimyük” olarak ifade edilmektedir ve izolatörün taşıyabileceği en fazla statik yük veya katalogda belirtilen referans kütledir. Gerçek yük, “ $m_{gerçekyük}$ ” ile ifade edilir ve her bir izolatör üzerine kg olarak denk gelen yükür.

Eğer gerçek yük altındaki doğal frekans öğrenilmek istenirse Eş. 3.30 kullanılmaktadır. Burada $f_{\text{gerçekyük}}$ gerçek yükler altında sistemin sahip olduğu doğal frekans ve $f_{\text{üstlimityük}}$ izolatörün taşıyabileceği en fazla statik yüke göre olan doğal frekanstır [99].

$$\frac{f_{\text{gerçekyük}}}{f_{\text{üstlimityük}}} = \sqrt{\frac{m_{\text{üstlimityük}}}{m_{\text{gerçekyük}}}} \quad (3.30)$$

3.7.2. Şok yüküne maruz kalan platformlar için izolatör seçimi

Şoka maruz kalan sistemlerde uygun izolatörler kullanılarak birimlerin şoklara dayanmaları sağlanmaktadır. İzolatörler yapıya gelen şoku daha uzun bir zamana yayıp ve daha düşük bir büyüklüğe indirerek Şekil 3.19’da verildiği üzere sönümlemektedir. Şok izolatörü seçerken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar bulunmaktadır. Öncelikle şok altında gerekli olan dinamik yer değiştirmeyi sağlayabilen bir izolatör seçilmelidir. İzolatör tabana vurma yapmamalı ve yeterince deplasmana izin vermelidir. Bu koşulu sağlamayan izolatörler şok altında sönümleme yapmayıp aksine gelen şoku artırdığı nitelendirme testlerinde gözlemlenmektedir.

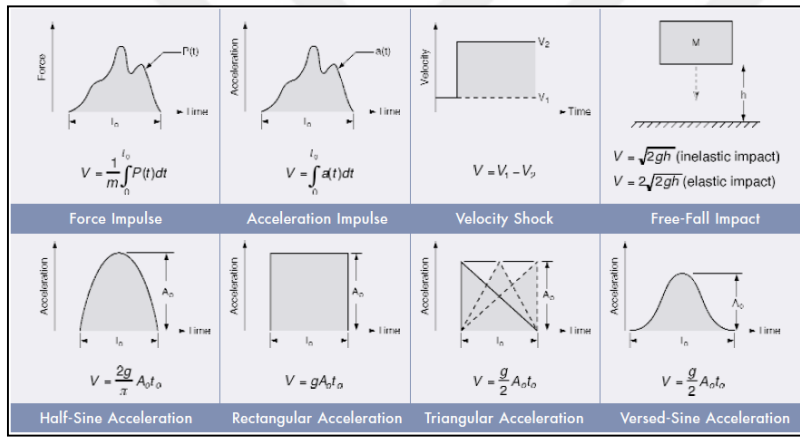


Şekil 3.19. İzolatörün şoku sönümlemesi

Şok izolasyonunda, büyük deplasmanlar söz konusu olduğu için doğrusal olmama (nonlinearity) önem taşımaktadır. Dolayısıyla yalıtım derecesi, kullanılan izolatörün gereken deplasmanı sağlayıp sağlayamamasına bağlıdır. Şok izolasyon uygulamalarında beklenen büyük deplasmanlar genellikle doğrusal izolatörler ile sağlanamamaktadır. Bu nedenle bu gibi uygulamalarda doğrusal olmayan izolatörler seçilmesi uygun karşılanmaktadır. Tel halka tipi izolatörler şok uygulamaları için çok uygundur. Bunun

sebebi, yüksek enerji depolama kabiliyetine sahiptirler ve her türlü şekle girebilme özellikleri onlara gerekli doğrusallık ve doğrusal olmama özelliklerini elde etme imkânı sağlamaktadır. Deniz platformlarında dalga şokunun izolasyonu için çoğu sistemde tel halka tipi izolatörler tercih edilmektedir.

Firmalar kataloglarında, standartlarda Şekil 3.20 ile verilen şok formlarına ait grafiklerin altındaki alandan (integralinden) hız değerine geçmektedir. Hız değerine geçme sebebi olarak, şoku simule ederken cihazın belli bir yükseklikten serbest düşmeye bırakıldığı ve çarpma anında istenilen hıza ulaştığı varsayılmaktadır. Sistemin cevabı ise kütleyi “V” büyüklüğünde bir ilk hıza ulaştıran darbenin yarattığı serbest titreşimlerdir. Böylece hız değeri kullanılarak izolatörün yapacağı maksimum dinamik yer değiştirmeye bakılmaktadır.



Şekil 3.20. Değişik formlardaki şoklar için hız bilgisinin elde edilişi [99]

Genel olarak izolatörlerin şok altında dinamik yer değiştirmesi hesaplanırken aşağıdaki yol izlenmiştir:

Temel olarak kataloglardan izolatör seçerken düşme hızından hesaplanan dinamik deplasman formülü kullanılmaktadır. Şok izolatörü seçimi için ilk olarak, hız değişiminin belirlenmesi gerekmektedir. Hız değişim formülü için Şekil 3.20 ile verilen şok formlarından hangisi uygunsa o kullanılmaktadır. Örneğin sıklıkla sinüs formu kullanılmaktadır. Yarım sinüs dalgası için yer değiştirme formülü Eş. 3.31 ile verilmektedir. Formülde verilen A_0 şok formu tepe değeri ve t_0 şok formunu süresidir.

$$V = \frac{2g}{\pi} \times A_0 \times t_0 \quad (3.31)$$

Ardından indirgenmek istenilen şok büyüklüğü (G değeri (G_{out})) göz önüne alınarak bu sönümlemeyi sağlayacak izolatörün doğal frekansının bulunması gerekmektedir. Doğal frekans hesaplaması için Eş. 3.32 kullanılmaktadır.

$$f_n = \frac{G_{out} \times g}{V \times 2 \times \pi} \text{ veya; } f_n = \frac{G_{out} \times 1,5608}{V} \quad (3.32)$$

Seçim prosedürü devamında izolatörün yapacağı dinamik deplasman değerinin bulunması gerekmektedir. Bu değer Eş. 3.33 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta D = \frac{V}{2 \times \pi \times f_n} \quad (3.33)$$

Seçilecek şok izolatörü için aşağıda belirtilen koşullara dikkat edilmelidir;

- Doğal frekansı Eş. 3.32 ile hesaplanan değerden küçük olmalıdır.
- Şok izolatörün azami deplasman değeri Eş. 3.33 ile hesaplanan değerden büyük olmalıdır.

3.7.3. İzolatör seçim analizi

Askeri bir sistem ihtiyacı için oluşturulmuş bir projede kullanılacak yeni yazıcı için izolatör ihtiyacı doğmuştur. Yazıcı kara aracı içinde, tabana adaptasyon parçaları kullanılarak monte edilmektedir. İlk aşamada yazıcının yalnızca şok yüküne maruz kalacağı varsayılmaktadır. Yazıcının altına 4 adet izolatör bağlanması düşünülmektedir. Yazıcının adaptasyon parçalarıyla birlikte toplam ağırlığı 21,2 kg'dır. Birim için, doğal frekans 10,4 Hz olarak tasarım dokümanlarından alınmıştır. Gereksinim: projede maruz kalınan şok profili yarım sinüs 40g ve 6 ms'dir. Bu nedenle, yarım sinüs 40g 6 ms mekanik şoka karşı izolatör seçilmesi gerekmektedir.

Eş. 3.31 ile hız değişimi $A_0 = 40g$ ve $t_0 = 6$ ms için hesaplanmıştır. Hız değişimi, $V = 1,4988m/s$, $f_n = 10,4$ Hz ile Eş. 3.33 kullanılarak izolatör deplasmanı; $\Delta D = 22,94$ mm.

Sonuç: Yapılan analiz sonucunda, şok altında izolatörün yapacağı en fazla deplasman 23 mm civarındadır. Hassas parçalar içerdiği bildirilen yazıcı için bu deplasman değerini verebilecek bir izolatör seçilmelidir.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması ile askeri sistemler için tasarlanan elektro-optik cihazların, kara ve deniz platformlarına entegrasyonu için rehberlik sağlayacak bir tasarım programı geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında elektro-optik cihazların temel tasarım parametreleri, tasarım ve entegrasyon için gerekli mekanik tasarım parametreleri, askeri standartlar ve askeri çevre koşulları araştırılarak bu konularda hem literatür bilgisi hem de tasarım önerileri verilmiştir.

- Program kullanıcı arayüzü ile kullanıcıya genel sistem ihtiyaçları, mekanik sistem ihtiyaçları ve çevre koşulları için sorular yöneltilmektedir. Bu sorular sayesinde kullanıcının doğru ve eksiksiz bir şekilde sistem tasarımını oluşturabilmesi sağlanmaktadır.
- Her soru için konuya uygun cevap seçenekleri sunulmaktadır.
- Kullanıcı arayüzüne, soru sorulduğunda aktif olan, cevap seçiminin platforma ve sistem yaşam koşullarına uygun şekilde yapılabilmesi için sorulan soru konusu hakkında kullanıcıya pratik tasarımsal bilgilendirmelerin yapıldığı bir bölüm oluşturulmuştur. Bu sayede kullanıcının çalışma platformuna uygun seçeneğe karar verebilmesi sağlanmaktadır.
- Seçilen seçeneğe göre sistem gereksinim özellikleri dokümanına etki eden veya gereksinim maddesi olarak yazılması istenen cümleler kullanıcıya gösterilmektedir.
- Gösterilen maddelerden gereksinim dokümanına eklenmesi istenen tasarım maddesinin eklenmesi veya sonradan istenmeyen maddelerin çıkarılmasının sağladığı bir alan ayrılmıştır.
- Tasarım için oluşturulan gerekli maddeler, PDF dosyası olarak çıktı alınabilmektedir. Böylece tasarım programı vasıtasıyla oluşturulan referans gereksinim dokümanı elektronik ortamda dosya kaydı ile kullanılabilir.
- Kullanıcı arayüzünün kütüphane bölümüyle bağlantısı yapılarak sorulan soru veya cevap ile ilgili bilgi edinme gereksinimi duyulduğunda kullanıcının kütüphaneye ulaşabilmesi sağlanmıştır.
- Sadece gereksinim maddeleri oluşturmak için değil, genel montaj ve platform entegrasyon ihtiyaçları için tasarım önerileri kullanıcı arayüzüne bağlanmış olup program

kullanıcısının bu önerilerin tamamına ulaşması kullanıcı arayüzünden sağlanabilmektedir.

- Tasarım programının güncel arayüzü, kullanım ergonomisi de gözetilerek çeşitli arge ekiplerinin görüşleri ile birlikte geliştirilmiştir.
- Hazırlanan tasarım programı prototip versiyonda olup gerçek bir uygulamada henüz kullanılmamıştır. Programın hesaplama bölümü PTC üzerinden doğrulanmış olsa da, uygulama bütünü tamamen doğrulanamamıştır. Dolayısıyla tasarım programı, zaman içerisinde kullanımlar ve kullanıcı geri dönüşleri doğrultusunda güncellenecektir.

Sonuç olarak, hazırlanan tasarım programı ile sistem arıza oranlarının düşürüleceği, entegrasyon faaliyetlerine zaman ve işçilik tasarrufu sağlanacağı ve güvenilirliği yüksek sistemlerin oluşturulacağı sonucuna varılmıştır. Gelecek çalışmalarda, program dâhiline platformlardan alınan titreşim profilleri eklenerek titreşim test grafikleri program üzerinden çıkartılabilir, bu sayede titreşim testlerine girilmeden önce tasarımsal farkındalık sağlanabilir. Program içeriğine platformlar dâhil edilip diğer titreşim profilleri ile platform eşleştirmesi yapılarak standart tasarım teknikleri geliştirilebilir. Program kütüphanesine mekanik parçalarda imalat yöntemleri tasarımsal kısıtlamalar girilerek alt sistem tasarımlarına yön gösterilebilir. Genel olarak tasarım programı mekanik, elektrik-elektronik veya optik gibi alt tasarım ekiplerine göre özelleştirilip kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Gilstrap, J., Antesberger, W., (March 1998). Integrated Sight Boresighting; *Raytheon TI Systems*, 1-11.
2. İnternet: ASELSAN. Atmaca Elektro-Optik Gözetleme Sistemi. Web: https://www.aselsan.com.tr/ATMACA_Elektro_Optik_Gozetleme_Sistemi_4167.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.07.2021.
3. Richards, A., (2001) *Alien Vision, Exploring the electromagnetic spectrum with imaging technology* (Second edition), Bellingham: SPIE Optical Engineering Press., xv-xix.
4. Zwinkels, J., (2015). Light, Electromagnetic Spectrum, In Luo, R., (Edc.) *Encyclopedia of Color Science and Technology*. New York: Springer-Verlag, 2-9.
5. A. Daniels, (2010). *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs* (Second Edition), Bellingham: SPIE Press., 1-3.
6. Driggers R.G., Friedman, M. H., and Nichols, J., (1998). *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*, (Second Edition), Boston: Artech House, 10-25.
7. Hansen, M. P., and Malchow D. S., (2008). Overview of swir detectors, cameras, and applications. In V. P. Vavilov, and D. D. Burleigh (Eds.), *Thermosense XXX. Vol. 6369 IR neighbors: NIR, Visible and UV I*, 63690I (1-11). Bellingham: SPIE Press.
8. Gross, H., Blechinger F., and Ahtner, B. (2008). *Handbook of Optical Systems, Volume 4: Survey of Optical Instruments*, Weinhiem: Wiley-VCH, 2-21.
9. Willers, C. J., (2013). *Electro-Optical System Analysis and Design A Radiometry Perspective*, Bellingham: SPIE Press, 5-36.
10. İnternet: Acl BFi. MWIR or LWIR thermal cameras for surveillance applications? Web: http://a05fa6f7cba89c6644b4-b7912ee341795bc26d6ea3f706a928ac.r88.cf3.rackcdn.com/MWIR_or_LWIR.pdf, Son Erişim Tarihi: 16.06.2021
11. Wolfe, W. L., (1996). *Introduction to Infrared System*, Bellingham: SPIE Press. 41-45.
12. Harris, D.C., (1999). *Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance*, Bellingham: SPIE Press., 2-3.
13. Rogalski, A. (2012). History of infrared detectors, *Opto-Electronics Review*, 20(3), 279-308.
14. İnternet: LYNRED By Sofradir and Ulis. ScorpioMW Datasheet. Web: <https://www.lynred.com/sites/default/files/2020-09/ScorpioMW%20datasheet.pdf>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2021.
15. İnternet: Opgal. (April 16, 2018). Intro to IR (part 2): Cooled vs. Uncooled Cameras Sensitivity Resolution Frame Rate. Web: "https://www.opgal.com/blog/thermal-

- cameras/intro-to-ir-part-2-cooled-vs-uncooled-cameras-sensitivity-resolution-frame-rate/, Son Erişim Tarihi: 23.04.2021.
16. Özer, S. (2005). *InSb and InAsSb infrared photodiodes on alternative substrates and InP/InGaAs quantum well infrared photodetectors: pixel and focal plane array performance*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 200-213.
 17. Mann, A., (2009). *Infrared Optics and Zoom Lenses*, (Second Edition), Bellingham: SPIE Press, 25-42.
 18. Walker, B., (2009). *Optical Engineering Fundamentals* (Second edition), Bellingham: SPIE Optical Engineering Press. 173-188.
 19. İnternet: OPGAL. (April 24, 2018). Intro to IR, (Part 3): Sensitivity, Resolution and Frame Rate. Web: “<https://www.opgal.com/blog/thermal-cameras/intro-to-ir-part-3-sensitivity-resolution-and-frame-rate/>”, Son Erişim Tarihi: 23.04.2021.
 20. İnternet: LYNRED. Infrared detection basics. Web: “<https://www.lynred.com/e-learning/infrared-detection-basics>”, Son Erişim Tarihi: 23.04.2021.
 21. İnternet: OPTO Engineering. F/# and depth of field. Web: <https://www.opto-e.com/basics/f-and-depth-of-field>, Son Erişim Tarihi: 24.04.2021.
 22. İnternet: TELEDYN FLIR. Noise Equivalent Temperature Difference. Web: https://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/3166/kw/NETD/related/1, Son Erişim Tarihi: 24.04.2021.
 23. Holst, G.C., (2000). *Common Sense Approach To Thermal Imaging*. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press. 123-125.
 24. İnternet: FLIR. How Far Can You Measure? Considering Spot Size Ratio is Key. Web: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/17-1465/17-1465_US.pdf, Son Erişim Tarihi: 06.06.2021.
 25. Chrzanowsk, K., (2010), *Testing Thermal Imagers Practical Guidebook I*, Military University of Technology, Warsaw, Poland. 29-40, 101-105.
 26. Bijl, P., Toet, A., and Valetton, J. M., (2003). Electro-optical imaging system performance measurement. In Driggers R.G. (Eds.), *Encyclopedia of optical engineering*. New York, USA: Marcel Dekker Inc. 443-450.
 27. Adomeit, U., (2012). Infrared detection, recognition and identification of handheld objects. In *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IX*, International Society for Optics and Photonics.
 28. İnternet: OWL OPTICS. Thermal Cameras and Distance. Web: <https://owloptics.nz/thermal-cameras-and-distance/>, Son Erişim Tarihi: 30.05.2021.

29. NATO Standardized Agreement 4347, (1995). *Definition of Nominal Static Range Performance for Thermal Imaging Systems*, (Stanag 4347). NATO.
30. Kopeika, N. S., Zilberman, A., Yitzhaky, Y., and Golbraikh, E., (2012). Atmospheric effects on target acquisition. In Holst, G. C., and Krapels, K. A., (Eds.) Proc. SPIE Volume 8355, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIII*, 83550D.
31. Peric, D., C., Livada, B., Peric, M., and Vujic, S., (2019). Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality, *Sensors*, 2-24.
32. Gross, H., (2005). *Handbook of Optical Systems, Volume 1: Fundamentals of Technical Optics*, Weinhiem: Wiley-VCH.
33. Mudau, A.E., Willers, C. J., Griffith, D. J., and Roux, F. P., (May 2011). *Non-uniformity correction and bad pixel replacement on LWIR and MWIR images*. In Proc. IEEE Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC), Riyadh, Saudi Arabia, 1-5.
34. Hayat, M. M., Ratliff, B. M., and Tyo, J. S., (March 2005). Generalized Algebraic Algorithm for Scene-based Nonuniformity Correction, *Journal of the Optical Society of America A*, 22(2), 239-249.
35. Povey, V. (October 1986). Athermalisation Techniques in Infra Red Systems, In. Fischer, R. E., Rogers, P. J. (Eds.), *Optical System Design, Analysis, Production for Advanced Technology Systems*. SPIE Proceedings 655, 142-153.
36. Holst, G.C., (2008). *Electro-Optical Imaging System Performance* (Fifth edition). Bellingham, USA: SPIE Optical Engineering Press.
37. Holst, G. C., (2003). *Holst's Practical Guide to Electro-Optical Systems*, Florida: JCD Publishing Company. 1-17, 20-45.
38. Jha, A. R., (2000). *Infrared Technology Applications to Electrooptics, Photonic Devices, and Sensors*. New York: Wiley-VCH. 50-83.
39. İnternet: Edmund Optics Worldwide. The Correct Material for Infrared (IR) Applications. Web: "<https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/the-correct-material-for-infrared-applications>", Son Erişim Tarihi: 20.04.2021.
40. İnternet: FLIR. Seeing Through Fog and Rain With A Thermal Imaging Camera. Web: http://www.flirmedia.com/MMC/CSV/Tech_Notes/TN_0001_EN.pdf, Son Erişim Tarihi: 02.05.2021.
41. İnternet, Wikipedia, 1951 USAF resolution test chart. Web: https://en.wikipedia.org/wiki/1951_USAF_resolution_test_chart, Son Erişim Tarihi: 30.05.2021.

42. İnternet: The Laser Institute. Laser Safety Information. Web: <https://www.lia.org/resources/laser-safety-information>, Son Erişim Tarihi: 03.05.2021.
43. Bahuguna, K.C., Sharma, P., Vasan, N. S., and Gaba, S. P., (2007) Laser Range Sensors, *Defence Science Journal* 57-6, 881-890.
44. Maini, A. K., (2018). *Handbook of Defence Electronics and Optronics*, NewYork: Wiley, 865-931.
45. Livada, B., Peric, D., and Peric, M., (June 2017). *Challenges of Laser Range Finder Integration In Electro-Optical Surveillance System*. In Proc. 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN 2017, Kladovo, Serbia. 1-6.
46. ANSI, (2007). *American National Standard for Safe Use of Lasers: ANSI Z136.1-2007*, Orlando: Laser Institute of America.
47. İnternet: Wikipedia. NTSC. Web: <https://en.wikipedia.org/wiki/NTSC>, Son Erişim Tarihi: 16.06.2021.
48. Davis, J. R., (2001). *Alloying: Understanding the Basics*, Ohio: ASM International, 349-416.
49. ASM International Handbook Committiee, (1990). *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Ohio: ASM International.
50. U.S. Department of Defense, (1966). *Military Standardization Handbook: Aluminum And Aluminum Alloys*, (MIL-HDBK-694A), USA: U.S. Military Specs/Standards/Handbooks.
51. Kaufman, J. G., (2000). *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, Ohio: ASM International, 26-36.
52. Groover, M. P., (2012). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, New York: Wiley, 133-142.
53. Schwartz, M., (2016). *Encyclopedia Of Materials, Parts, And Finishes*, (Third edition). London: CRC Press, 188-200, 889-899.
54. Kaw, A.K., (2014). *Kompozit Malzeme Mekaniği*, (Çev. B.O. Baba, ve R. Karakuzu) Ankara: Efil Yayınevi. (Eserin orijinali 2005'te yayımlandı). 3-14.
55. İnternet, NetComposites, Multiaxial fabrics. Web: <https://netcomposites.com/guide/reinforcements/multiaxial-fabrics/>, Son Erişim Tarihi: 22.05.2021.
56. İnternet: Carr Lane Manufacturing Co. Inch and Metric Thread Standards. Web: <https://www.carrlane.com/engineering-resources/technical-information/design->

standards-and-engineering-information/inch-and-metric-thread-standards, Son Erişim Tarihi: 12.05.2021.

57. International Standard, (2013). *Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel, Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes-Coarse thread and fine pitch thread*, (ISO Standard No. 898-1:2013).
58. İnternet, Kutay, M.G., (2009), Cıvatalar ve Somunlar. Web: http://www.guven-kutay.ch/ozet-konular/08a_civata.pdf, Son Erişim Tarihi: 20.05.2021.
59. International Organization for Standardization. (2009). *Fasteners, Mechanical properties of corrosion-resistant stainless steel fasteners, Part 1: Bolts, screws and studs with specified grades and property classes*, (ISO Standard No.3506-1:2009).
60. Töre, C., (2009). *Bağlama Elemanları (Cıvata, Somun)*, Ankara: MMO yayınları, 1-90, 190-200.
61. Budynas, R. G., Nisbett, J. K., (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*, (Tenth edition), New York: McGraw-Hill Education, 401-443.
62. İnternet: HENKEL. Threadlocking User's Guide. URL: "https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/MRO_TL_Guide", Son Erişim Tarihi: 16.05.2021.
63. Mattsson, E., (1999). *Basic corrosion technology for scientists and engineers*, (Second edition), London: CRC Press LLC, 11-14, 37, 95.
64. Davis, J. R., (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*, Ohio: ASM International, 102-107, 125-134, 301-304, 331-334, 375-379.
65. U.S. Department of Defense, (1991)., *Military Standard: Manufacturing Process, Protective Finishing For Army Missile Weapon Systems*, (MIL-STD-186E), USA: U.S. Military Specs/Standards/Handbooks, 66-67.
66. Revie, R. W., (2011). *Uhlig's Corrosion Handbook*, (Third Edition). New York: Wiley, 716-745, 903.
67. Töre, C., (2018). *Mekanik Tasarımda Korozyon ve Önlemleri*, Ankara: MMO Yayınları /687, 211-235, 257-261, 268-282, 293-300, 301-316, 315-326.
68. Schweitzer, P. A., (2010). *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 200-213, 229-253.
69. İnternet: D38999 Mil Spec Connector Guide. D38999 Mil Spec Connectors Explained. URL: <https://d38999.federalconnectors.com/>, Son Erişim Tarihi: 22.05.2021.
70. U.S. Department of Defense, (2017). *Connectors, Electrical, Circular, Miniature, High Density, Quick Disconnect (Bayonet, Threaded Or Breech Coupling), Environment Resistant With Crimp Removable Contacts Or Hermetically Sealed With Fixed, Solderable Contacts, General Specification For*, (MIL-DTL-38999), USA: U.S. Military Specs/Standards/Handbooks.

71. İnternet, DfR Solutions (September 15, 2016). Implementing Physics of Failure into the Design Process. Web: <https://www.dfrsolutions.com/hubfs/Webinar%20Slides%20for%20YouTube/Implementing-Physics-of-Failure-into-Design-Process.pdf?hsCtaTracking=6e30fd8d-a9e1-48aa-822e-117e505b825b%7Cbffc2061-15dc-489b-9204-8610cdf9053f>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
72. İnternet, DfR Solutions (March, 2014). Design for Reliability at the Board Level. Web: <https://www.dfrsolutions.com/hubfs/Resources/DFR-at-Board-Level.pdf>, Son Erişim Tarihi: 15.06.2021.
73. U.S. Department of Defense, (2019). *Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, (MIL-STD-810), USA: U.S. Military Specs/Standards/Handbooks, part one ii-iv.
74. İnternet, DocPlayer, ICS Türk Standardı TS 3033 EN 60529/Mart 1997. Web: <https://docplayer.biz.tr/8122208-Ics-29-020-turk-standardi-ts-3033-en-60529-mart-1997-onsoz.html>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2021.
75. İnternet: Electromagnetic Compatibility (EMC). Web: http://capstone.eee.metu.edu.tr/files/2017/03/PRESENTATION_EMC_ASELSAN-2017.pdf, Son Erişim Tarihi: 22.06.2021.
76. U.S. Department of Defense, (2015). *Military Standard: Electromagnetic Interference Characteristics Requirements For Equipment*, (MIL-STD-461), USA: U.S. Military Specs/Standards/Handbooks, 25-26.
77. İnternet: SOCITEC. Products. Web: <https://socitec.com/en/our-products/>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2021.
78. İnternet: MatWeb. Aluminum 2024-T3. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=57483b4d782940faaf12964a1821fb61>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
79. İnternet: MatWeb. Aluminum 2024-T4; 2024-T351. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=67d8cd7c00a04ba29b618484f7ff7524>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
80. İnternet: MatWeb. Aluminum 6061-T6; 6061-T651. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
81. İnternet: MatWeb. Aluminum 5083-O. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d105c2a24d6942cdad79259f770fb806>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
82. İnternet: MatWeb. Aluminum 5083-H112. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bd6317b19dd94faf8bfff851e4f339e88>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.

83. İnternet: MatWeb. Aluminum 7075-T6; 7075-T651. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
84. İnternet: MatWeb. 304 Stainless Steel. Web: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
85. İnternet: MatWeb. AISI Type 304L Stainless Steel. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e2147b8f727343b0b0d51efe02a6127e>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
86. İnternet: MatWeb. 316 Stainless Steel, annealed plate. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a413dabd215462da3408e6e8b761349>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
87. İnternet: MatWeb. 316L Stainless Steel, annealed plate. Web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=530144e2752b47709a58ca8fe0849969>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
88. Hoeckelman, L. A., (2001). Environmental Protection and Sealing. In Donaldson, S. L., Miracle, D. B. (Eds.), *ASM Handbook Volume 21: Composites*, ASM International. 1540-1541.
89. U.S. Department of Defense, (2002). *Composite Materials Handbook - Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design And Analysis*, (MIL-HDBK-17/3F), USA: U.S. Military Specs/Standards/Handbooks, 6-49 – 6-65.
90. Parker, R. T., (2001). Mechanical fastener selection. In Donaldson, S. L., Miracle, D. B. (Eds.), *ASM Handbook Volume 21: Composites*, ASM International. 1518-1526.
91. İnternet, Henkel Yapıştırıcı Teknolojileri, Vida Sabitleyiciler. Web: <https://www.henkel-adhesives.com/tr/tr/urunler/endustriyel-yapistiricilar/vida-sabitleyiciler.html>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2021.
92. Secretary of the Air Force, (2009). *Cleaning and Corrosion Prevention and Control, Aerospace and Non-Aerospace Equipment*. (TO 1-1-691). Secretary of the Air Force, 2-3 – 2-20.
93. Ahmad, Z., (2006). *Principle of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Elsevier Science & Technology Books. 438-460.
94. Yalçın, H., ve Koç, T., (1997). *Mühendisler için Korozyon*. Ankara: Türk Mühendis ve Mimarlar Odası Kimya Mühendisleri Odası, 4-1 – 4-22.

95. İnternet: Conesys, MIL-DTL-38999 Features and Application Series III, Web: [https://www.conesys.com/catalogs/aero electric/MIL DTL 38999%20Series%20III.pdf](https://www.conesys.com/catalogs/aero%20electric/MIL%20DTL%2038999%20Series%20III.pdf), Son Erişim Tarihi: 15.05.2021.
96. İnternet: DfR Solutions. Guaranteeing Reliability With Mechanical Shock Simulation. Web: <https://www.dfrsolutions.com/resources/reliability-with-mechanical-shock-simulations-webinar-lp>, Son Erişim Tarihi: 11.06.2021.
97. Naval Surface Warfare Center Carderock Division West Bethesda MD, (May 2011). *Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment*, West Bethesda MD: Carderockdiv NSWC-11, 16-1 – 16-21, 7-1 – 7-20, 20-1 – 20-20, 8-1 – 8-20, 4-21 – 4-40.
98. Department of Defense, (1991). *Military Handbook: Reliability Prediction Of Electronic Equipment*, (MIL-HDBK-217), USA: U.S. Military Specs/Standards/Handbooks, 3-4 – 3-7.
99. İnternet: Barry Controls. Design Reference Manual. Web: <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/08/Barry-isolators-selection-guide.pdf>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2021.



EKLER

EK-1 MTBF analizi uygulaması için doğrulama

Prediction Data

Bearing Type	Ball
Design L10 Life Hours	5,05E+9
Reliability %	90,000
Actual Radial Load	50,000
Rated Radial Load	210,000
Actual Viscosity (xE-8)	1,000
Spec Viscosity (xE-8)	1,000
% of Water in Oil	0,000
Service Factor	2,000
Lubricant Contamination Factor	1,800
Temperature Rise	#, #

Pi Factors

Part Number	
Temperature	60,000000
C c	1,800000
C cw	1,000000
C r	0,999661
C sf	2,000000
C t	1,000000
C v	1,000000
C y	0,013497
λ_B	1,98020E-4
Model Failure Rate	9,61870E-6
Failure Rate	9,61870E-6

Copy Data Close

Parts Table Prediction Data General Data FMEA Worksheet Maintainability Data RBD Diagram

Ready

Resim 1.1. Rulman bilyalı 15.875x26.987x9.525 (2 adetlik kalem) için MTBF hesabı

Prediction Data

Type	Compression Spring
Tensile Strength	227,000
Corrosion Factor	1,000
Manufacturing Factor	1,000
Cycles/Hour	0,100
Modulus of Rigidity	10,000
Spring Deflection	0,216
Modulus of Elasticity	#, ###
Wire Diameter	0,059
Coil Diameter	0,295
# of Coils	4
Outside Diameter/Length	#, ###
Washer Deflection	#, ###
Material Thickness	#, ###
Number of Waves	#
Inside Diameter	#, ###

Pi Factors

Part Number	
C cs	0,100000
C dc	57,761155
C dw	0,334425
C g	0,657516
C k	1,243079
C l	0,008226
C m	1,000000
C n	42,875000
C r	1,000000
C y	0,586386
λ_B	23,800000
Model Failure Rate	7,771675
Failure Rate	7,771675

Copy Data Close

Parts Table Prediction Data General Data FMEA Worksheet Maintainability Data RBD Diagram

Ready

Resim 1.2. Yay basma, pszcl 6,75x1,5x25,5 için MTBF Hesabı

EK-1. (Devam) MTBF analizi uygulaması için doğrulama

Prediction Data

Base Failure Rate: 0,072
Tensile Strength: 120,000
Load Type: Torsional
Standard Grade of Fastener: ☐
Diameter: 0,315
Impact Category: Light
Thread Type: Machined
SAE Grade: 4 - 8
Vibration Type: Normal Vibration
Is Steel: ☒
Temperature Rise: 10,0

Pi Factors

Part Number	
Temperature	70,000000
C i	1,000000
C k	3,800000
C l	1,720000
C sz	1,113069
C t	1,000000
λ B	0,072000
Model Failure Rate	0,523801
Failure Rate	0,523801

Copy Data Close

Parts Table Prediction Data General Data FMEA Worksheet Maintainability Data RBD Diagram

Ready

Resim 1.3. M8 Vida ve yay aralayıcı için MTBF Hesabı

Prediction Data

Base Failure Rate: 0,0455
Tensile Strength: 159,900
Finish: Machined or Cold Drawn
Unbalanced Force: #,###
Modulus of Elasticity: 2,90E+7
Allowable Shaft Deflection: 0,007
Stress Concentration Sections: 1,620
Stress Concentration Grooves: 2,050
Moment of Inertia N: #,### N 0,275
Moment of Inertia M: #,### M 0,366
Moment of Inertia L: #,### L 3,810
Moment of Inertia X: #,### X 0,366
Temperature Rise: 10,0
Cycles/Hour: 198,000

Pi Factors

Part Number	
Temperature	70,000000
C dy	1,17403E-6
C f	0,673610
C sc	3,670000
C t	1,000000
λ B	0,045500
Model Failure Rate	2,61475E-5
Failure Rate	2,61475E-5

Copy Data Close

Parts Table Prediction Data General Data FMEA Worksheet Maintainability Data RBD Diagram

Ready

Resim 1.4. Mil için MTBF Hesabı

EK-1. (Devam) MTBF analizi uygulaması için doğrulama

Prediction Data

No data required

Pi Factors

Part Number	
Model Failure Rate	0,000000
Failure Rate	0,350000

Copy Data Close

Pi Factors Defaults

Parts Table Prediction Data General Data FMEA Worksheet Maintainability Data RBD Diagram

Ready

Resim 1.5. Pim için MTBF hesabı

Prediction Data

Base Failure Rate 0,072

Tensile Strength 120,000

Load Type Axial

Standard Grade of Fastener

Diameter 1,850

Impact Category Light

Thread Type Machined

SAE Grade 4 - 8

Vibration Type Normal Vibration

Is Steel ☒

Temperature Rise 10,0

Pi Factors

Part Number	
Temperature	70,000000
C i	1,000000
C k	3,800000
C l	1,090000
C sz	1,000000
C t	1,000000
λ B	0,072000
Model Failure Rate	0,298224
Failure Rate	0,298224

Copy Data Close

Parts Table Prediction Data General Data FMEA Worksheet Maintainability Data RBD Diagram

Ready

Resim 1.6. Rulman yüzüğü M31x1 için MTBF hesabı



GAZİ GELECEKTİR..