



**HAVACILIK ENDÜSTRİSİ İÇİN ROBOT KONSEPTLİ YENİDEN  
YAPILANDIRILABİLİR MONTAJ SİSTEMİ TASARIM METODOLOJİSİ  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Osman Emre ÇELEK**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2020**

Osman Emre ÇELEK tarafından hazırlanan “HAVACILIK ENDÜSTRİSİ İÇİN ROBOT KONSEPTLİ YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR MONTAJ SİSTEMİ TASARIM METODOLOJİSİ GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan:** Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Mehmet Arif ADLI

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Bedri TUÇ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 27/11/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Cevriye GENCER  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## 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.

Osman Emre ÇELEK

27/11/2020

HAVACILIK ENDÜSTRİSİ İÇİN ROBOT KONSEPTLİ YENİDEN  
YAPILANDIRILABİLİR MONTAJ SİSTEMİ TASARIM METODOLOJİSİ  
GELİŞTİRİLMESİ  
(Doktora Tezi)

Osman Emre ÇELEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Kasım 2020

ÖZET

Modern havacılık endüstrisi tek bir üretim hattında üretilen yeni uçaklar için montaj proses hatlarını geliştirirken üretim sürelerini de kısaltmaktadır. Montaj otomasyonu, robotik, malzeme taşıma, ölçüm, proses modelleme ve simülasyon, imalat prosesleri süreçlerindeki hızlı gelişmeler uçak yapıları montaj sistemlerinin tasarımı için sistematik metodolojilerin kullanılmasını gerektirmektedir. Literatür araştırmaları, havacılıktaki montaj operasyonları için tasarım metodolojilerinin eksikliğini ortaya koymaktadır. Bu tezde, aksiyomatik tasarım prensipleri kullanılarak yolcu uçağı gövde yapıları montajı için tasarım karmaşıklığına çözüm öneren yeni bir montaj sistemi tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Teknik olarak uygulanabilir olan dört montaj sistemi tasarım alternatifi sunulmuş ve montaj sistemi tasarım çözümleri elde edilip bu çözümler detaylı olarak açıklanmıştır. Detaylı bilgisayar simülasyon modelleri oluşturularak ürünler, prosesler, analiz ve optimize edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, fikstürlerin havacılık montaj operasyonları için kritik olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, montaj proseslerinde oldukça zaman alan ve maliyeti yüksek olan geleneksel montaj fikstürleri yerine modüler montaj fikstürleri tasarlanmıştır. Montaj fikstürleri, tamamen farklı uçak gövde panellerinin montajının yapılabilmesi için modüler çelik kiriş konstrüksiyon sisteminin geliştirilmiş tasarımına sahip olan ve boxjoint adı verilen kutu profil bağlantı yapısı ile CATIA kullanılarak tasarlanmıştır. Montaj fikstürlerinde diğer önemli bir gereksinim ise mukavemet ile ilgilidir. Bu nedenle geleneksel ve modüler fikstür yapıları hem analitik metotlar ile hem de sonlu elemanlar metodu ile Nastran, Patran ve Siemens UG NX kullanılarak analiz edilmiştir. Modüler fikstür çalışmalarından sonra montaj ve komponent yerleştirme proseslerinde endüstriyel robotların seçim problemleri için MOORA yöntemi kullanılmıştır. Robot seçim problemi, montaj prosesleri için 9 robot ve komponent yerleştirme prosesleri için 6 robot kullanılarak 6 adet tamamen bağımsız teknik kritere göre çözülmüştür. Proseslere yönelik en uygun robotların parametrik olarak seçimleri yapılmıştır. Bu tez sadece havacılık sektörü için değil, aynı zamanda farklı endüstri dallarındaki tüm montaj sistemlerinin tasarımı için bir referans kılavuzu olarak kullanılabilir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Havacılık, uçak üretimi, montaj otomasyonu, aksiyomatik tasarım, proses simülasyonu, modüler montaj fikstürleri, endüstriyel robot seçimi, moora.

Sayfa Adedi : 178

Danışman : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

DEVELOPMENT OF ROBOT BASED RECONFIGURABLE ASSEMBLY SYSTEM  
DESIGN METHODOLOGY FOR AEROSPACE INDUSTRY

(Ph. D. Dissertation)

Osman Emre ÇELEK

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2020

ABSTRACT

The modern aerospace industry develops assembly process lines for new aircraft which are produced on a single production line while shortening production times by seeking new technologies. Rapid advances in assembly automation, robotics, material handling, measurement, process modeling and simulation, manufacturing processes require the usage of systematic methodologies for the design of assembly systems for aircraft structures. A literature review establishes a lack of design methodologies for aerospace assembly operations. In this dissertation, a novel assembly system design methodology is developed by using axiomatic design principles in order to propose a solution to design complexity for aircraft fuselage structure assembly. Four technically feasible assembly system design alternatives are presented and assembly system design solutions are obtained and described in detail. Using a detailed computer simulation model product, processes analyzed, and optimized. According to the simulation results, it is understood that fixturing represents a critical aspect of aerospace assembly operations. Thus, instead of dedicated assembly fixtures, which is quite time consuming and expensive, modular assembly fixtures are designed. The assembly fixtures are redesigned to carry out completely different aircraft fuselage assembly panels by using CATIA with an improved design of the modular steel beam construction system called box joint. Another prominent requirement relates to the stiffness and the strength, thus dedicated and modular fixture structures are analyzed both analytical methods and finite element methods by using Nastran, Patran, and Siemens UG NX. After modular fixture studies, the MOORA method is used for the selection of KUKA industrial robots in assembly and stringer placement processes. The robot selection problem is solved according to 6 completely independent technical criteria by using 9 robots for the assembly processes and 6 robots for the stringer placement processes. The most convenient robots for the processes are parametrically selected. This dissertation can be used as a reference guide to assembly system design for not only the aerospace industry but also whole assembly systems in different industry branches.

Science Code : 91438

Key Words : Aerospace, aircraft production, assembly automation, axiomatic design, process simulation, modular assembly fixtures, industrial robot selection, moora.

Page Number : 178

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

## TEŞEKKÜR

Doktora maratonum ve oldukça zorlu tez çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, dağıldığım zamanlarda parlak fikirleri ile bütünü görüp, beni ve tez konularını toparlayan, daha iyi işler başarabilmem için limitlerimi zorlayan, değerli hocam Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL'a teşekkür ederim.

TUSAŞ Akademi Başkanlığı'ndaki yoğun iş temposuna rağmen doktora tezi konusunda gösterdiği anlayış ve desteğe ek olarak tüm tez izleme komitelerinde bilgi ve yorumlarıyla tecrübelerini paylaşan, endüstriyel ileri robotik konularına ilgi duymamı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Arif ADLI'ya teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarımın önemli bir bölümünü şekillendiren, tüm tez izleme komitelerinde tezi adım adım izleyip bilgi ve tecrübelerini paylaşan, örnek aldığım değerli hocam Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ'e teşekkür ederim.

Bilgi, deneyim ve önerileriyle tezin kalitesini artıran değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ ve Prof. Dr. Bedri TUÇ'a teşekkür ederim.

Bana olan inancı ve güveni ile beni doktora yönlendiren yüksek lisans tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Bora YILDIRIM'a teşekkür ederim.

İş hayatındaki unvanlarından bağımsız olarak hayatımın önemli dönemlerinde manevi destekleri ile her zaman yanımda olan, bana örnek olarak yol gösteren, geliştiren ve ufuk açan hem mühendislik ve yöneticilik anlamında hem de hayata dair kendilerinden çok şey öğrendiğim Sn. Zeki DOĞAN'a, Sn. Ali KÜÇÜK'e, Sn. Tahsin UĞURLU'ya ve Sn. Kemal PEKER'e teşekkür ederim.

Doktora tezimin şekillenmesinde önemli olan İmalat Mühendisliği desteği için Sn. Umut DEMİRALAN'a, CAD desteği için Sn. Berkan ÖZTÜRK'e, FEM analiz desteği için Sn. Ali İhsan KABAKÇI'ya, Grafik Tasarım desteği için Sn. Tuğrul DOĞANER'e, robotik konularındaki destekleri için KUKA firmasına ve montaj otomasyonu konularındaki destekleri için BROETJE AUTOMATION firmasına teşekkür ederim.

Doktora tezi kapsamında yazdığımız ulusal, uluslararası makaleler ve uluslararası kitap bölümlerinin şekillenmesinde büyük katkı sağlayan TUSAŞ Kütüphanesi ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca sonsuz destek ve sevgileri ile bana güç veren çok sevgili annem, babam ve kardeşlerime, bana olan inancı, sabrı ve sonsuz desteğiyle hep yanımda olan eşim Tuğçe ÇELEK'e, ailesine, motivasyon ve neşe kaynağım, biricik kızım Petek'e ve saymadığım daha birçok insana destekleri ve sabırları için içtenlikle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. HAVACILIKTA ÜRETİM SİSTEMLERİ.....	9
2.1. Özel Üretim Sistemleri .....	9
2.2. Esnek Üretim Sistemleri.....	9
2.3. Dijital Üretim Sistemleri .....	11
2.4. Yeniden Yapılandırılabilir Üretim Sistemleri .....	14
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	19
3.1. Üretim ve Montaj Sistemleri için Aksiyomatik Tasarım .....	19
3.2. Üretim ve Montaj Sistemleri için Simülasyon .....	20
3.3. Üretim ve Montaj Sistemleri için Fikstürler.....	22
3.3. Üretim ve Montaj Sistemleri için Robotik .....	23
4. METODOLOJİ .....	25
4.1. Aksiyomatik Tasarım Teorisi .....	25
4.2. Temel Uçak Yapıları .....	30
4.3. Aksiyomatik Prensipler ile Montaj Sistemi Tasarımı .....	33
4.3.1. Ölçüm sistemleri .....	36
4.3.2. Modüler fikstür sistemleri .....	41
4.3.3. Gövde kaburgası montaj hücre sistemleri .....	52

	<b>Sayfa</b>
4.3.4. Konum kontrol sistemleri.....	59
4.3.5. Malzeme taşıma sistemleri.....	61
4.3.6. Perçinleme sistemleri.....	69
4.3.7. Montaj sistemi tasarım alternatifleri sonuçları.....	86
<b>5. MONTAJ SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU.....</b>	<b>89</b>
5.1. Montaj Sistemlerinde Simülasyon Modelleri.....	89
5.2. Montaj Sistemi Alternatiflerinin Simülasyon Metotları.....	98
5.3. Montaj Sistemi Alternatiflerinin Simülasyon Sonuçları.....	112
<b>6. MONTAJ FİKSTÜRLERİNİN TASARIMI VE ANALİZİ.....</b>	<b>117</b>
6.1. Havacılıkta Sabit ve Modüler Montaj Fikstürleri.....	117
6.2. Sabit ve Modüler Montaj Fikstürlerinin Tasarımı.....	120
6.3. Sabit ve Modüler Montaj Fikstürlerinin Yapısal Analizi.....	122
6.3.1. Sabit montaj fikstürünün yapısal analizi için analitik yöntemler.....	122
6.3.2. Sabit montaj fikstürünün yapısal analizi için sonlu elemanlar metodu.....	126
6.3.3. Modüler montaj fikstürünün yapısal analizi için analitik yöntemler.....	129
6.4.4. Modüler montaj fikstürünün yapısal analizi için sonlu elemanlar metodu.....	131
6.4.5. Montaj Fikstürlerinin Tasarımı ve Analizinin Sonuçları.....	135
<b>7. ENDÜSTRİYEL ROBOTLARIN SEÇİMİ.....</b>	<b>139</b>
7.1. MOORA Yöntemi.....	141
7.1.1. MOORA-Önem katsayısı yaklaşımı.....	141
7.2. Uçak Gövdesi Üretiminde Örnek MOORA Çalışması.....	143
7.2.1. Montaj prosesleri için endüstriyel robot seçimi.....	143
7.2.2. Komponent yerleştirme prosesleri için endüstriyel robot seçimi.....	147
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>155</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>159</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>167</b>

	<b>Sayfa</b>
EK-1. Montaj sistemi genel tasarım hiyerarşisi .....	168
EK-2. Manuel ve yarı otomatik tezgâhlarla montaj tabanlı üretim .....	170
EK-3. Otomatik perçin tezgâhlarıyla montaj tabanlı üretim.....	171
EK-4. Robot konseptli montaj tabanlı üretim .....	173
EK-5. Perçinsiz birleştirme tezgâhlarıyla montaj tabanlı üretim.....	175
EK-6. Modüler montaj fikstürü tasarımı.....	177
ÖZGEÇMİŞ .....	178



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ÖÜS ve EÜS karşılaştırması.....	11
Çizelge 2.2. Çekirdek karakteristik ilişkileri .....	16
Çizelge 2.3. Havacılıkta montaj sistemleri metodoloji yöntemleri.....	17
Çizelge 4.1. FRs-1 ve DPs-1 kompozisyonu .....	35
Çizelge 4.2. FRs-11 ve DPs-11 kompozisyonu .....	36
Çizelge 4.3. FRs-111 ve DPs-111 kompozisyonu .....	36
Çizelge 4.4. FRs-111 ve DPs-111 kompozisyonu .....	37
Çizelge 4.5. FRs-1115 ve DPs-1115 kompozisyonu .....	39
Çizelge 4.6. FRs-12 ve DPs-12 kompozisyonu .....	41
Çizelge 4.7. FRs-122 ve DPs-122 kompozisyonu .....	43
Çizelge 4.8. FRs-1221 ve DPs-1221 kompozisyonu .....	45
Çizelge 4.9. FRs-1227 ve DPs-1227 kompozisyonu .....	48
Çizelge 4.10. FR1227 için tasarım parametresi opsiyonları .....	49
Çizelge 4.11. FRs-1228 ve DPs-1228 tasarım kompozisyonu .....	50
Çizelge 4.12. FRs-13 ve DPs-13 tasarım kompozisyonu .....	52
Çizelge 4.13. FRs-132 ve DPs-132 tasarım kompozisyonu .....	53
Çizelge 4.14. FRs-1321 ve DPs-1321 tasarım kompozisyonu .....	55
Çizelge 4.15. FRs-13211 ve DPs-13211 tasarım kompozisyonu .....	56
Çizelge 4.16. FRs-14 ve DPs-14 tasarım kompozisyonu .....	57
Çizelge 4.17. FRs-15 ve DPs-15 tasarım kompozisyonu .....	58
Çizelge 4.18. FRs-16 ve DPs-16 tasarım kompozisyonu .....	58
Çizelge 4.19. FRs-161 ve DPs-161 tasarım kompozisyonu .....	59
Çizelge 4.20. FRs-17 ve DPs-17 tasarım kompozisyonu .....	60
Çizelge 4.21. FRs-171 ve DPs-171 tasarım kompozisyonu .....	63
Çizelge 4.22. FRs-1711 ve DPs-1711 tasarım kompozisyonu .....	66

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.23. FRs-1712 ve DPs-1712 tasarım kompozisyonu .....	67
Çizelge 4.24. FRs-1713 ve DPs-1713 tasarım kompozisyonu .....	69
Çizelge 4.25. FRs-172 ve DPs-172 tasarım kompozisyonu .....	69
Çizelge 4.26. FRs-172 ve DPs-172 tasarım kompozisyonu .....	71
Çizelge 4.27. FRs-17211 ve DPs-17211 tasarım kompozisyonu .....	71
Çizelge 4.28. FRs-17212 ve DPs-17212 tasarım kompozisyonu .....	73
Çizelge 4.29. FRs-1722 ve DPs-1722 tasarım kompozisyonu .....	74
Çizelge 4.30. FRs-17221 ve DPs-17221 tasarım kompozisyonu .....	75
Çizelge 4.31. FRs-17222 ve DPs-17222 tasarım kompozisyonu .....	80
Çizelge 4.32. FRs-17223 ve DPs-17223 tasarım kompozisyonu .....	81
Çizelge 4.33. FRs-1723 ve DPs-1723 tasarım kompozisyonu .....	83
Çizelge 4.34. FRs-17231 ve DPs-17231 tasarım kompozisyonu .....	85
Çizelge 4.35. FRs-17232 ve DPs-17232 tasarım kompozisyonu .....	85
Çizelge 4.36. FRs-18 ve DPs-18 tasarım kompozisyonu .....	86
Çizelge 5.1. COJI proses değerleri .....	101
Çizelge 5.2. Manuel montaj proses değerleri.....	101
Çizelge 5.3. Birinci alternatif için simülasyon sonuçları.....	102
Çizelge 5.4. Kaburga toka perçinleme proses değerleri .....	105
Çizelge 5.5. Otomatik perçin tezgâhı proses değerleri .....	105
Çizelge 5.6. İkinci alternatif için simülasyon sonuçları.....	105
Çizelge 5.7. Robotik destek çıtası yerleştirme robotu proses değerleri.....	108
Çizelge 5.8. Kaburga toka robotu proses değerleri.....	108
Çizelge 5.9. Delme ve perçinleme robotu proses değerleri .....	109
Çizelge 5.10.Üçüncü alternatif için simülasyon sonuçları.....	109
Çizelge 5.11. RFSSW toka robotu proses değerleri .....	111
Çizelge 5.12. RFSSW perçinleme robotu proses değerleri.....	111

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 5.13. Dördüncü alternatif için simülasyon sonuçları .....	112
Çizelge 5.14. Montaj sistemi alternatifleri için yaklaşık yatırım maliyetleri .....	113
Çizelge 5.15. Montaj sistemi alternatiflerinin tezgâh kullanım oranları (%) .....	114
Çizelge 5.16. Montaj sistemi alternatiflerinin genel kullanım oranları .....	115
Çizelge 5.17. Montaj sistemi alternatiflerinin üretim teslimat süreleri .....	115
Çizelge 5.18. Montaj sistemi alternatiflerinin üretim kapasitesi .....	115
Çizelge 6.1. Sabit uçak gövde paneli fikstürlerinin boyutları.....	121
Çizelge 6.2. Kutu profil bağlantı hesaplamaları için parametre ve değerler tablosu.....	129
Çizelge 6.3. Maksimum yüklerin hesaplanması .....	130
Çizelge 6.4. Maksimum momentlerin hesaplanması .....	130
Çizelge 6.5. Modüler fikstürler ile üretim optimizasyonu .....	137
Çizelge 7.1. Uçak üretiminde robot uygulamaları literatürü .....	140
Çizelge 7.2. MOORA yönteminin benzer yöntemler ile karşılaştırılması.....	141
Çizelge 7.3. Karar matrisi-1 .....	144
Çizelge 7.4. Normalize edilmiş karar matrisi-1 .....	145
Çizelge 7.5. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi-1 .....	146
Çizelge 7.6. Montaj prosesleri için MOORA robot sıralaması.....	147
Çizelge 7.7. Karar matrisi-2.....	148
Çizelge 7.8. Normalize edilmiş karar matrisi-2 .....	150
Çizelge 7.9. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi-2 .....	152
Çizelge 7.10. Komponent yerleştirme prosesleri için MOORA robot sıralaması .....	153

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Bölgelere göre uçak teslimat sayıları (2015-2034).....	3
Şekil 1.2. Uçak sınıflarına göre teslimat sayıları (2015-2034) .....	3
Şekil 1.3. Optimum montaj otomasyon derecesi .....	4
Şekil 1.4. Havacılıkta endüstriyel robot uygulamaları.....	6
Şekil 1.5. Uçak gövdesi maliyet yüzdeleri .....	7
Şekil 2.1. Ürün veri yönetim sistemi .....	13
Şekil 2.2. Hataların zamana göre yaşam döngüsü maliyetleri .....	14
Şekil 4.1. Aksiyomatik tasarımın dört temel yapıtaşı .....	25
Şekil 4.2. Alanlar arası çapraz tasarım ayrışımı .....	27
Şekil 4.3. Ayrık tasarım .....	28
Şekil 4.4. Ayrıştırılmış tasarım .....	29
Şekil 4.5. Bağlaşık tasarım .....	29
Şekil 4.6. Temel uçak yapıları .....	30
Şekil 4.7. Uçak montajının taksonomisi .....	31
Şekil 4.8. Yolcu uçağı gövde panelinin temel elemanları .....	32
Şekil 4.9. Yolcu uçağı gövde paneli .....	33
Şekil 4.10. Airbus A320 yolcu uçağı kısım-19 gövdesi .....	34
Şekil 4.11. Yenilikçi optik ölçüm sistemleri .....	37
Şekil 4.12. Tam otomatik lazer izleyici .....	39
Şekil 4.13. T-Mac ölçüm aparatlı Kuka LBR iiwa robotu .....	40
Şekil 4.14. Esnek kauçuk diyafram .....	41
Şekil 4.15. Sabit ve yeniden yapılandırılabilir montaj takımları .....	42
Şekil 4.16. Destek çitası yerleştirme fikstürü ve robotu .....	44
Şekil 4.17. Farklı robot tutucu tahrik sistemlerinin karşılaştırılması .....	46
Şekil 4.18. Serbestlik derecelerine göre robot tutucuları .....	47

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.19. Standart paralel robot tutucuları .....	47
Şekil 4.20. Robotlarda çevrimiçi ve çevrimdışı programlama sistemleri.....	51
Şekil 4.21. Uçak gövdelerinde tipik kaburga toka bağlantısı .....	53
Şekil 4.22. Gövde yapı kaburgası perçinleme tezgâhı .....	54
Şekil 4.23. Gövde yapı kaburgası perçinleme robotu .....	56
Şekil 4.24. Servo motor .....	57
Şekil 4.25. Artırılmış gerçeklik ile markalama .....	60
Şekil 4.26. Tekerlekli manuel panel taşıma aparatları.....	62
Şekil 4.27. Her yöne hareket edebilen tekerlek sistemi .....	64
Şekil 4.28. Otonom mobil robot hareketleri .....	65
Şekil 4.29. Uçak gövde panelleri için havadan taşıma sistemi.....	68
Şekil 4.30. Mobil delik delme ve perçinleme robotu .....	70
Şekil 4.31. Otomatik perçin tezgâhları .....	73
Şekil 4.32. Üst perçinleme kafası .....	75
Şekil 4.33. Düz ve ofset anviller.....	76
Şekil 4.34. Operatör kontrol paneli.....	77
Şekil 4.35. Perçin besleme ünitesi ve perçin kasetleri .....	78
Şekil 4.36. Kenar mesafe izleyici cihazı.....	79
Şekil 4.37. Referans delik tespit monitörü.....	79
Şekil 4.38. Dönel sürtünmeli noktasal birleştirme robotu .....	82
Şekil 4.39. RFSJ proses aşamaları .....	83
Şekil 4.40. RFSJ prosesinde parçanın üst ve alt yüzeyi.....	84
Şekil 4.41. MS20470-AD5 tipi perçinde mukavemet değerleri .....	84
Şekil 4.42. Geliştirilen tasarım süper matrisinin bir kısmı .....	88
Şekil 5.1. Montaj sistemleri simülasyonunda örnek proses durum grafikleri .....	91
Şekil 5.2. Malzeme akışı objeleri.....	92

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.3. Kaynak objeleri.....	92
Şekil 5.4. Genel objeler.....	92
Şekil 5.5. Tecnomatix sınıf kütüphanesi.....	93
Şekil 5.6. Tekli istasyon hücresi .....	94
Şekil 5.7. Montaj hücresi .....	96
Şekil 5.8. Örnek tezgâh ölçüm veri değeri.....	99
Şekil 5.9. Uçak gövde paneli montaj sistemi birinci alternatifi.....	100
Şekil 5.10. Üçgensel dağılım simülasyon girdileri .....	102
Şekil 5.11. Uçak gövde paneli montaj sistemi ikinci alternatifi .....	103
Şekil 5.12. İkinci alternatif simülasyon modülleri.....	104
Şekil 5.13. Uçak gövde paneli montaj sistemi üçüncü alternatifi.....	107
Şekil 5.14. Uçak gövde paneli montaj sistemi dördüncü alternatifi .....	110
Şekil 6.1. Montaj fikstürü elemanlarının sınıflandırılması .....	118
Şekil 6.2. Airbus A320 uçağı .....	119
Şekil 6.3. Airbus A318-A321 A330/340 ve A350 uçakları gövde boyutları .....	119
Şekil 6.4. Esnek fikstür stratejileri .....	120
Şekil 6.5. Geleneksel sabit uçak gövde paneli fikstürleri .....	121
Şekil 6.6. Modüler kutu profil bağlantı uçak gövde paneli fikstürü .....	122
Şekil 6.7. Euler-Bernoulli giriş teorisi .....	123
Şekil 6.8. Timoshenko giriş teorisi .....	124
Şekil 6.9. Girişin serbest cisim diyagramı .....	124
Şekil 6.10. İki boyutlu mesh tipi.....	127
Şekil 6.11. Mesh, sınır şartları ve kritik yayılı yük.....	127
Şekil 6.12. Girişin eğilme değeri .....	128
Şekil 6.13. Girişin eğim değeri .....	128
Şekil 6.14. Kutu profil bağlantısı için asal yüklemeler.....	129

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.15. Kutu profil bağlantısında ağırlığın oluşturduğu kritik $M_z$ momenti.....	130
Şekil 6.16. Sabit fikstür 1D modelleme ve maksimum sehim.....	132
Şekil 6.17. Modüler fikstür 1D modelleme ve maksimum sehim .....	132
Şekil 6.18. Modüler fikstür kutu profil bağlantısı sonlu elemanlar modeli .....	133
Şekil 6.19. Modüler fikstürde bir ucu serbest maksimum sehim.....	133
Şekil 6.20. Kutu profil bağlantı yapısında civalatların temas yüzeyleri modeli .....	134
Şekil 6.21. Kutu profil bağlantı bölgesi deformasyonu .....	134
Şekil 6.22. Kutu profil bağlantı bölgesi açısal deformasyon sonucu.....	135
Şekil 7.1. Altı eksenli endüstriyel KUKA robotu .....	139

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$y$	Sehim
$\theta$	Sehim açısı
$E$	Elastik modül
$G$	Kayma modülü
$I$	Atalet momenti
$M_{xyz}$	Kutu profil bağlantısı momenti
$F_{xyz}$	Kutu profil bağlantısı yükü
$h$	Fikstür kiriş yüksekliği
$L$	Fikstür kiriş uzunluğu
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$k'$	Şekil faktörü
$\vartheta$	Çizgisel hız
$\omega$	Açısal hız
$Hz$	Hertz
$R_{dv}$	Teslimat sayısı
$AT$	Kullanılabilirlik süresi
$T_c$	Teslimat çevrim süresi
$WL$	İş yükü
$R_t$	Teslimat akış hızı
$T_L$	Yükleme süresi
$L_d$	Hareket mesafesi
$F_t$	Trafik faktörü
$E_w$	İşçi verimliliği
$x_{ij}$	Seçim kriterleri
$w_j$	Kriter ağırlık değerleri

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AT</b>	Aksiyomatik Tasarım
<b>CAD</b>	Bilgisayar Destekli Tasarım
<b>CATIA</b>	Eşgüdümlü Üç Boyutlu Etkileşimli Uygulama
<b>CNC</b>	Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
<b>COJI</b>	Uçak Parçası Bağlantı Düzeneği
<b>DP</b>	Tasarım Parametresi
<b>EÜS</b>	Esnek Üretim Sistemleri
<b>FR</b>	Fonksiyonel Gereksinim
<b>İPK</b>	İstatistiksel Proses Kontrol
<b>İTÜ</b>	İstanbul Teknik Üniversitesi
<b>KFY</b>	Kalite Fonksiyon Yayılımı
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>MOORA</b>	Oran Analizi Temelinde Çok Amaçlı Optimizasyon
<b>ÖÜS</b>	Özel Üretim Sistemleri
<b>SAE</b>	Amerikan Havacılık Mühendisleri Birliği
<b>TYM</b>	Tasarım Yapı Matrisi
<b>ÜSS</b>	Ürün Süreç Sistem
<b>ÜTS</b>	Üretim Teslimat Süresi
<b>ÜYD</b>	Ürün Yaşam Döngüsü
<b>YÜS</b>	Yeniden Yapılandırılabilir Üretim Sistemleri

## 1. GİRİŞ

Havacılık endüstrisindeki pazar büyümesi beklentisi rekabet artışını da beraberinde getirmiştir. Bu durum ise havacılık firmalarını daha esnek ve pazar beklentilerine daha çevik yanıt verme gereksinimini açığa çıkarmıştır. Tezin amacı, havacılık endüstrisindeki montaj hatlarını, montaj otomasyonu, robotik sistemler, malzeme taşıma sistemleri, ölçüm sistemleri, otomatik delme ve perçinleme sistemleri, imalat prosesleri süreçlerindeki hızlı gelişmelerin entegre edilmesi ile birlikte geliştirmektir. Bu tez çalışmasında bu amaca yönelik aksiyomatik tasarım prensipleri kullanılarak yolcu uçağı gövde yapıları montajı için tasarım karmaşıklığına çözüm öneren yeni bir montaj sistemi tasarım metodolojisi geliştirilmiştir.

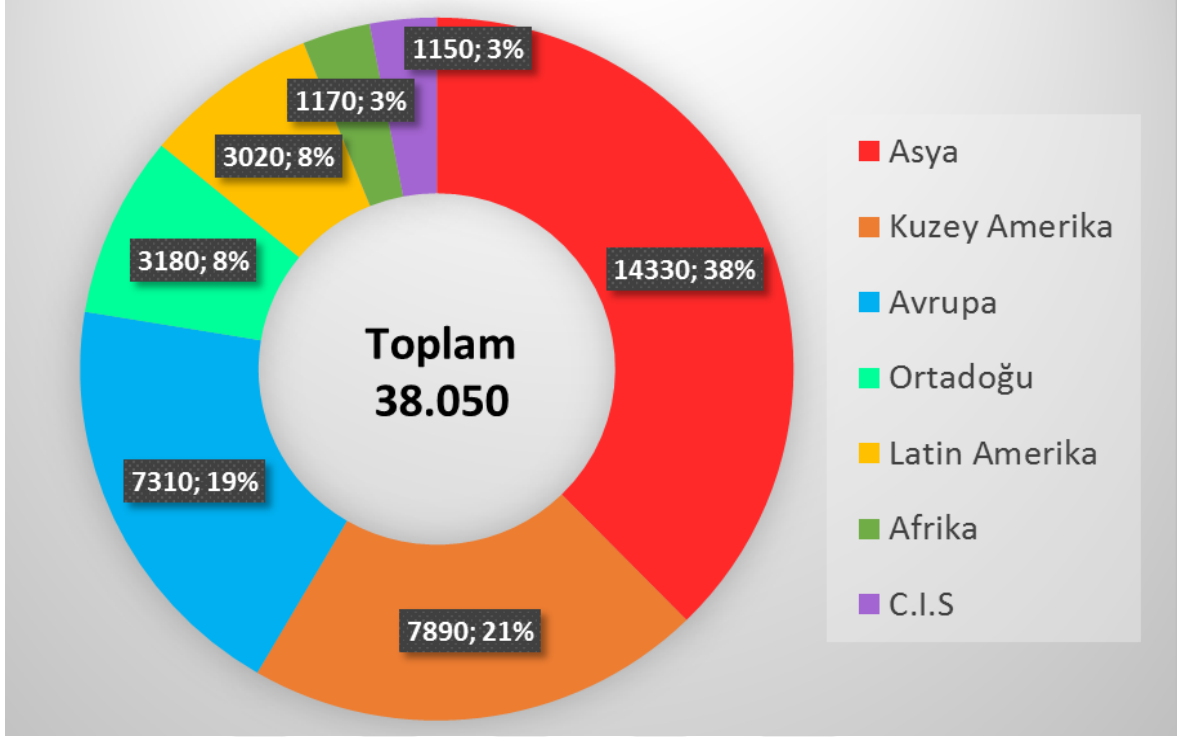
Tezin giriş bölümünde havacılığın dünyadaki genel durumu, yolcu uçağı talep ve teslimat sayıları, dünya genelinde havacılık firmalarının montaj otomasyonu konusunda yaptıkları yatırımlardan bahsedilmiştir. İkinci bölümde havacılıktaki üretim sistemleri konusunda bilgiler sunulmuştur. Üçüncü bölümde havacılık endüstrisinde aksiyomatik tasarım, üretim ve montaj simülasyonları, modüler fikstürler ve montaj otomasyonu için yapılan robotik çalışmalar konularında derinlemesine literatür araştırması yapılmış ve bu çalışmaların sonuçları yazılmıştır. Literatür araştırmalarından edinilen bilgilere göre havacılık endüstrisindeki geliştirilmeye açık alanlar tespit edilmiştir. Bu boşluğu doldurmak adına dördüncü bölümde havacılıkta *ilk kez* aksiyomatik tasarım yöntemi uçak gövde yapılarının montaj sistemi tasarımında kullanılmıştır. Beşinci bölümde havacılık endüstrisi için *ilk kez* simülasyon modelleri kullanılarak teknik açıdan uygulanabilir olan uçak gövde paneli montaj sistemi tasarım senaryoları belirlenmiştir. Darboğazların elimine edilmesine, katma değer katmayan işlemlerin azaltılmasına, verimliliğin ve üretilen ürün miktarının artırılmasına olanak tanıyacak olan montaj sistemi simülasyonları yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Altıncı bölümde simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere istinaden üretim optimizasyonunu sağlayacak olan modüler montaj sistemlerinin tasarımları ve analizleri *ilk kez* kutu profil bağlantıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yedinci bölümde ise havacılık endüstrisinde yine *ilk kez* montaj sistemine entegre edilecek olan robotlar için parametrik seçim çalışmaları yapılmıştır.

Havacılık endüstrisi 1940'lı yıllardan beri gelişme göstermektedir. Yolcu uçakları ile hava taşımacılığında faydalanan yolcu sayıları 1960'lı yıllarda 100 milyon, 1987 yılında 2

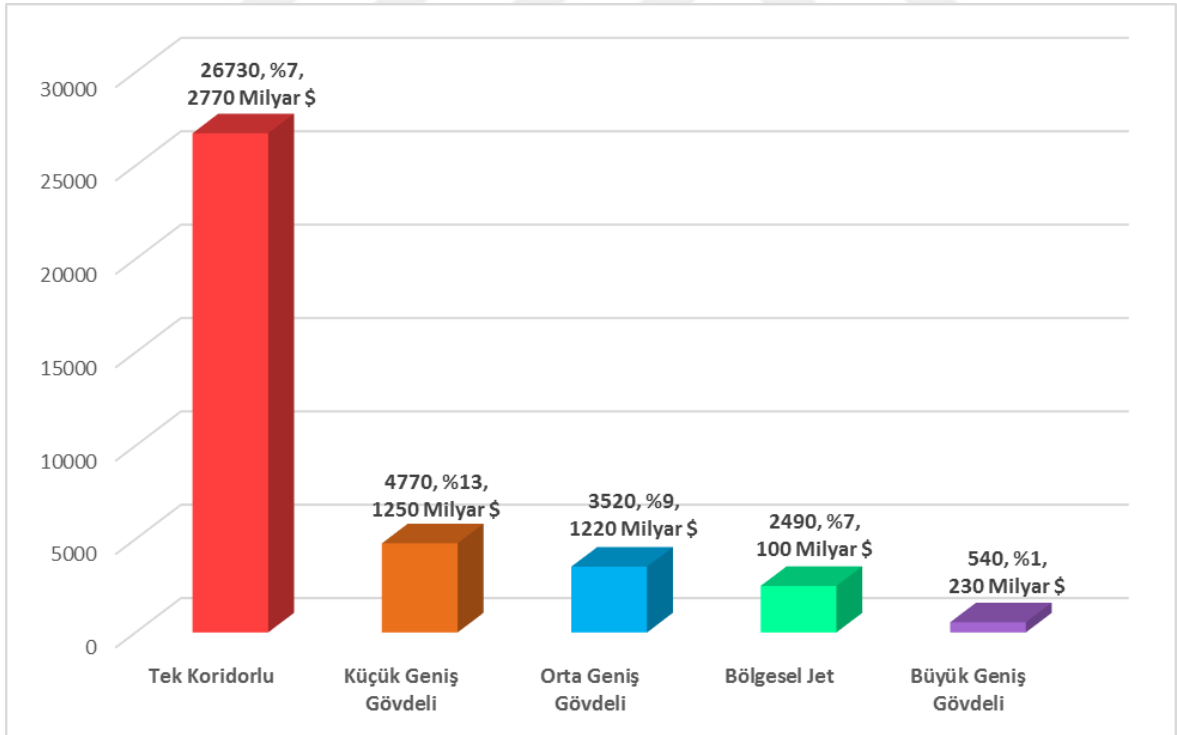
milyar ve 2019 yılında yaklaşık olarak 4,6 milyardır. Milyarlarca yolcu endüstride büyümeyi de beraberinde getirmiştir. Havacılığa olan ihtiyacın artmasıyla birlikte havacılık şirketleri, yatırımları, maliyetleri ve üretim sürelerini azaltmak için küreselleşmiş bir pazar ortamında performanslarını artırmak için çabalamaktadır. Tek bir üretim hattında üretilen yeni uçaklar için montaj proses hattını geliştirirken, değişiklik zamanlarını kısaltmakta ve yeni teknolojileri araştırmaktadır.

Uçak üreticilerinde Şekil 1.1. ve Şekil 1.2.'de gösterildiği üzere çok sayıda uçak siparişi birikmiştir. Örnek olarak Boeing 737 MAX, 777 X ve 787 modellerinde, 440 milyar dolarlık, 5700 adet uçak siparişi verilmiştir. Boeing son 3 yıl içinde tek katlı dar gövdeli 737 jet uçağının üretimini ayda 42'den 52'ye çıkarmayı planlamaktadır. Teknik açıdan karmaşık olan 787'nin üretimini de ayda 12'den 14'e çıkarmak istemektedir. En gelişmiş robot teknolojileri gövde ve kanat montaj projeleri için gereken esnekliği sağlamaktadır. Üretim prosesleri; hafif fikstürler, yeniden yapılandırılabilir aparatlar, otomatikleştirilmiş parça pozisyonlama, otomatik taramalı delikli havşa kontrolü, otomatik perçinleme kontrol sistemleri, robotik ölçüm sistemleri ve benzeri sistemlerle geliştirilmiştir. Buna istinaden Boeing gelecek birkaç yıl içerisinde montaj hatlarındaki üretimini artırmak için bir milyar dolarlık yatırım yapmayı planlamaktadır. Bu miktarın büyük kısmı robotik delme ve perçinleme, sızdırmazlık, kaplama ve boya uygulamalarına ek olarak malzeme taşıma sistemleri, karbon fiber serme ve çeşitli tezgâh operasyonları için harcanacaktır.

Diğer yandan Airbus, en popüler uçağı olan A320'nin üretimini 42'den 50'ye çıkarmayı hedeflemektedir. Airbus'ın A320 üretimindeki asıl planı; Çin, Fransa, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki fabrikalarıyla aylık üretimi 60 adete çıkarmaktır. Bu da uçak sanayiinde daha önce örneğı görülmemiş bir üretim hızı olacaktır [1,2].



Şekil 1.1. Bölgelere göre uçak teslimat sayıları (2015-2034) [3]

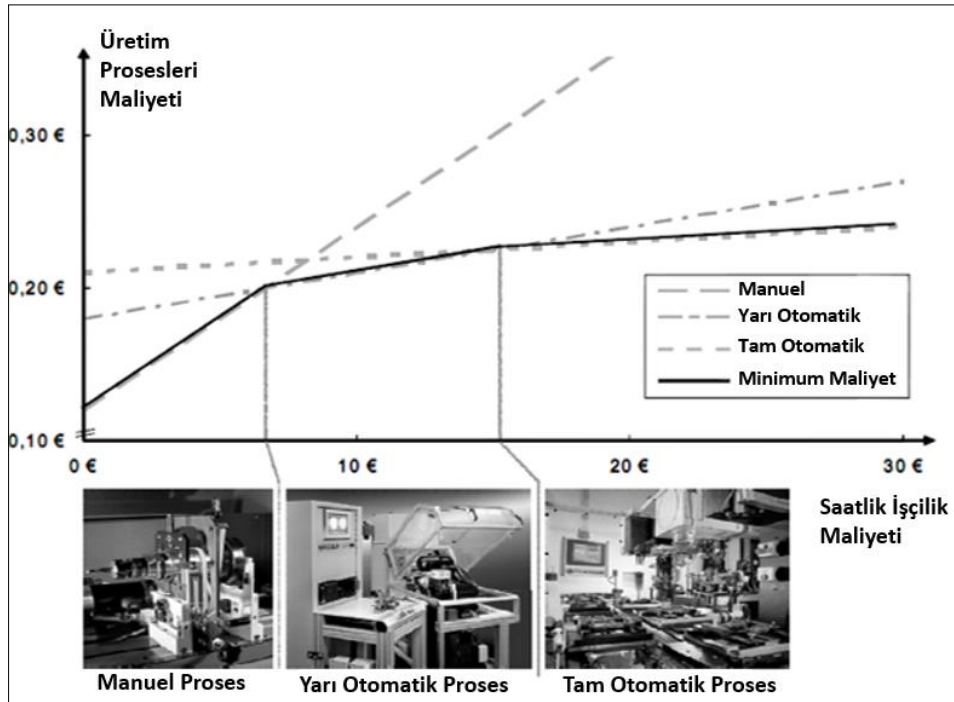


Şekil 1.2. Uçak sınıflarına göre teslimat sayıları (2015-2034) [3]

Airbus ve Boeing gibi dünya devi havacılık şirketlerinin yanı sıra, GE Aviation, Honeywell, Rockwell Collins, Spirit AeroSystems ve UTSC Aerospace Systems gibi bazı büyük

tedarikçilerin montaj hatları da artan taleplerden etkilenmektedir. Bunun sonucu olarak şirketler, sıkı kalite standartlarını sağlamaya devam ederken, üretimi de artırmak ve geliştirmek için yeni yöntemler araştırmaktadır. Havacılıkta montaj sistemlerine yatırım yapmak bir opsiyondan çok gereklilik ve zorunluluk haline dönüşmüştür [4].

Havacılıkta montaj otomasyon derecesi manuel işlemleri azaltmak, verimliliği artırmak için belirlenmelidir. Şirketlerin ilk sorması gereken soru, “Bu prosesi neden otomatize etmek istiyorum?” olmalıdır. En açık cevap, daha az tekrarlanan hareketler, daha düşük maliyet, kalite artışı ve tutarlı üretimdir. Skala, karmaşıklık ve yapısal entegrasyon, üretim prosesleri otomasyon için zorlayıcıdır. Maliyet, oran ve üretilecek ürün miktarı otomasyon optimizasyonu için öğrenme eğrisini oluşturur. Otomasyon uygulamaları ve entegrasyonu için değerlendirmeler fizibilite ve maliyet kazanç analizlerini içermelidir. Fizibilite analizi fabrikanın kabiliyetini ve otomasyon prosesine geçiş sürecini kolaylaştırmak için gereklidir. Organizasyonel süreç, ekipman ve üretim teknolojileri seçimi üretim ağının esnekliğini etkiler. Otomasyon birçok üretim prosesinin sermaye yoğunluğunu da belirler. Şekil 1.3.’te gösterilen denge durumundaki optimum montaj otomasyon derecesi, sermaye ve işçilik baz alınarak belirlenmelidir [5].



Şekil 1.3. Optimum montaj otomasyon derecesi [5]

Birinci sırada rekabetçi kalabilmek ve yüksek iş gücü verimliliği için optimum derece otomasyona ihtiyaç vardır. Küçük sermaye ile üretim prosesleri, şirketlerin üretim için uzun vadeli esnekliğini artırır. Büyük sermaye ile üretimler ise bu esnekliğe ancak dönüştürülebilir fabrikalar, yeniden yapılandırılabilir imalat sistemleri ile ulaşabilir. Bu nedenlerle artan talepler doğrultusunda havacılık devleri kendini esnek ve yeniden yapılandırılabilir imalat sistemleri ve otomasyon çözümlerine yöneltmiştir. Esnek üretim yapabilen sistemlere yatırım yaparak maliyet azaltma, kaliteyi artırma ve üretimi hızlandırma birincil amaçtır. Geleceğin fabrikaları için gelişmiş simülasyonlar, sensörler, veriler, bilgisayarlar, entegrasyon ve robotik teknolojilerine gereksinim vardır. Üretim kısıtlamalarını çözmek adına, geliştirilen metodolojiler ile birlikte üretimde robotlar, otomatik yönlendirmeli araçlar, yeniden yapılandırılabilir sistemler ve diğer teknolojiler kullanılmaktadır.

Montaj hatlarında kullanılan otomasyon tipleri üç temel sınıfa ayrılabilir. Bunlar; sabit otomasyon, programlanabilir otomasyon ve esnek otomasyondur. Sabit otomasyonda işlem veya montaj basamakları ve sıralaması cihaz yapılandırmasına bağlı olarak sabittir. Program komutları belirlidir ve kolay değiştirilemez. Her ne kadar iş döngüsü basit işlemlerden oluşsa da hareketlerin tümleştirilmesi, koordinasyonu işi karmaşık kontrol ve bilgisayar sistemine gereksinim duyar. Tipik bir sabit otomasyon sisteminin özellikleri özel cihazlar için yüksek yatırım maliyeti, hızlı üretim seviyesi ve ürün çeşitliliğine yönelik çok az veya hiç esnekliğin olmamasıdır. Yüksek yatırım maliyeti birçok parçaya dağıtılarak birim başına düşen maliyet benzer imalat yöntemlerine göre düşürülür.

Programlanabilir otomasyonda cihazlar farklı parça ve ürünlerin üretilmesine yönelik olarak program komutları değiştirilebilir şekilde tasarlanmıştır. Her yeni parça için yeni program hazırlanabilir ve cihaz hazırlanan program kodlarını okuyup verilen işlemi gerçekleştirir. Programlanabilir otomasyonun özellikleri, programlanabilen genel amaçlı cihazlara yüksek yatırım, sabit otomasyondan daha yavaş üretim, yeniden programlanabilirlik sayesinde ürün çeşitliliğine cevap verebilme, çeşitli parça ve ürün tarzlarında grup üretimine uygunluktur.

Esnek otomasyon, programlanabilir otomasyonun grup üretime uygun bir parçası olarak görülmektedir. Grup üretiminin dezavantajı, gruplar arasındaki geçiş sırasında cihaz ve takım değişimlerinde kaybedilen zamandır. Programlanabilir otomasyon genel anlamda bu dezavantajdan etkilenmektedir. Esnek otomasyon, programlanabilir otomasyonun devamı

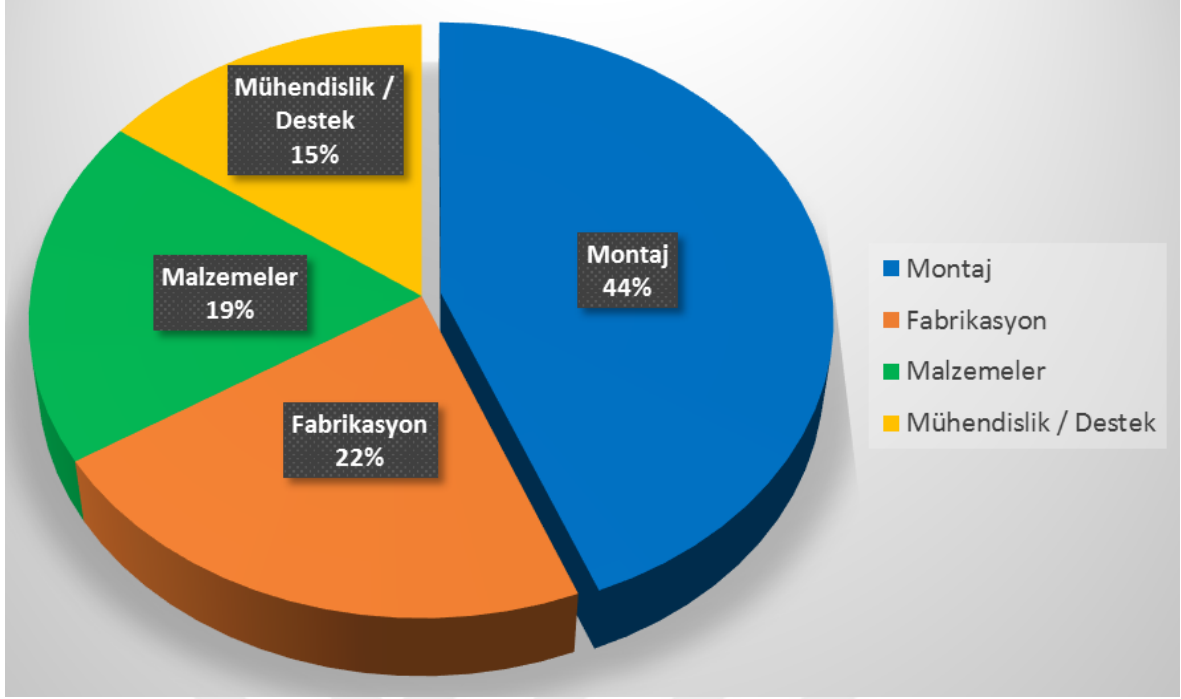
olup, hazırlık, kurulum ve yeniden programlama için hemen hemen hiç zaman kaybının yaşanmadığı bir durumdur. Program komutlarındaki gerekli değişiklikler, bir sonraki iş tezgâha gelmeden hızlıca yapılabilir. Böylelikle esnek sistem, karışık parçaları veya ürünleri gruplamak yerine birbiri arkasına üretme kabiliyetine sahiptir. Esnek otomasyon sisteminin özellikleri, özel tasarımı cihazların yüksek yatırım maliyeti, orta hızda üretim ve farklı parça, ürün tarzlarının sürekli üretimidir [6].



Şekil 1.4. Havacılıkta endüstriyel robot uygulamaları [7,8,9,10,11,12]

Şekil 1.4.'teki endüstriyel robot uygulamaları ile de desteklenen optimum montaj otomasyon uygulamalarının şirketlere kazandıracığı avantajlar aşağıdaki gibidir [13].

- Azaltılmış işçilik saatleri
- Daha fazla üretim
- Ekipmanların verimli kullanılması
- Tezgâh optimizasyonlu performans
- Kalite iyileştirmesi, doğruluk, tekrarlanabilirlik
- Düşük hurda oranı
- Hızlı işleme ve muayene
- Malzeme maliyet standardizasyonu
- Takım maliyeti esnekliği



Şekil 1.5. Uçak gövdesi maliyet yüzdeleri [14]

Havacılık şirketlerinde montaj hatları, uçağa ait çeşitli tüm parçaların toplandığı ve bir araya gelerek birleştirildiği odak noktalarıdır. Maliyet azaltmak için en büyük fırsat montaja bağlı değişkenlik göstermeyen proseslerdedir. Bir uçakta gövdeler toplam uçak maliyetinin %65-%75' ini oluşturur. Gövde üretiminde ise Şekil 1.5.'te gösterildiği üzere montaj maliyeti %44 ile fabrikasyon, malzeme, mühendislik ve destek maliyetine göre daha yüksektir. Bu nedenle maliyeti azaltmak için optimum montaj otomasyon uygulamaları için ilk olarak montaj hatlarına odaklanılmalıdır [14].



## 2. HAVACILIKTA ÜRETİM SİSTEMLERİ

Mevcut üretim sistemleri, genel olarak özel üretim hatları ve esnek üretim sistemlerinden oluşmaktadır. Bu sistemlerdeki bazı kısıtlamalar nedeni ile makul maliyet ile pazar beklenti ve ihtiyaçlarını karşılamak mümkün olmamaktadır.

### 2.1. Özel Üretim Sistemleri

Özel üretim sistemleri (ÖÜS) sabit otomasyon temeline dayanır ve şirketin yüksek miktarda talebe sahip ana ürünlerinin seri şekilde üretilmesini sağlar. Her özel üretim hattı tipik olarak yüksek üretim oranına sahip tek çeşit ürün için tasarlanmıştır. Üretim miktarı arttıkça, üretilen her bir ürün için birim maliyet göreceli olarak düşmektedir. Böylece, ÖÜS üretim ve pazar talepleri eşleştiği sürece uygun maliyetlidir. Küresel rekabetin artan baskısı ile imalat hatları tam kapasite çalışmaz ise maliyet uygun olmaktan çıkacak ve bu da kayıplara neden olacaktır. Çok çeşitli ürünleri ÖÜS ile aynı hat üzerinde üretmek mümkün değildir. Bu nedenle modern üretimde rolleri geri planda kalmaya başlamıştır. Bir ÖÜS'nin ortalama kullanım oranı %53'tür [5].

Bazı ürünlerin üretimindeki bu düşük ortalama kullanım oranının nedeni, üretimin erken safhalarında veya ürün yaşam döngüsünün sonunda, bazı ürünlerin gerekli olması, fakat optimal değerlerin altında olmasıdır. Olgun fazdaki ürünler için bile her zaman ÖÜS, tasarlandığı zamandaki üretim hacmi tahminlerine ulaşamamaktadır. Aksine, ÖÜS ayrıca pazar talepleri, hatların tasarlanan üretim kapasitesini aştığı durumlarda da başarısız olmaktadır. Eğer ürünün popülaritesi tüm pazar talebi beklentilerini aştığında ya da üretilen ürün için yeni kullanım alanları bulunduğu anda, ÖÜS artan talebe yanıt vermek için güçsüz kalmaktadır. Bu tür zorluklar, tasarlanan esnek üretim sistemleri ile aşılmaktadır.

### 2.2. Esnek Üretim Sistemleri

Esnek üretim sistemleri (EÜS), otomatik taşıma, depolama sistemlerine ve birbirlerine bir bilgisayar sistemi ile bağlı tam otomatik makine hücreleri ve diğer programlanabilir otomasyon grup teknolojilerinden oluşur.

Malzeme taşıma sistemi, parçaların istasyonlar arası taşınması içindir. Genellikle bu sistemleri parçaları depolamak için limitli alanları da vardır. Otomatik üretim için uygun olan taşıma sistemleri, rulolu konveyörler, otomatik yönlendirmeli araçlar ve endüstriyel robotlardır. En uygun tip, parçaların büyüklüğü ve geometrik şekillerine bağlı olduğu kadar, ekonomi ve diğer EÜS'lere uygunluğuyla da ilgilidir. Silindirik olmayan parçalar genellikle esnek üretim sisteminde bir palet üzerinde taşınır. Paletler kullanılacak taşıma sistemine uygun olarak ve fikstürler parça ailesi içerisindeki farklı parça geometrilerini palete bağlayabilecek tarzda tasarlanırlar. Silindirik parçalar ise ağırlıkları engel teşkil etmedikçe robotlar ile taşınabilmektedir.

Malzeme taşıma sistemleri EÜS'lerin yerleşim düzenini belirler. Doğrusal, döngüsel, merdiven, açık alan ve robot merkezli hücreler olmak üzere beş farklı yerleşim düzeni vardır. Doğrusal yerleşim, parçaları işlem istasyonları ve yükleme boşaltım istasyonları arasında doğrusal bir transfer sistemi kullanır. Doğrusal transfer sistem genellikle iki yönlü hareket yapabilme kabiliyetindedir, eğer bu mümkün değilse, EÜS daha çok bir transfer hattı gibidir ve sistem üzerinde üretilen farklı tipte parçalar tek yönlü hareket yüzünden aynı temel işlem sırasını takip etmek zorundadır. Döngüsel yerleşim, bir konveyör döngüsü ve çevresinde yer alan iş istasyonlardan oluşur. Bu yapı, her istasyondan diğerlerine ulaşabilme imkânı sağladığı, farklı işlem sıralamalarına izin verir. Bu durum merdivenin basamaklarında iş istasyonların yerleştirildiği, merdiven yerleşimi için de geçerlidir. Açık alan yerleşimi ise, birbirine bağlı birkaç döngü ile EÜS yapılarının en karmaşık olanıdır. Son olarak, robot merkezli hücre sistemi ise, hücrenin içinde konumlanan ve yükleme boşaltım işlemlerini yapan bir robottan oluşur [15].

Esnek üretim sistemleri grup teknolojisi prensiplerine dayanır. Hiçbir üretim sistemi tamamen esnek değildir. Bir üretim sisteminde parçalar veya ürünler sonsuz çeşitlilikte üretilemez. EÜS ile elde edilen esnekliğin bir sınırı vardır. Buna göre, EÜS parça veya ürünleri, belirli biçimler, ölçüler ve işlemler aralığı içinde üretmek için tasarlanmıştır. Bir diğer anlamda EÜS, tek bir aileyi veya sınırlı miktarda parça ailelerini üretme kapasitesine sahiptir. Esnek olarak kabul edilebilmek için bir üretim sistemi çeşitli kıstasları karşılamak zorundadır. Bir otomatik üretim sisteminin esneklik testleri sistemin, farklı parça tiplerini partiler yerine karışık olarak işleyebilmesi, üretim çizelgelerindeki değişiklikleri kabul edebilmesi, sistem içerisinde ekipmanların hatalı çalışmalarına ve arızalanmasına sistem performansında önemli düşüşler olmadan çözümler üretebilmesi, yeni parça tasarımlarının

ilk üretilmelerine uyum sağlaması gerekir. Bu şartları yerine getirmek için, merkezi bir bilgisayar ile bileşenleri kontrol ve koordine etmek gerekmektedir.

Bu üretim sistemleri ÖÜS’de karşılaşılan zorlukların çözümünde önemli rol oynamıştır. Bu avantajının yanında, yine de araştırmalar göstermektedir ki esnek sistemler hala yaygın olarak kabul görmemiştir. EÜS için, ÖÜS’ye göre daha pahalı makinelere gereksinim vardır. Üretim oranı da ÖÜS ile karşılaştırıldığında oldukça azdır. Buna ek olarak, binlerce, milyonlarca parçanın seri üretimi gerekliyse EÜS’nin kapasitesi de ÖÜS’ye göre genellikle yetersiz kalmaktadır. Dolayısı ile seri üretime uygun değildir. Kapasite artırmaya yönelik hızlı değişiklikler için tasarlanmamıştır.

Esnek üretim sistemleri, orta seviye üretim miktarı ve çeşitlilikteki üretimlerde kullanılan sistemlerdir. Eğer parça veya ürünler yüksek miktarda ve çeşit olmadan üretiliyorsa, böyle durumlarda bir transfer hattı veya benzer özel üretim sistemleri en uygun olanlardır. Havacılık sektörü için üretim miktarları EÜS için oldukça uygundur. Milyonlarca parçanın üretimi için seri üretime gereksinim olmadığından, ÖÜS’yi tam kapasite ile kullanmak da mümkün değildir. EÜS bu boşluğu, kullanımı yaygınlaştırıldığında sistematik bir şekilde doldurmaktadır. Çizelge 2.1.’de esnek üretim sistemleri ve özel üretim sistemleri arasındaki karşılaştırma iki sistemin de kısıtlamalarını belirtmektedir.

Çizelge 2.1. ÖÜS ve EÜS karşılaştırması [5]

Özel Üretim Sistemleri	Esnek Üretim Sistemleri
<i>Kısıtlar</i>	<i>Kısıtlar</i>
Esnek değil	Pahalı
Sabit kapasite	Nispeten yavaş, tek takım operasyonu
<i>Avantajlar</i>	<i>Avantajlar</i>
Ucuz	Dönüştürülebilir
Hızlı, çoklu takım operasyonu	Artırılabilir kapasite

### 2.3. Dijital Üretim Sistemleri

Bulut tabanlı bilgi işlem, robotik ve akıllı sensörler, çok modlu modelleme ve simülasyon, ileri üretim tekniklerindeki hızlı gelişmeler modern imalatı dönüştürmektedir. Özel olarak tasarlanan ürünlere kayan yönelim, küresel ekonomide rekabet edebilecek çevik ve

uyarlanabilir sistemlere olan ihtiyacı tetiklemiştir. Dijital imalat bilgisayar tasarım araçları, modelleme ve simülasyon, akıllı makineler ve sensörler, eklemeli imalat, imalat metotlarını sorunsuzca birbirine bağlar. Ürün teslim sonrası servis zamanını kısaltır ve ilk üretim fikrinden, üretilen ilk ürüne kadar olan süreçteki maliyetleri azaltır.

Dijital imalat, Şekil 2.1.'de gösterilen ürün veri yönetim sistemini kullanarak, geniş mühendislik yelpazesinde planlama araçları, yazılım, bilgi ve iletişim teknolojilerini, yeni teknolojileri mevcut imalat proseslerine entegre ederek, proseslerin mümkün olduğunca hızlı ve verimli olmasını sağlar. Mühendislik araştırmalarının temel konuları bütünleşik araçların geliştirilerek imalat için uyarlanabilir hale getirilmesidir. Dijital imalat geleceğin en önemli teknolojisidir. Gereksinim duyduğu konular aşağıdaki gibidir;

- Dağıtılmış Veri Yönetimi
- Proses Mühendisliği Araçları
- Grafik Ara yüzleri ve Sunum Araçları
- Katılımcı, İşbirlikçi ve Ağ Mühendisliği
- Gerçek Bağlantılı Arayüz

Dijital imalatın vizyonu, üretim sisteminin, yaşam döngüsü boyunca dinamik davranışının çok ölçekli modellenmesini gerektirir. Bu vizyon, gerçek üretim sisteminin dijital olarak da gösterilmesi ihtiyacı tarafından yönlendirilmiştir. Bilgisayar destekli simülasyonlar ve modelleme araçları karmaşık üretim proseslerini makul zamanda ve yatırım ile görselleştirmeyi, analiz etmeyi ve optimize etmeyi sağlar. Gelecekte tek organizasyon yaklaşımları yetersiz kalacaktır. Proses planlamada ve tasarımda bilgisayarların evrensel kullanımı, yani sanal mühendislik, rasyonelleştirme konusunda çok önemli bir nokta oluşturmaktadır [16].

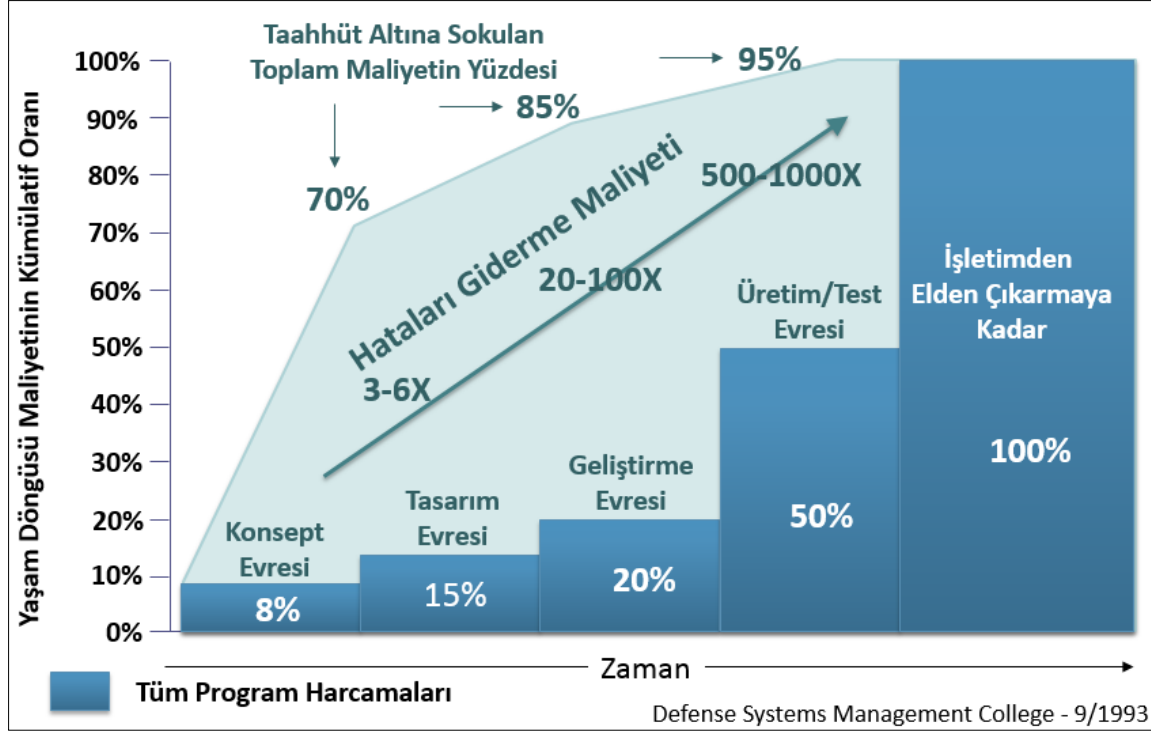


Şekil 2.1. Ürün veri yönetim sistemi [16]

Bilgisayarlar tasarım, üretim planlama ve kontrol, tesis ve kaynak planlama gibi alanlara da girdiğinde, bu dijital fabrikaya yol açacaktır. Dijital fabrika, taşıma sistemleri, depolama alanları, imalat ve montaj hatları, robotlar, üretim tezgâhları hatta çalışan operatörlerine kadar gerçek fabrikayı yansıtan bir bilgisayar modellemesidir. Sanal dünyada detaylı modeller, ürünler, parçalar, prosesler, tesis yerleşimleri ve çeşitli görevlerin simülasyonu, analizi ve optimizasyonu yapılmaktadır. Bu da üretim zamanlarının kısaltılmasını, maliyetlerin azaltılmasını, ürün çeşitliliği, kalite ve verimliliğin artmasını sağlayarak şirketin rekabet gücünü de artırmaktadır.

Konsept evresindeki bir hatanın düzeltilmesi minimum maliyete neden olurken, proje başladığında hataları giderme maliyeti de katlanarak artmaktadır. Bilgisayar simülasyonları projenin iyi tasarlanıp tasarlanmadığını ve sistemin düzgün çalışıp çalışmadığını en baştan görebilme imkânı sağlamaktadır. Ayrıca sistem üzerinde geniş bir bakış açısı ile farklı

çözümler için çoklu kriter analizleri yapılmasını sağlar. Bu metotun önemli özelliği ise örneğin tezgâh bozulduğunda, sistem hata konumunda iken sistemin davranış analizlerinin incelenbilmesidir. Kısaca özetlemek gerekirse sanal mühendislik sayesinde hatalar henüz proje konsept aşamasında iken düzeltilmektedir. Şekil 2.2.'de hataların zamana göre yaşam döngüsü maliyetleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Hataların zamana göre yaşam döngüsü maliyetleri [17]

#### 2.4. Yeniden Yapılandırılabilir Üretim Sistemleri

Yirminci yüzyılın sonlarında, imalat işletmeleri küresel ekonomide rekabet etmesi gereken yeni bir döneme girdi. Küresel rekabet müşterilerin alım gücünü artırırken, bu da yeni ürünlerin sık sık piyasaya sürülmesine ve ürün taleplerinde büyük dalgalanmalara neden oldu. Rekabetçi kalabilmek için üretici firmalar sadece ürünlerini yüksek verimlilikle üretmekle kalmamalı aynı zamanda pazar değişikliklerine ve müşteri ihtiyaçlarına hızlı tepki veren sistemleri kullanmalıdırlar. Beklenmedik şekilde değişebilecek üretim miktarlarıyla birlikte, yeni ürünlerin hızlı bir şekilde piyasaya çıkmasını sağlayan yeni bir üretim kapasitesi zorunluluk haline geldi. Yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri (YÜS) bu kabiliyeti sunmaktadır. Bu sistemler müşteri ihtiyaçlarını düşük maliyetli ve hızlı şekilde karşılamaya odaklanmıştır. Yeniden yapılandırılabilirlik, pazar değişikliklerine hızlı bir

şekilde yanıt vermek için, maliyet etkin, hızlı yapılandırılabilir üretim tezgâhları, takımları ve imalat sistemleri ile ilgilenen bir mühendislik teknolojisidir.

Bir sistemin yeniden yapılandırılabilirliği sistemin yapılandırılabilirliğinden kaynaklanır. Konfigürasyon, kullanıcı gereksinimlerine ve spesifikasyonlara göre modüler yapı setinden, modülün seçimi ve bileşimi ile tasarıma karşılık verir. Yeniden yapılandırmalar bağımsız, otonom işleyen bileşenlerin takviye edilmesi ya da çıkarılmasını sağlayarak yapı modifikasyonu, kapasitesi ve teknolojisinin değiştirilmesidir. Tipik YÜS, esnek ekipmanlar, tezgâh takımları, robotlar ve süreç içi kalite kontrol tezgâhlarını içerebilir. YÜS sistem seviyesinde tezgâhların birbirine bağlanması ve sistem içindeki tezgâhların yeniden yapılandırılmasıdır [5]. Yeniden yapılandırılabilir sistemler, en baştan, yazılım ve donanım modülleri hızlı ve güvenilir olarak entegre edilebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Tasarımlar yapılırken de Çizelge 2.2.'de gösterilen YÜS çekirdek karakteristikleri göz önüne alınmalıdır;

*Modülerlik;* yeniden yapılandırılabilir imalat sistemlerinde, tüm büyük parçalar modülerdir. İhtiyaç duyulduğunda, yeni uygulamalara uygun olarak modüler parçalar değiştirilebilir ya da yükseltilebilir. Temel modüllerin seçimi ve bağlantı biçimleri, kolayca entegre edilebilen, özelleştirilebilen, dönüştürülebilen ve teşhis edilebilirliğe sahip olan sistemlerin oluşturulmasını sağlamalıdır.

*Tümlenebilirlik;* yeniden yapılandırılabilir sistem tasarımına yardım etmek için, sistem kümesi konfigürasyonları ve entegrasyonları geliştirilmelidir. Bu kurallar yapılandırılabilir hesaplamalar içindir. Kurallar işleme alanında, tasarımcıya parça özellikleri ve tezgâh operasyonları arasında ürün-proses ilişkisi sağlamalıdır.

*Özelleştirilebilirlik;* bu karakteristik sistem ve tezgâh maliyetini azaltma imkânı verir. Parça ailelerinin üretimi için sistem tasarımı yapılmasını sağlar. Parça ailesi benzer ya da aynı geometrik özelliklere ve şekillere, toleranslara, proseslere, maliyete sahip olan parçalar bütününe verilen isimdir. Parça ailesinin tanımı, üretim için neredeyse tüm imalat sistemi kaynaklarının kullanılmasını kapsar. Özelleştirilmiş esneklik kavramı ise, dominant olan parça ailesi özelliklerinin üretilmesinin tezgâh ve sistem konfigürasyonlarını belirlemesini sağlar.

*Ölçeklenebilirlik*; sistem kapasitesinin ölçeklenebilirliği, dönüştürülebilirlik karakteristiğine eşdeğerdir. Ölçeklenebilirlik verimliliği artırmak için tezgâhlara ek işleme kafası ya da artan taleplere istinaden tüm sistem kapasitesini genişletmek için sisteme ek tezgâh eklemeyi de gerektirebilir.

*Dönüştürülebilirlik*; sistem dönüştürülebilirlik kavramının birkaç seviyesi vardır. Tezgâh seviyesinde parça ailesi arasındaki değişimlerde dönüşüm gereklidir. İleri seviye mekanizmalar sensörler, kontrol metotları, hızlı kalibrasyon sayesinde parçalar arası kolay dönüşüm sağlamaya imkân verir.

*Teşhis Edilebilirlik*; iki durumu vardır: tezgâh arızasını saptamak ve kabul edilemez parça kalitesi için kök nedenleri tespit etmek. İkinci durum YÜS için kritiktir. Üretim sistemleri daha fazla yeniden yapılandırılabilir oldukça, düzenleri de sık sık değiştirilir. Yeni yapılandırılan sistemin kaliteli parçalar üretmesi için hızlı bir şekilde ayarlanması gereklidir.

Çizelge 2.2. Çekirdek karakteristik ilişkileri [5]

	<i>Yapılandırma Zamanı</i>	<i>Verimlilik</i>	<i>Yaşam Döngüsü Maliyeti</i>
<i>Modülerlik</i> Parçalar modülerdir	√		
<i>Tümlenebilirlik</i> Hızlı entegrasyon için ara birimler	√		√
<i>Özelleştirilebilirlik</i> Parça aileleri için esneklik limitlidir		√	√
<i>Ölçeklenebilirlik</i> Kapasite değişikliği için tasarlanır		√	√
<i>Dönüştürülebilirlik</i> Fonksiyon değişiklikleri için tasarlanır	√	√	√
<i>Teşhis Edilebilirlik</i> Arıza teşhisi için tasarlanır	√	√	√

Üretim sistemlerindeki değişken olmayan parçaların sayısının artması, maliyeti etkileyen yedek parçalara olan ihtiyacı azaltır. Modüler sistem bileşenlerinin yararları, planlama maliyetlerinin azaltılmasının yanı sıra, yenileme ve dönüştürme maliyetlerinin de azaltılması ve değişiklik sürelerinin kısaltılmasıdır. Uyarlanabilen parçalar da yeniden kullanıldığında maliyeti daha da düşürecektir. Yeniden yapılandırılabilirlik gelecek için anahtar teknolojidir fakat bu konudaki deneyim diğer konulara nazaran daha az olduğundan avantajlarının kanıtlanması kolay değildir. Pazar ise esneklik konusunda farklılıklar gösterdiğinden, bu konudaki farklılıklar da önem arz etmektedir.

Esnek üretim sistemleri, aynı kapasite, fonksiyon ve sistem teknolojisi ile talep ve gereksinimlere göre sistem konfigürasyonunu korurken, hızlı bir şekilde sadece üretilen parçayı değiştirebilmektedir. Diğer yandan yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri ise öngörülemeyen ya da planlanmamış talep ve gereksinimlere göre yapı, kapasite, fonksiyon ve teknolojiye ilişkin sistem konfigürasyonunu hızlı bir şekilde yeni duruma göre adapte edebilmektedir. Çizelge 2.3.'te yukarıda anlatılan üretim sistemlerinin tasarlanması için açıklamaları ile metodoloji yöntemleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Havacılıkta montaj sistemleri metodoloji yöntemleri [18]

METOT	GÜÇLÜ YÖNLER	ZAYIF YÖNLER
<u>Aksiyomatik Tasarım</u>	Yaratıcı tasarım için uygundur.	Bağımsız çözüm tasarım süreçlerinin, mevcut çözümler ile birleştirilmesi uygun değildir.
	Tasarım bilimsel temellere dayanır.	Sistematik çözüm tasarım prosesi, mevcut çözümlerle birleştirilmeye ihtiyaç duyan problemler için uygun değildir.
	Gereksinimler ile fiziksel çözümler arasında bağlantı kurar.	Fiziksel çözümün nasıl entegre edileceğini belirtmez
	Tasarım prosesi sistemde bağımlılıkları vurgular.	-
X için Tasarım Metodu	Genel tasarım prensipleri ile kolayca uygulanabilir	Sistem tasarım metodu değildir. Başka metota destekleyici olarak kullanılmalıdır.

Çizelge 2.3. (devam) Havacılıkta montaj sistemleri metodoloji yöntemleri [18]

<u>Tasarım Yapı</u> <u>Matrisi</u> <u>(TYM)</u>	Sistemdeki bağımlı ve bağımsız ilişki durumunu gösterir.	Elementler gereksinimlere göre izlenebilir değildir.
	Tasarım ve yönetim için kullanışlıdır.	Yaratıcı tasarım için uygun değildir. İnovasyon için kullanılması zordur.
	Sistem içindeki elementlerin etkileşimleri gösterir ve değişiklikleri görselleştirir.	Konsept tasarım için değil mevcut ürünler için kullanılır
	Birçok senaryoya kolayca adapte edilebilir, uygulanabilir	-
Kalite Fonksiyon Yayılımı (KFY)	Müşteri odaklı süreç- tasarım müşteri ihtiyaçlarının analizinden türetilir.	Odak noktası kalitedir. Maliyet, strateji, ürün yaşam döngüsü ve yeni teknolojiler ile limitli şekilde ilgilenir.
	Tasarım sürecini en aza indirir.	Müşteri gereksinimlerinin değişmeyeceğini varsayar.
Ürün, Süreç, Sistem (ÜSS)	İmalat sisteminin temsili için resmi bir yaklaşımdır.	Yaratıcı tasarım için uygun değildir. Başka metotlara ihtiyaç duyar.
Çok Kriterli Karar Verme Metotları	Yüksek seviyede karar verme analizleri için iyidir.	Detaylı teknik çözümler için uygun değildir.
	Niteliksel ve niceliksel veriler kullanır.	-
	Eksik verileri de kullanır.	-
Keşifsel Yaklaşım	Bilgi ve tecrübe ihtiyacı yüksektir, genellikle kusursuz bilgiye ihtiyaç duyar.	Çok karmaşık problemler ile ilgilenmesi zordur. İzlenebilirlik kontrol edilemeyebilir.
	Analitik metot olmadığına kullanışlıdır.	Tasarımcının bilgi ve tecrübesine bağımlıdır.
	Diğer metotlara göre daha zaman kazandırıcı	Çözümün garantisi yoktur. Çözüm nesnel değil öznel olabilir.
Taguchi Metodu	Özellikle kalite kontrolde, teknik parametreleri optimize etmek için kullanılan istatistiksel bir metottur.	Tasarım etkileşimlerini açıklamaz.
	Mevcut proselere uygulanabilir.	Sistem tasarım entegrasyonunu desteklemeye uygun değildir.
	-	Mevcut çözümleri geliştirmek ve kontrol etmek için daha uygundur.

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Havacılık endüstrisindeki literatür araştırması, üretim ve montaj sistemlerinde aksiyomatik tasarım, simülasyon, fikstürler ve robotik olmak üzere aşağıdaki gibi dört ana başlık altında incelenmiştir.

#### 3.1. Üretim ve Montaj Sistemleri için Aksiyomatik Tasarım

Aksiyomatik Tasarım (AT) teorisi ve prensipleri ilk kez Massachusetts Institute of Technology (MIT), Makine Mühendisliği Profesörü Nam Pyo Suh tarafından tanıtılmıştır [19]. Ayrıca Suh, AT metodolojisini kullanarak kavramsal tanımlama, sınıflandırma ve sistem tasarımı yaklaşımını sağlamıştır [20]. Suh, Cochran ve Paulo, yalın prensiplerle, AT tabanlı hat içindeki ideal üretim sistemini geliştirmişlerdir [21].

MIT'den Reynal ve Cochran [22] yaptıkları çalışmada üretim sistemi tasarım hedeflerini, operasyon tasarım parametreleriyle ilişkilendiren bir AT metodolojisi geliştirmişlerdir. Metodoloji ile aynı zamanda katma değeri olmayan işlemleri ve israfları da elimine ederek üretim operasyonlarının tasarımına odaklanmıştır. Bu metodoloji iç ve dış müşteri gereksinimlerini de dikkate almış, iki farklı imalat firmasının montaj alanlarında kullanılmak ve imalat hücrelerinin verimliliğini artırmak için kullanılmıştır. Tasarım aksiyomları ve geliştirilen ayrıştırılmış prosesler ile mevcut ve yeni imalat sistemi prosesleri analiz edilmiştir. Birinci imalat firmasında, stoklar azaltılmış, detay parçaların işlem süresi %50 oranında azaltılmış, montaj süresi %60 oranında azaltılmış, imalat alanından %40 oranında kazanç sağlanmış ve daha kaliteli bir son ürün üretilmesi sağlanmıştır. İkinci imalat firmasında ise, imalat alanındaki darboğazlar çözülmüş, bazı montaj aparatları yeniden tasarlanarak yükleme işlemlerinden parça başına 30 saniye kazanılmıştır. Bazı hücrelerde tek parça akışlı sistem entegre edilmiş, bazı hücrelerde U şekli düzenine geçilmiştir. Parça başına işlem süresi %80 oranında azaltılmıştır. Daha önce hedeflenen ve ulaşılamayan günlük 400 adet parça üretimi hedefine de ulaşılmıştır.

Jefferson, Benardos ve Ratchev [18] yaptıkları çalışmada Airbus firmasında tasarım karmaşıklığını çözümlmek için özgün yeniden yapılandırılabilir montaj sistem tasarım metodolojisi geliştirmişlerdir. Bu metodolojide yeniden yapılandırılabilirlik prensipleri ile birleştirilen aksiyomatik tasarım ve tasarım yapı matrisleri kullanılarak bütünsel ve

hiyerarşik bir yaklaşım izlenmiştir. Sistemin ölçeklenebilir ve esnek olması hedeflenmiş, metodolojinin yeniden yapılandırılabilirlik gereksinimlerinin sistem içine nasıl entegre edildiğini göstermek için yolcu uçağı kanat montajı örnek çalışması kullanılmıştır. Çalışma sonucunda kanat montajı için yeniden yapılandırılabilir montaj hücre tasarımıyla üretim adeti aylık 40'tan 100'e artırılmıştır.

Reichenbach [23] montaj proseslerini aksiyomatik tasarım ile temel fonksiyonlarına ayırtmış ve tasarım parametreleri ile montaj sisteminin teknik kabiliyetlerini tespit etmiştir. Foith-Förster ve Bauernhansl [24] aksiyomatik tasarım yöntemini pratik bir uygulama olarak değiştirilebilir montaj sistemleri tasarımında kullanmıştır. Montaj proseslerinin ve parçalarının karakteristikleri en üst FR düzeyi olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım ile birlikte proses modülleri tanımlanmış ve montaj planına entegre edilmiş, üretimin montaj otomasyon derecesini artırmışlardır.

Kulak, Durmuşoğlu ve Tüfekçi [25] yaptıkları çalışmada AT prensiplerine dayanan etkin bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu metodoloji proses tabanlı imalat sistemini, hücreli imalat sistemine dönüştürmek için kullanılmıştır. Aksiyometrik tasarım yoluyla, hücreli imalat sistemi için fonksiyonel gereksinim tasarım parametresi (FR-DP) oluşturulmuş, FR-DP'ye karşılık gelen tasarım matrisleri hazırlanmıştır. Geliştirilen metodoloji, konvansiyonel imalat yapan bir firmada örnek çalışma yapılarak uygulanmıştır. Parçaların taşınma, hareket etme mesafesi yeni tasarımla, %54'lük bir iyileştirme ile 67 metreden 31 metreye düşürülmüştür. Teslimat süresi %60'luk bir iyileştirme ile 18 günden 7 güne düşürülmüş, parçaların işlem zamanı %58 azaltılmıştır. En büyük iyileştirme ise %80'lik bir azaltma ile fazla mesai zamanlarında olmuştur.

Birçok aksiyomatik ürün, sistem, organizasyon ve yazılım tasarımları literatürde son on yılda gerçekleşmiştir. Tüm araştırmalar ikna edici bir şekilde, AT metodolojisinin yararlarını ve endüstri problemlerinin çözümünde uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

### **3.2. Üretim ve Montaj Sistemleri için Simülasyon**

Literatürde uçak gövde paneli montaj sistemi tasarımı simülasyonları ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Çalışmalar genellikle uçak kanatları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu nedenle

havacılık endüstrisinde uçak gövde panelleri montaj sistemi simülasyonu çalışmamız özgündür.

Caggiano ve arkadaşları [26] montaj sistemleri tasarım metotlarını verimli bir montaj hattı tasarlamak amacıyla hafif bir uçağın montaj hattına uygulamışlardır. Montaj hattı performansı montaj proseslerinin sıralamasıyla optimize edilmiştir. Farklı montaj hattı kurguları oluşturulmuş ve bu hatların simülasyonları yapılmıştır. İteratif simulasyon proseslerinden sonra, simülasyon sonuçları üretimi artırmak için nelerin yapılması ve değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Daha sonra hat dengeleme gibi optimizasyon metodolojileri montaj hattına uygulanmış, son montaj hattı konfigürasyonunun verimliliği yıllık uçak üretiminde %78,51'e yükseltilecek artırılmıştır.

Diaz ve arkadaşları [27] uçak montaj sistemlerinin verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Uçak montajı sürelerini azaltmak için otomasyon uygulamaları ile yeni çözümler önermişlerdir. Simülasyonlar yapılmış, geliştirilen metotlar uçak kanatlarının montaj sistemine uygulanmıştır. Sonuç olarak üretim sürelerini %20 kısaltma ile birlikte maliyeti %67 azaltmışlardır.

Bakker ve arkadaşları [28] uçak kanatlarının montaj sistemleri için varyasyon analizleri ile yeni jenerik bir metodoloji sunmuşlardır. Basitleştirilmiş örnek bir çalışma uçak kanat kutusu montajı için yapılmıştır. Montaj prosesleri modellenmiş ve simüle edilmiştir. Simülasyon modeli ile uçak kanadı montaj proseslerinin temel özellikleri öngörülebilmiştir. Simülasyon sonuçları hataların minimize edilmesi ve montaj proseslerinin kontrolü için analiz edilmiştir.

Pagone [29] bir uçağın üretim hattını modellemiş, simüle etmiş ve farklı üretim proses senaryoları ile analiz etmiştir. Her uçak üretim senaryosu için örnek çalışmalar yapılmıştır. Üretim hattına ilk giren ilk çıkar prensibi ile en kısa proses süresi araştırılmıştır. Üretim hattı verimliliğini sağlamak adına en uygun çözümün bulunması amacıyla sistem değerlendirilmiş ve en erken teslimat tarihi belirlenmiştir [29].

Caggiano ve arkadaşları [30] havacılık endüstrisindeki üretim hücrelerinin verimliliğini arttırmak amacıyla fabrikaya dijital fabrika metodolojileri uygulamışlardır. Çalışmalarında üretim hücrelerinin simülasyonları ile üretim süreleri ve performansları araştırılmıştır.

Sistem tasarımı için farklı alternatifler kurgulanmış ve simule edilmiştir. Simulasyon sonuçlarına dayanılarak üretim hücreleri endüstriyel robot, otomatik taşıma sistemleri ve otomatik muayene sistemleri ile geliştirilmiştir. Üretim sisteminin geliştirilmesi ile birlikte yıllık üretim hacmi %42 artış göstermiştir.

### 3.3. Üretim ve Montaj Sistemleri için Fikstürler

Literatürün temelinde, havacılıktaki üretim ve montaj proseslerinde yeniden yapılandırılabilir, modüler fikstür sistemlerinin geliştirilmesi süre, fikstür maliyeti ve montaj proseslerindeki değişkenlikleri azaltmaktadır. Yeniden yapılandırılabilir ve modüler fikstür tasarım stratejisi kaynak prosesleri içermeyen yöntemlere dayanır. Bu sayede fikstürler değiştirilebilir ve ihtiyaç durumunda yeniden kullanılabilir.

Millar ve Kihlman [31] Airbus firmasında havacılık endüstrisinin ilk modüler çelik fikstürünü tasarlamışlardır. Proje “Reconfigurable Flexible Tooling (ReFlex)” yani “Yeniden Yapılandırılabilir Esnek Takım” olarak adlandırılmıştır. Konstrüksiyon sistemi olarak M16, 100x100 boyutlarında kutu profil bağlantıları ve mini programlanabilir esnek tutucular tasarlanmış, A380 uçağının kanat bölgesindeki firar kenarı montajında kullanılmıştır.

Helgossan, Ossbahr ve Tomlinson [32] Airbus firmasında uçak parçalarının montaj işlemleri sırasında ayarlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir “Affordable Reconfigurable Tooling (ART)” adı verilen bir fikstür geliştirmişlerdir. Bu konseptteki temel prensip uçak parçalarının tutulmasını sağlayan desteklerin ayarlanabilir olması ve harici bir ölçüm sisteminin yönlendirilmesiyle CAD tanımlı konumlara pozisyonlanmasıdır.

Jayaweera ve Subasinghe [33] “Prime Fixturing” adı verilen yeniden yapılandırılabilir fikstür sistemi geliştirmişlerdir. Fikstür sistemi kaynak prosesleri olmadan alüminyum ve çelik boru şeklindeki yapıların birbirlerine bağlantısını sağlamaktadır. Böylece farklı uygulamalar için fikstür tasarlamının ve üretmenin kolay bir yolu elde edilmiştir. Örnek uygulamada uçaklarda kullanılan motor blokları ve yağ haznelerinin üretimi için kullanılan fikstürler tasarlanıp üretilmiştir.

Zhang ve arkadaşları [34] “Agile Joint Jig (AJJ)” adı verilen, çerçeve yapı, sabitleyiciler ve yardımcı parçalar olmak üzere üç ana komponentten oluşan yeniden yapılandırılabilir fikstürler geliştirmişlerdir. Modüler yapılar, çelik kirişler, hızlı değiştirilebilir eklemler ve uyarlanabilir civatalar aracılığıyla birleştirilmekte ve kaynak kullanılmamaktadır. AJJ yeni parçalara göre hızlı bir şekilde adapte olmakta ve yeniden kullanılmaktadır. Örnek çalışma ile AJJ uçaklardaki dikey dengeleyicilerin montaj proseslerinin fikstürlerinde kullanılmış ve sonuçlar bu fikstürün avantajlarını göstermiştir.

Mueller ve Vette [35] havacılık endüstrisindeki büyük uçak parçaları için maliyeti düşük, yalın, esnek ve verimli modüler montaj fikstürleri geliştirmişlerdir. Fikstürler kinematik üniteleri entegre edebilen, değiştirebilen, çeşitli montaj görevlerine ve ürün tiplerine son derece uyarlanabilir bir yapıya sahiptir. Operatörler uçak parçalarında manuel montaj işlemlerini yaparken fikstürlerin ergonomik olması da tasarım kriterlerinde önemli rol oynamıştır.

Kihlman ve Engstrom [36] yaptıkları çalışmada CATIA kullanarak 35 programlanabilir tutucu ayak ve kutu profil bağlantı kitleri ile modüler fikstürlerin tasarımını ve üretimini gerçekleştirmişlerdir. İki boyutlu teknik resim kullanımı elimine edilmiş, veriler Delmia ürün yaşam döngüsü sistemine entegre edilmiştir. Fikstürün toplam kurulum süresi 24 dakikadır. Modüler fikstürler SAAB şirketinde Neuron askeri insansız hava aracının üretimi için endüstriyel çözüm olarak kullanılmıştır.

### **3.3. Üretim ve Montaj Sistemleri için Robotik**

Atkinson ve arkadaşları [37] Boeing firmasında B737 yolcu uçaklarının üretimini artırmak için montaj hatlarında yenilikçi yaklaşımlar kullanarak montaj hatlarını esnek robotik delme sistemleri ile geliştirmişlerdir. Montaj hatlarına B737 uçağının kanatçıklarının delinmesi için KUKA robotlarını entegre etmişlerdir.

Boeing firması B777 ve B777X, B787 yolcu uçaklarının kuyruk kısmındaki yapıların [38] ve kanatlarındaki firar kenarı yapılarının [39] ve uçaktaki diğer kontrol yüzeylerinin [40], Spirit Aerosystems firması ise yolcu uçaklarının motorunu muhafaza eden “Nacelle” adı verilen kapakların [41] montajı için uç işlevcisini ve sistemini Electroimpact firmasının geliştirdiği KUKA robotlarını montaj sistemlerine entegre etmişlerdir.

Everhart [42] Boeing firmasında B787 yolcu uçağının gövde kısımlarının montajı için Electroimpact firması tarafından üretilen ve “The Quadbots” olarak adlandırılan bir robotik montaj hücresi entegre etmiştir. Bu robot hücresinde uçak gövdesinin sağ tarafında iki, sol tarafında iki olmak üzere dört adet özdeş, eş zamanlı çalışabilen mobil robot bulunmaktadır. Bu mobil robotların esnekliği, üç farklı B787 gövdesinin montajının yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Bu robotlar verimliliği ve kaliteyi artırmıştır.

Cibiel ve Prat [43] Airbus UK firmasında A320 yolcu uçağının artan taleplerini karşılamak amacıyla kanat montajı için Alema Automation firması iş birliğiyle 22 metre uzunluğunda, seri olarak çalışan üç adet KUKA delik delme robotu ile bir kanat montaj hattı kurmuştur.

Mehlenhoff ve Bloedorn [44] Broetje Automation firmasında alüminyum ve kompozit malzemelerden üretilen farklı yolcu uçağı yapılarının montajı için “RACe” adı verilen yenilikçi bir robotik montaj hücresi geliştirmiştir. Havacılık endüstrisinde oldukça esnek ve düşük maliyetli bu montaj robot hücresi otomatik delik delme sistemiyle ihtiyaç duyulan otomasyon gereksinimlerini karşılamıştır.

Mehlenhoff ve Vogl [45] Eurocopter firmasında tek koridorlu yolcu uçaklarının kargo kapılarının montajı için robot montaj hücreleri kurarak bu montaj hücrelerine Broetje Automation firmasının geliştirdiği KUKA robotlarını entegre etmiştir. Bu entegrasyon ile manuel tabanlı bir montaj sürecini tam otomatik bir otomasyon sürecine dönüştürmüştür.

Üretim ve montaj sistemlerinde aksiyomatik tasarım, simülasyon, fikstürler ve robotik olmak üzere dört ana başlık altında incelenen literatürde uçak gövde paneli montaj sistemi tasarımı ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmalar genellikle uçak kanatları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tezin literatürden farkı ve yeniliği, havacılık endüstrisinde ilk kez gövde yapılarının montajı için sistematik, metodolojik ve kapsamlı bir montaj sistemi tasarımı geliştirilmesidir. Tasarım metodolojisinin çerçevesi sistem tasarım metotları, akademik araştırmalar, endüstri gereksinimleri ve endüstriyel örnek çalışmalar temelinde şekillendirilmiştir. Bütünsel ve hiyerarşik bir tasarım sistemi yaklaşımı sergilenmiştir. Bu bağlamda yapılan tez çalışması özgündür.

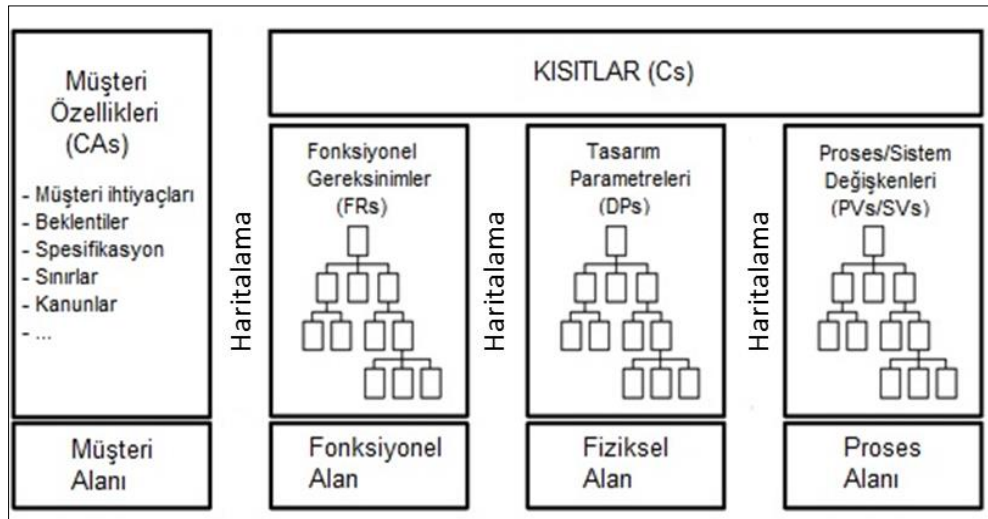
## 4. METODOLOJİ

### 4.1. Aksiyomatik Tasarım Teorisi

Aksiyomatik tasarım, sistem tasarımı için kendini kanıtlamış sistematik ve bilimsel bir yöntemdir. Rastgele araştırma süresinin azaltılması, hatalı ve tekrarlı süreçlerin minimize edilmesi ve tüm alternatifler arasından en iyi tasarımın belirlenmesi amacıyla karmaşık montaj sistemleri tasarımında kullanılır [46].

Sistematik karakteristiği ve tümden gelim yaklaşımı sayesinde karmaşık mühendislik problemlerini daha küçük parçalara ayırarak, yönetilebilir bir şekilde yapılandırmaya olanak sağlar [47]. Müşteri gereksinimlerini, fonksiyonel gereksinimlere, tasarım parametrelerine ve proses değişkenlerine dönüştüren, tasarım problemlerini etkin ve sistematik bir biçimde çözmeyi amaçlayan, matris metodlarını kullanan bir tasarım aracıdır.

Tüm tasarım prosedürleri Şekil 4.1.'deki gibi dört alan içinde gösterilebilir. Soldaki alan, sağdaki alana göre “Neyi gerçekleştirmek istiyoruz?” sorusuna çözüm ararken, sağdaki alan “Soldaki alanda belirtilen gereksinimleri nasıl gerçekleştirebiliriz?” sorusuyla soldaki alanla etkileşimli olarak tasarım çözümleri bulmayı hedefler.



Şekil 4.1. Aksiyomatik tasarımın dört temel yapıtaşı [48]

Müşteri alanı, müşterinin bir ürün, proses, sistem ve diğer tasarım nesnelerinde aradığı müşteri özellikleri ile karakterize edilir. Fonksiyonel alanda, müşteri özellikleri fonksiyonel

gereksinimler (FRs) ve kısıtlamalar (Cs) açısından ifade edilir. Fonksiyonel gereksinimler, tasarımın asıl amaç ve hedeflerini temsil eder. Tasarım parametreleri (DPs) ise, fonksiyonel gereksinimlerin nasıl gerçekleştirileceğini ifade eder. Son olarak, tasarım parametreleri tarafından belirlenen tasarım çözümünün gerçekleştirilmesi için, sistem değişkenleri (SVs) proses alanında belirtilir [48].

Alanlar arasındaki haritalama tasarım bağıntısı ile temsil edilir. Örneğin fonksiyonel alandan fiziksel alana geçişte aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\{FR\}=[A]\{DP\} \quad (4.1)$$

Eşitlik matris formunda açılırsa, FR fonksiyonel gereksinim, DP ise tasarım parametresidir. A ise tasarım matrisidir. Her bir satırdaki bağıntı aşağıdaki matris eşitliği ile ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ FR_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \cdot \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \cdot \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \cdot \\ \dots & \dots & \dots & A_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ DP_n \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

[B] matrisi de [A] ile benzer şekilde tasarım matrisidir ve proses tasarımlarının karakteristiklerini temsil eder.

$$\{DPs\}=[B]\{PV\}s \quad (4.3)$$

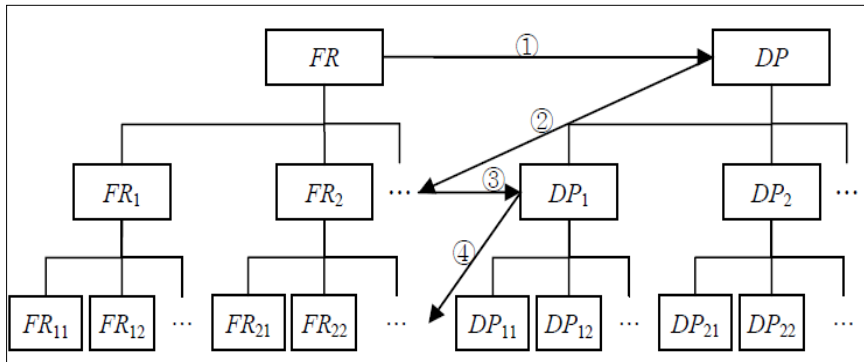
Eşitlik 4.1'de {FR}, fonksiyonel gereksinim vektörü, {DP} tasarım parametre vektörü ve [A] tasarım matrisidir. Buna göre tasarım matrisindeki (A<sub>ij</sub>) her bir element, j. tasarım parametre değerinin değişmesi nedeniyle, i. fonksiyonel gereksinimdeki değişimleri temsil eder. Bu ideal koşullardaki teorik tasarım matrisi formülasyonudur. Her (A<sub>ij</sub>) terimi için özel bir değer var olması beklenmez. Formülasyon sayısal değerler değil de sembollerle analiz edildiğinde bile tasarım problemlerine getirdiği öngörüler sayesinde güçlüdür. Aksiyomatik tasarım, eşitliğin herhangi birinin değerleri için çözülebilmemesini gerektirmez.

$$FR_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} DP_j$$

$$FR_i = A_{i1} DP_1 + A_{i2} DP_2 + \dots + A_{i(n-1)} DP_{(n-1)} + A_{in} DP_n \quad (4.4)$$

Şekil 4.1.'de bahsedilen her bir haritalama adımı özgün ve tek değildir. Gerçekleştirilme biçimine bağlı olarak, iyi tasarıma ya da kötü tasarıma yol açabilir. Fiziksel alanda bir tasarım parametresi üretilmeden ve çözüm bulunmadan, fonksiyonel gereksinimlerin alt kısımlara ayrıştırılması yapılamaz çünkü bir tasarım parametresi alt seviyedeki fonksiyonel gereksinimin kısıtıdır. Şekil 4.2.'de gösterilen alanlar arası çapraz tasarım ayrışımında izlenecek prosesler aşağıdaki gibidir [49].

- Müşteri ihtiyaçlarının tespit edilmesi
- FR ve DP geliştirilmesi ve müşteri talepleri ile uyumlu olması
- En üst seviye FR belirlenmesi
- En üst seviye FR için karşılık gelen DP belirlenmesi
- Aksiyom 1, aksiyom 2 ve kısıtlara göre FR ve DP' lerin kontrol edilmesi
- Aksiyomlarla uyumlu alternatiflerin tasarlanması ve modifiye edilmesi
- Alt seviye ayrışımın yapılarak yukarıdaki adımlarla uyumluluğunun sağlanması
- Çözüm bulunana kadar işlemlerin tekrar edilmesidir.



Şekil 4.2. Alanlar arası çapraz tasarım ayrışımı [49]

Aksiyomatik tasarıma göre, iyi bir tasarım, bağımsızlık ve bilgi aksiyomuna uymak zorundadır. Aksiyomlarla tasarım yönteminin temel amacı, tasarımlar için bilimsel bir temel oluşturmak ve tasarımcıyı, mantıklı düşünce süreçleri ve araçları ile destekleyerek tasarım faaliyetlerini geliştirmektir. Aksiyomlarla tasarım içinde en önemli kavram tasarım

aksiyonlarının varlığıdır. İki tasarım aksiyomu ürün tasarımlarını oluşturmak ve kurulan çözüm alternatiflerinden en iyisini seçmek için oransal bir temel sağlar. Metodu oluşturan iki temel aksiyom aşağıdaki gibidir:

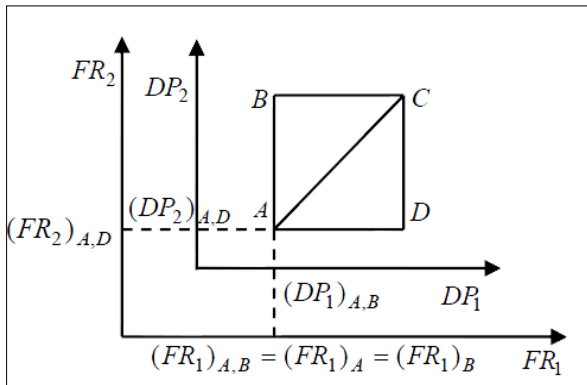
Aksiyom 1: Bağımsızlık aksiyomu

Aksiyom 2: Bilgi aksiyomu

Bağımsızlık aksiyomu; fonksiyonel ihtiyaçların bağımsızlığını devam ettirmektir. Kabul edilebilir bir tasarımda, bir tasarım parametresi (DP), diğer fonksiyonel ihtiyaçları (FR). Bağımsızlık aksiyomu ile ilgili olarak ayırık, ayrıştırılmış ve bağlaşıklık olmak üzere sistemlerin üç farklı temel tasarım çeşidi vardır. İdeal olarak, kare matris için tasarım eşitliğindeki DPs sayısı, FRs sayısına eşit olmalıdır. En iyi tasarımlar, eşitlik matrisi diyagonal olan ayırık matrislerdir. Eğer eşitlik matrisi, üçgensel matris ise, tasarım ayrıştırılmıştır ve hala kabul edilebilir. Diğer konfigürasyonlar istenen bir tasarım değildir. Karmaşık prosedürler içerir ve çözülmesi oldukça zordur.

*Ayrık Tasarım:* Eşitlik 4.5 ve Şekil 4.3.'te gösterildiği üzere her bir tasarım parametresi, bir fonksiyonel gereksinim tarafından istenen performans seviyesini elde etmek için doğrudan ayarlanabilir.

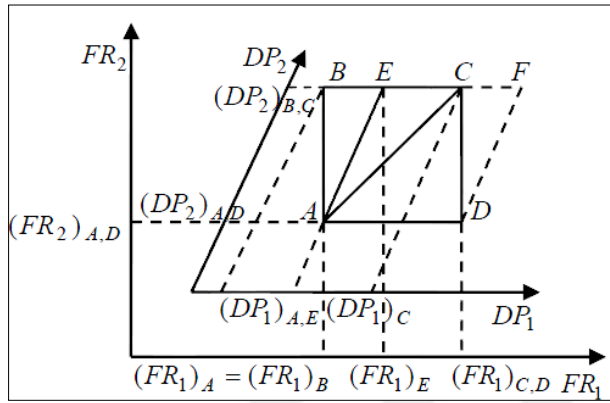
$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$



Şekil 4.3. Ayrık tasarım [19]

*Ayrıştırılmış Tasarım:* Eşitlik 4.6 ve Şekil 4.4.'te gösterildiği üzere her bir fonksiyonel gereksinimin ayrı ayrı düşünülmesi için, tasarım parametrelerinde değer belirleme süreci mümkündür. Yine de tasarım parametresindeki herhangi bir değişiklik için tüm tasarımın yeniden gözden geçirilmesini gerektirir.

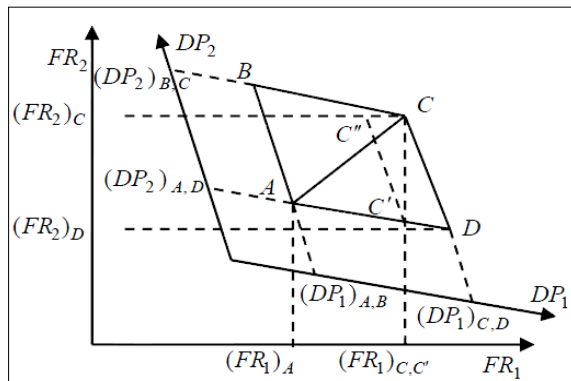
$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$



Şekil 4.4. Ayrıştırılmış tasarım [19]

*Bağlaşık Tasarım:* Eşitlik 4.7 ve Şekil 4.5.'te gösterildiği üzere tasarımdaki bütün fonksiyonel gereksinimlerin nasıl etkilendiğini hesaba katmadan, hiçbir tasarım parametresi ayarlanamaz.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

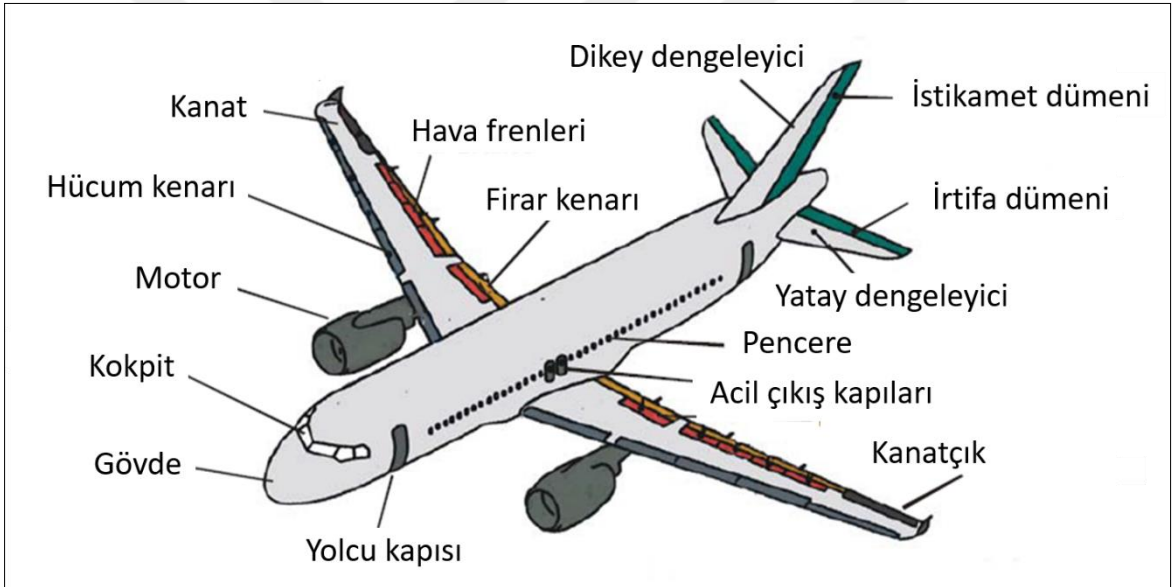


Şekil 4.5. Bağlaşık tasarım [19]

Bilgi aksiyomu; bilgi içeriğini minimize etmektir. Alternatif tasarımlardan, bağımsızlık aksiyomunu sağlayan en iyi tasarım minimum bilgi içeriğine sahiptir. İkinci aksiyom tasarım seçimlerinde ikinci kural olarak düşünülür. Başarılı olma ihtimali düşük olan tasarımlar, en çok bilgi içeren ve en karmaşık tasarımlardır. Dolayısı ile fonksiyonel olarak en iyi tasarım, minimum bilgi içeriğine sahip olan ayrık tasarımlardır.

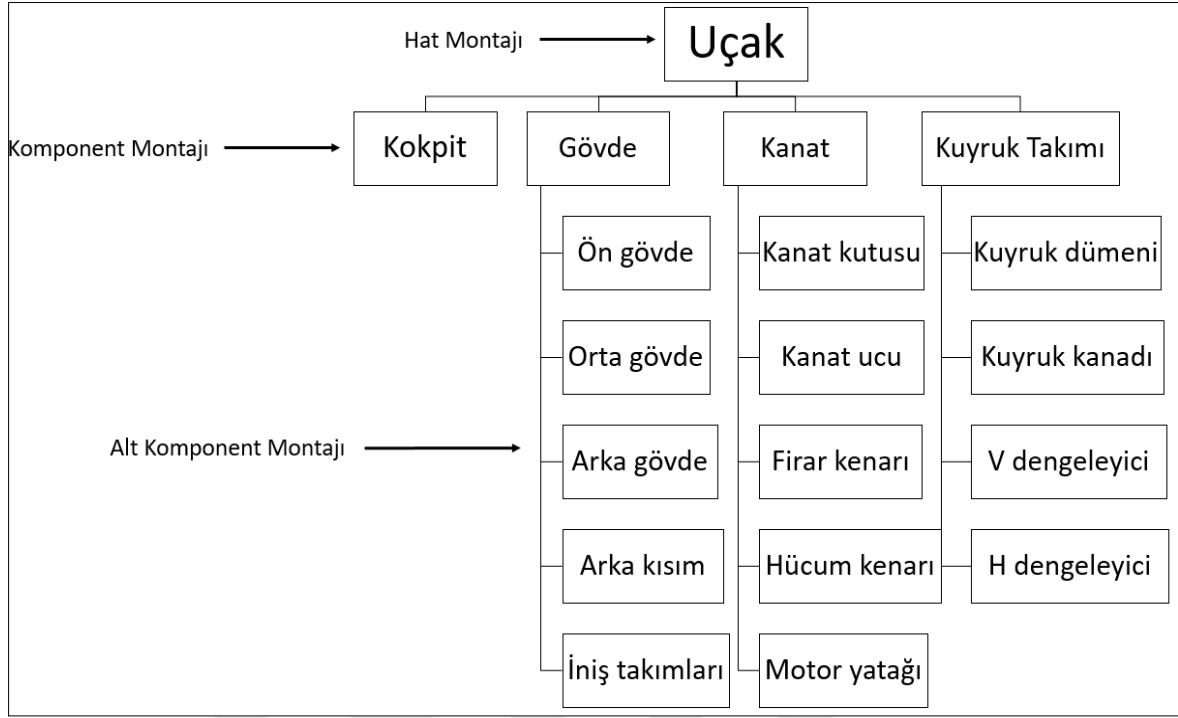
#### 4.2. Temel Uçak Yapıları

Üretimi oldukça zorlu bir iş olan uçakların ortalama kırk yıl ömrü olması beklenir. Yüksek hızlarda ve yüksekliklerde uçaklar yük, sürtünme, titreşim ve basınca maruz kalmaktadır. Tipik bir yolcu uçağının temel yapıları Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Temel uçak yapıları [50]

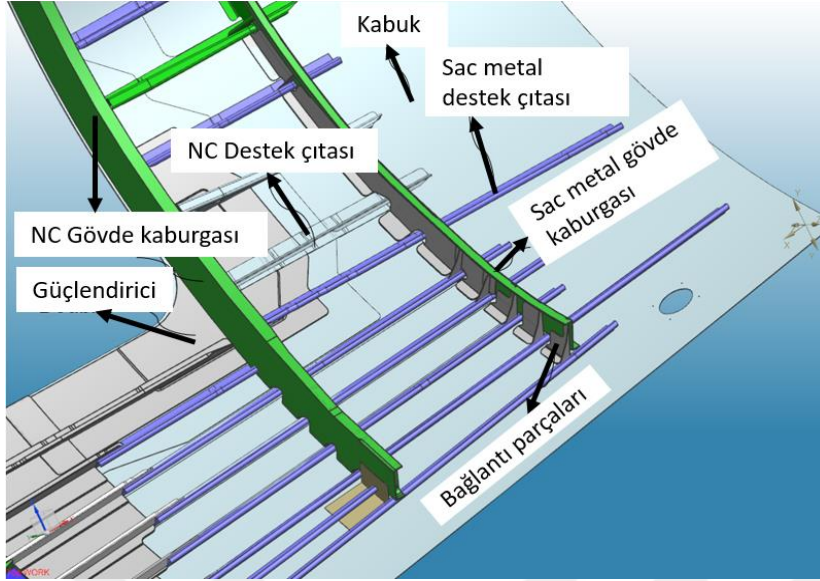
Havacılıkta montaj sistemleri, gövde, kanat, kuyruk takımı, iniş takımı gibi temel uçak yapılarını birleştirir. Uçakların, maruz kaldığı yüklere dayanabilmesi için hatasız, yüksek kaliteli bir montaj prosesi gereklidir. Şekil 4.7.'de bir uçak montajının taksonomisi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Uçak montajının taksonomisi [51]

Tezde uçakların gövdelerini oluşturan paneller konusunda çalışılmaktadır. Gövde bir uçağın ana yapısıdır. 10000 fit üzerinde uçan yolcu uçaklarında, gövdeler normal bir uçuştaki 8000 fit kabin yüksekliğinin korunabilmesi için bir basınç gövdesi görevi yapar. Gövdeler, motor, yolcular, kargo ve diğer ekipmanlar için yer sağlar. İki motorlu uçaklarda, motorlar gövdeye veya kanat yapısına bağlı olabilir. Uçaklarda kanatlar, kuyruk takımı, iniş takımları gibi diğer ana parçalar da gövdeye monte edilir [19].

Uçak gövde paneli yapıları ise Şekil 4.8.'de gösterildiği üzere temel olarak kabuk, destek çitası, gövde yapı kaburgası, toka ve diğer destek parçalarından oluşur.



Şekil 4.8. Yolcu uçağı gövde panelinin temel elemanları

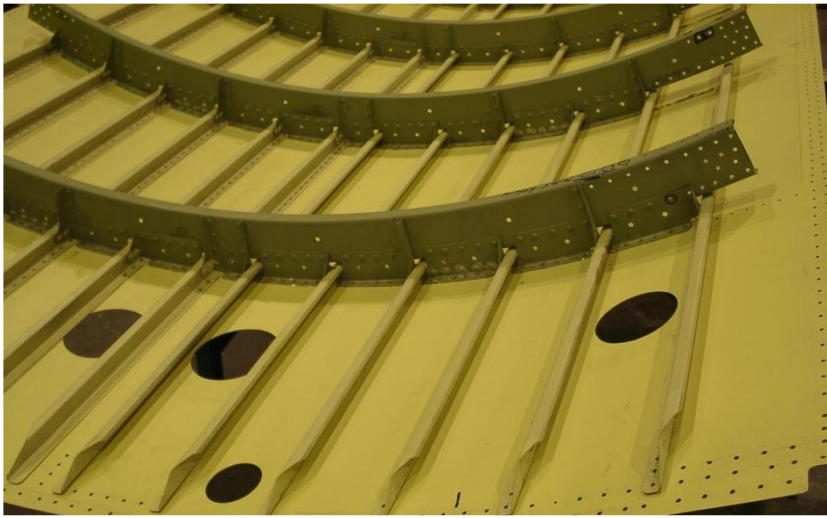
*Kabuklar*; yani gövde yüzeyleri gövdenin dış şeklini meydana getirir. Gövde sacı ve güçlendirme yapıları, gövdenin en uzun birimleridir. Destek ıtaları ve gövde kaburgalarının düzgün aralıklarla dizildiği gibi yapıyı sarar ve aynı zamanda ana yükleri taşır. Ayrıca gövde kesitini oluşturur. Gövde yüzeyi yapı üzerindeki burulma ve buruşmayı önlemeye yardım eden bir yapıdır. Kaplanmış alüminyum, kromik asit ile anotlanarak işlem görmüş alüminyum veya korozyonu önlemek için işlem görmüş alüminyumdan üretilir.

*Gövde kaburgaları* gövdenin şeklini oluşturan ana yapı elemanlarındadır. Destek ıtalarının boylarının kısa tutulmasını sağlar. Gövde yapısı üzerinde oluşan kesme ve çekme yüklerini taşırlar. Yapısal dengesizliği önlerler.

*Destek ıtaları* gövde kaburga yapı elemanlarını birbirine ve gövde sacına bağlayan elemanlardır. Gövde iskelet yapısının ana şeklini oluşturur. Uçak gövde sacının i tarafına yerleştirilmiştir. Gövde yapısında oluşan eğilme, kesme, kabin basıncından dolayı oluşan yükleri taşımak için tasarlanmış yapı elemanıdır. Destek ıtaları birbirlerine bağlanırlar. Gövde kaburgalarının içinden geçerek perçinler ile birleştirilirler. Amaçları basınç yükünü gövde sacından gövde kaburgalarına aktarmaktır. Aynı zamanda basma gerilmelerini gövde kaburgalarının taşımada yardımcı olur.

*Türkçe karşılığı toka olan clipsler*, destek çıtaları ile kabukları birleştiren ara yapı elemanlarıdır. *Kiriş* adı verilen parçalar da gövde kaburgaları gibidir. Gövde yapısında oluşan yükleri taşırlar [52].

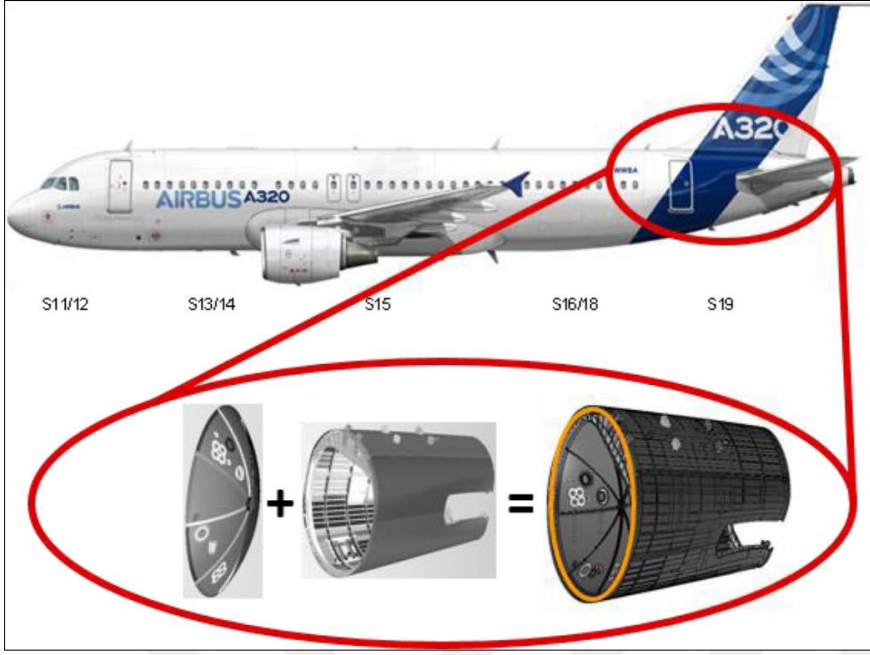
Genel özellikleri açıklanan temel yapıların montajı yapılarak Şekil 4.9.'daki gövde panelleri üretilir. Tezde çalışılan ve uygulama alanı olan uçak gövde panelleri alt, alt sol, alt sağ, üst, üst sol ve üst sağ panelleridir. Altı farklı gövde panelinin montajı yapılarak uçağın gövdeleri üretilir.



Şekil 4.9. Yolcu uçağı gövde paneli

### 4.3. Aksiyomatik Prensipler ile Montaj Sistemi Tasarımı

Bu bölümde aksiyomatik tasarım prensipleri kullanılarak geliştirilecek metodoloji ile tasarlanan yeni sistem bir örnek çalışma ile desteklenecektir. Türkiye’de havacılıktaki artan müşteri taleplerini karşılayabilmek için Şekil 4.10.’da gösterilen Airbus’ın en popüler uçağı olan tek koridorlu Airbus A320 uçağının Kısım 19 gövde panelleri montajı programı örnek çalışma olarak seçilmiştir. Airbus ile TUSAŞ-Türk Havacılık Uzay Sanayii arasında imzalanan anlaşmaya göre Kısım 19 gövde panellerinin üretimini TUSAŞ yapacaktır. Programın birinci fazında üretilen paneller Premium Aerotech Ausburgs firmasına gönderilecek, programın ikinci fazında altı panelin birleşiminden oluşan gövdeler RUAG Oberpfaffenhofen firmasına teslim edilecektir. Maksimum üretim adetinin ayda 20 panel olması hedeflenmektedir.



Şekil 4.10. Airbus A320 yolcu uçağı kısım-19 gövdesi [53]

Metodolojinin oluşturulması için öncelikle kısıtların belirlenmesi gerekir. Yolcu uçağı gövde panelleri montajı girdi kısıtları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Gövde üretiminin aylık 5 setten 20 sete çıkarılması
- Tüm kalite gereksinimlerinin karşılanması
- Sertifikalı proseslerin ve malzemelerin kullanılması

Montaj girdi kısıtlarına göre ilk fonksiyonel gereksinimler ve tasarım parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$FR_0$ : Talep Miktarı Kadar Yolcu Uçağı Gövdesi Üret

$DP_0$ : Esnek Gövde Montaj Hücresi

$FR_1$ : Talep Miktarı Kadar Yolcu Uçağı Paneli Üret

$DP_1$ : Esnek ve Ölçeklenebilir Panel Montaj Hücresi

Uçak gövdelerini oluşturan panellerin üretimi için  $FR_0$ - $DP_0$  parametrelerini sağlayan  $FR_1$ - $DP_1$  proses parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Çizelgelerde yeşil renk ile gösterilen maddelerin ayrışımı yapılmıştır.

Çizelge 4.1. FRs-1 ve DPs-1 kompozisyonu

FRs-1	DPs-1
<i>FR<sub>11</sub></i> : Kiriş parçasını fikstüre konumla ve yerleştir.	<i>DP<sub>11</sub></i> : Fikstür sistemi
<i>FR<sub>12</sub></i> : Kabuk, destek çıtası gibi yapısal parçaları geçici bağlayıcılar ile birleştir ve fikstüre girişin üzerine kapat.	<i>DP<sub>12</sub></i> : Esnek panel taşıma sistemi
<i>FR<sub>13</sub></i> : Yapısal ara bağlantı parçalarını koy ve aktarılması gereken tüm delikleri aktar.	<i>DP<sub>13</sub></i> : Otomatik delik delme sistemi
<i>FR<sub>14</sub></i> : Fikstürden indir, parçaları ayır, çapak al, temizle.	<i>DP<sub>14</sub></i> : Ölçeklenebilir manuel çapak alma ve temizleme
<i>FR<sub>15</sub></i> : Sızdırmazlık macununu sürüp parçaları tekrar yerleştir.	<i>DP<sub>15</sub></i> : Ölçeklenebilir manuel macun sürme ve yeniden yerleştirme
<i>FR<sub>16</sub></i> : Geçici bağlayıcılar ile tezgâh öncesi montajı tamamla	<i>DP<sub>16</sub></i> : Ölçeklenebilir yarı otomatik perçinleme sistemi
<i>FR<sub>17</sub></i> : Tezgâha yükle ve panelin kabuk, destek çıtaları ve diğer yapısal elemanların son montajını tamamla.	<i>DP<sub>17</sub></i> : Esnek otomatik perçinleme sistemi
<i>FR<sub>18</sub></i> : Tezgâh sonrası operasyonları tamamla.	<i>DP<sub>18</sub></i> : Ölçeklenebilir manuel tezgâh sonrası operasyonlar

$$\begin{pmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{14} \\ FR_{15} \\ FR_{16} \\ FR_{17} \\ FR_{18} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{14} \\ DP_{15} \\ DP_{16} \\ DP_{17} \\ DP_{18} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

FRs-11 ve DPs-11 kompozisyonu Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. FRs-11 ve DPs-11 kompozisyonu

FRs-11	DPs-11
<i>FR<sub>111</sub></i> : Fikstür için pozisyon kontrolü yap	<i>DP<sub>111</sub></i> : Ölçüm sistemleri
<i>FR<sub>112</sub></i> : Kiriş parçasını fikstüre yükle	<i>DP<sub>112</sub></i> : Manuel operatör
<i>FR<sub>113</sub></i> : Kiriş parçasını fikstüre pozisyonla ve yerleştir	<i>DP<sub>113</sub></i> : Yeniden yapılandırılabilir fikstür çerçevesi
<i>FR<sub>114</sub></i> : Parçaları fikstürden ayır	<i>DP<sub>114</sub></i> : Geri çekilebilir pozisyon

$$\begin{Bmatrix} FR_{111} \\ FR_{112} \\ FR_{113} \\ FR_{114} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{111} \\ DP_{112} \\ DP_{113} \\ DP_{114} \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

#### 4.3.1. Ölçüm sistemleri

FRs-111 ve DPs-111 kompozisyonu Çizelge 4.3.'te gösterilmiştir.

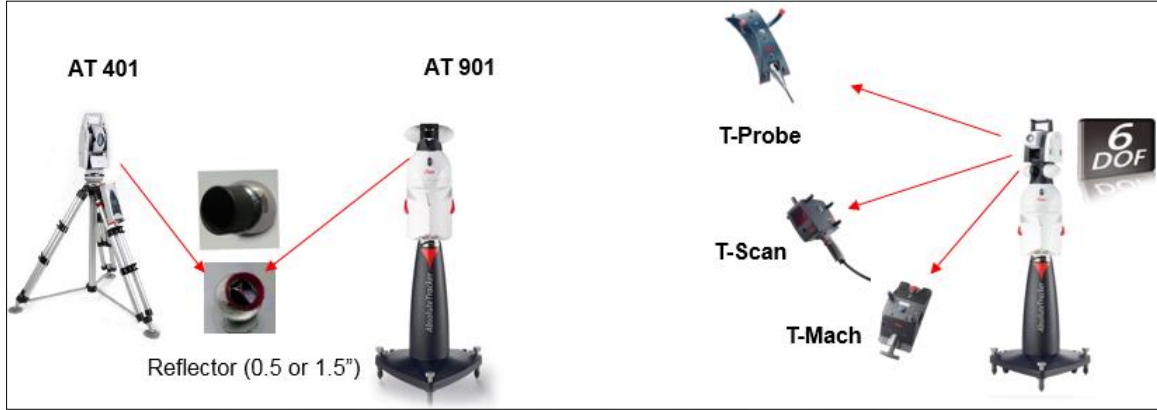
Çizelge 4.3. FRs-111 ve DPs-111 kompozisyonu

FRs-111	DPs-111
<i>FR<sub>1111</sub></i> : Model tabanlı anlık ölç	<i>DP<sub>1111</sub></i> : Tam otomatik lazer izleyici
<i>FR<sub>1112</sub></i> : Panel tabanlı anlık ölç	<i>DP<sub>1112</sub></i> : Lazer radarı
<i>FR<sub>1113</sub></i> : Görüntü tabanlı anlık ölç	<i>DP<sub>1113</sub></i> : Dijital fotogrametri
<i>FR<sub>1114</sub></i> : Manuel anlık ölç	<i>DP<sub>1114</sub></i> : El cihazıyla tarama
<i>FR<sub>1115</sub></i> : Robot destekli anlık ölç	<i>DP<sub>1115</sub></i> : Robotlu ölçüm cihazları

$$\begin{Bmatrix} FR_{1111} \\ FR_{1112} \\ FR_{1113} \\ FR_{1114} \\ FR_{1115} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1111} \\ DP_{1112} \\ DP_{1113} \\ DP_{1114} \\ DP_{1115} \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

### Tam otomatik lazer izleyici

DP<sub>111</sub> tasarım parametresini kapsayan yenilikçi optik ölçüm sistemleri örnek olarak Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Yenilikçi optik ölçüm sistemleri [54]

Bu tasarım matrisinde olması istenen özelliklerin bulunduğu FR<sub>1111</sub>-DP<sub>1111</sub> kompozisyonu Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. FRs-111 ve DPs-111 kompozisyonu

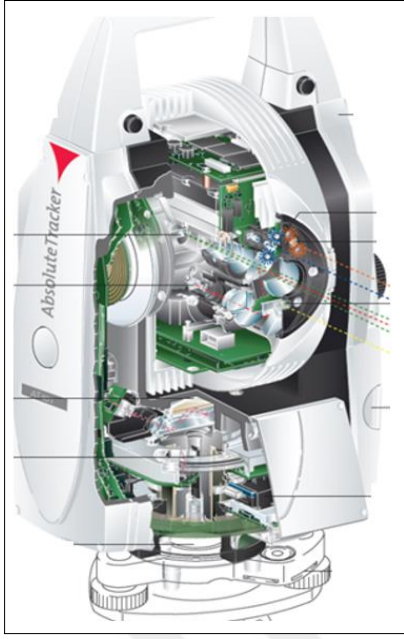
FRs-1111	DPs-1111
FR <sub>11111</sub> : Hareket transfer et	DP <sub>11111</sub> : Piezo motor
FR <sub>11112</sub> : Mobiliteyi sağla	DP <sub>11112</sub> : Tekerlekli modüler platform
FR <sub>11113</sub> : Hedefi bul	DP <sub>11113</sub> : Manyetik hareketli yansıtıcı top
FR <sub>11114</sub> : Hedefe kilitlen	DP <sub>11114</sub> : Otomatik hedef algılama sistemi
FR <sub>11115</sub> : Hassas açısal hareket yap	DP <sub>11115</sub> : Açı tespit sistemi
FR <sub>11116</sub> : Uzaktan ölçüm yap	DP <sub>11116</sub> : Mutlak mesafe ölçüm sensörü
FR <sub>11117</sub> : Alternatif enerji kaynağı belirle	DP <sub>11117</sub> : Değiştirilebilir batarya

$$\begin{Bmatrix} FR_{11111} \\ FR_{11112} \\ FR_{11113} \\ FR_{11114} \\ FR_{11115} \\ FR_{11116} \\ FR_{11117} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11111} \\ DP_{11112} \\ DP_{11113} \\ DP_{11114} \\ DP_{11115} \\ DP_{11116} \\ DP_{11117} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

Gerek takım üretiminde ve kontrolünde gerekse uçak imalatının en önemli safhalarında lazer ışınının kullanıldığı tam otomatik lazer izleyici 15 mikron hassasiyet ile bu gereksinimleri karşılamaktadır.

FR<sub>1111</sub> fonksiyon gereksiniminde tanımlanan model tabanlı anlık ölçüm, tam otomatik lazer izleyicinin fotogrametri ile birleştirilmiş ölçüm metodudur. Şekil 4.12.'de gösterilen tam otomatik lazer izleyici X, Y, Z pozisyonlarında ölçüm yaparken, kamera i, j, k pozisyonlarında dinamik 6 serbestlik dereceli ölçüm yapar. Nokta bulutu ölçümlerini programlama sisteminde üç boyutlu model ile karşılaştırır ve doğrular. Bu karşılaştırmaya göre de farklar hesaplanır. Veri frekans aralığı 100 Hz'ten büyüktür. İzleme hızı 2 m/sn' dir.

Tam otomatik lazer izleyici farklı panellerde de kullanılacağı için tekerlekli modüler platforma sahip olması gerekmektedir. Piezomotorlar ile seri hareketler sağlamaktadır. Mutlak mesafe ölçüm sensörleri, açı tespit sistemi, otomatik hedef algılama sistemi ile mikron hassasiyetinde ölçümler yapmaktadır. Güç kilidi ışın teknolojisi ile lazer ışını reflektörü otomatik olarak yakaladığı için nokta başına 15-60 saniye süren ölçümler yaklaşık 5 saniyeye düşmektedir. Elle ölçümlere göre ise %20-%30 avantaj sağlamaktadır. Bu sebeplerden dolayı projede Leica AT 901 marka tam otomatik lazer izleyici kullanılması uygun bulunmuştur.



Şekil 4.12. Tam otomatik lazer izleyici [54]

#### Robotlu ölçüm cihazları

Tam otomatik lazer izleyici haricinde panel montaj takımlarında robot destekli ölçümlere ihtiyaç duyulduğunda aşağıdaki FR1115-DP1115 kompozisyonundaki gereksinimlerin karşılanması gerekir. FRs-111 ve DPs-111 kompozisyonu Çizelge 4.5.'te gösterilmiştir.

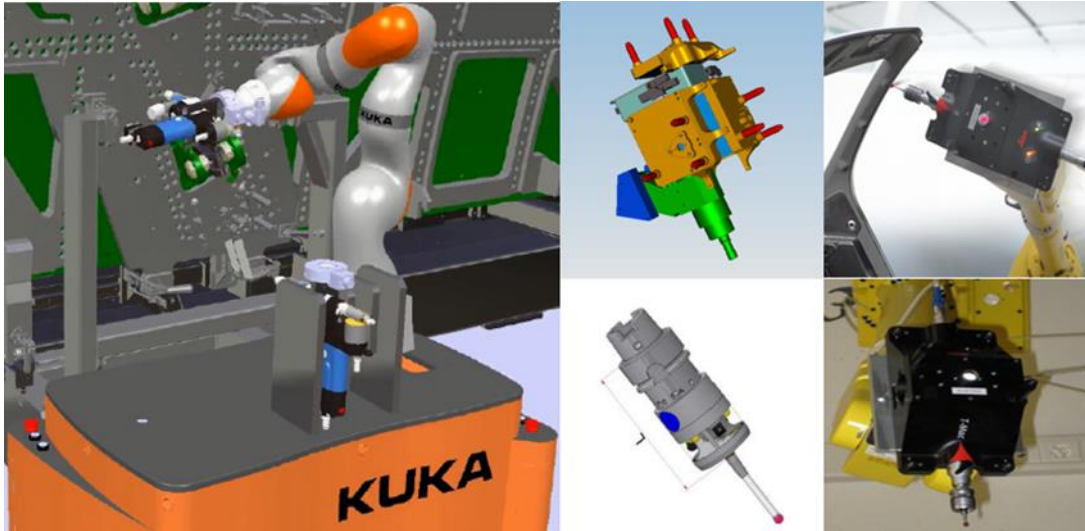
Çizelge 4.5. FRs-1115 ve DPs-1115 kompozisyonu

FRs-1115	DPs-1115
<i>FR<sub>11151</sub></i> : Uç işlevci ile ölç	<i>DP<sub>11151</sub></i> : T-mac ölçüm aparatı
<i>FR<sub>11152</sub></i> : Mobilitiyi sağla	<i>DP<sub>11152</sub></i> : Otomatik yönlendirmeli araç
<i>FR<sub>11153</sub></i> : Hareketi transfer et	<i>DP<sub>11153</sub></i> : Her yöne hareket edebilen tekerlek sistemi
<i>FR<sub>11154</sub></i> : Eksen hareketlerini sağla	<i>DP<sub>11154</sub></i> : Servo motor
<i>FR<sub>11155</sub></i> : Alternatif enerji kaynağı belirle	<i>DP<sub>11155</sub></i> : Mobilite sistem batarya hücresi
<i>FR<sub>11156</sub></i> : Yere sabitle	<i>DP<sub>11156</sub></i> : Pnömatik kaldırma aktüatörü
<i>FR<sub>11157</sub></i> : Robotu kontrol et	<i>DP<sub>11157</sub></i> : Kuka LBR iiwa Siemens Kontrol 840D

Robot destekli anlık ölçüm için fonksiyon gereksinimlerinin karşılandığı tasarım parametreleri ile oluşturulan tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{11151} \\ FR_{11152} \\ FR_{11153} \\ FR_{11154} \\ FR_{11155} \\ FR_{11156} \\ FR_{11157} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{11151} \\ DP_{11152} \\ DP_{11153} \\ DP_{11154} \\ DP_{11155} \\ DP_{11156} \\ DP_{11157} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

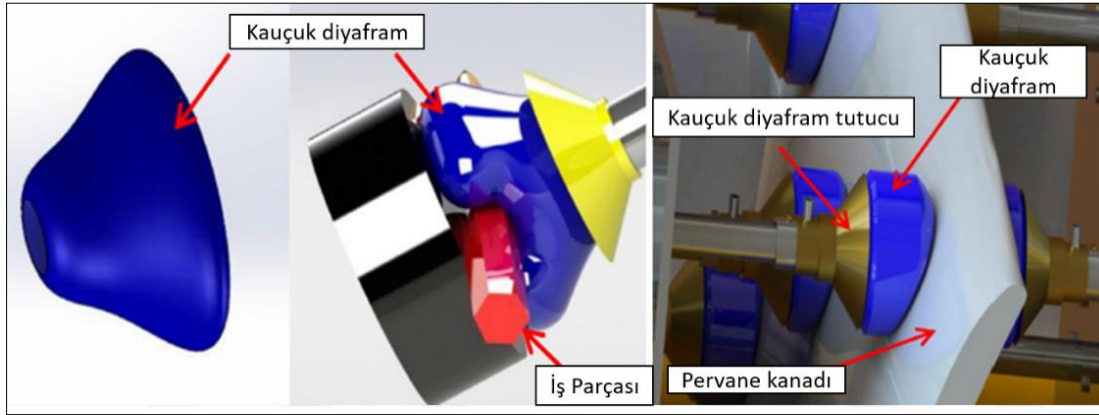
Robotlu sistemlere yenilikçi ölçüm sistemleri entegrasyonu [55] ile beraber otomatik yönlendirmeli araç üzerine yerleştirilen 7 eksenli robota uç işlevci olarak kullanılan Şekil 4.13.'teki T-mac ölçüm aparatı ile ölçüm yapılması tasarlanmıştır. Hassas montaj çalışmalarına yönelik hafif yapılı bir robot olan Kuka LBR iiwa kullanılmaktadır. LBR hafif yapım robotu anlamına gelir. iiwa ise akıllı endüstriyel iş asistanı demektir. 14 kg taşıma kapasitesi vardır ve robot T-Mac ölçüm aparatı için uygundur. Uç işlevci değiştirilebildiği için modülerdir. Robot çevrimdışı olarak programlanır ve montaj takımlarından T-Mac probu ile noktasal ölçümler alır. Takımların noktasal ölçüm sonuçlarının analizi istatistiksel proses kontrol (İPK) ile yapılır. Ölçüm hassasiyeti 50 mikrondur. Robot ile tek bir nokta ölçümü yaklaşık 6 saniyede tamamlanmaktadır.



Şekil 4.13. T-Mac ölçüm aparatlı Kuka LBR iiwa robotu [11]

### 4.3.2. Modüler fikstür sistemleri

DP<sub>113</sub> tasarım parametresi için belirlenen fikstür çerçevesi mevcut durumdan farklı ve yeniden yapılandırılabilir bir ayardır. Projede tüm uçak gövdesi panelleri için kullanılabilir. Şekil 4.14.'teki montaj aparatı taşınabilir ve ayarlanabilir kuleler, paralel kinematik robotlar, lineer robotlar, esnek destekleme cihazlarından oluşmuştur. Panellerin zarar görmemesi ve kaymaması için robotların ve alt desteklerin tutma aparatlarında ise esnek kauçuk diyafram kullanılmaktadır. Esnek fikstürler proseslere göre hızlıca değiştirilebilme, aynı aparatta farklı karmaşık geometriye sahip parçalar için kullanılmaktadır.



Şekil 4.14. Esnek kauçuk diyafram [56]

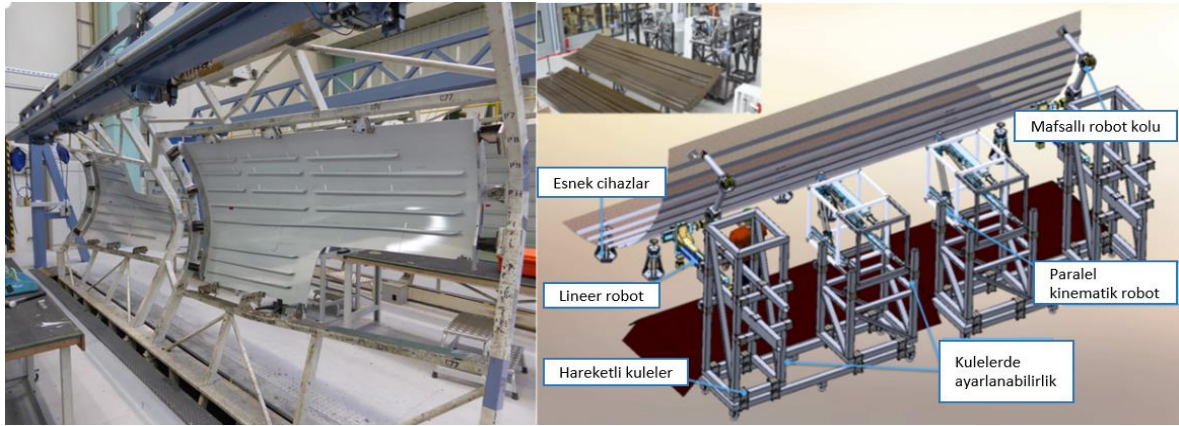
FRs-111 ve DPs-111 kompozisyonu Çizelge 4.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. FRs-12 ve DPs-12 kompozisyonu

FRs-12	DPs-12
<i>FR</i> <sub>121</sub> : Kabuğu giriş parçası üzerine fikstür deliklerini kullanarak konumla ve yerleştir	<i>DP</i> <sub>121</sub> : Manuel operatör
<i>FR</i> <sub>122</sub> : Destek çitası, güçlendirici ve diğer yapısal parçaları konumla ve yerleştir	<i>DP</i> <sub>122</sub> : Robotik destek girişi konumlama sistemi
<i>FR</i> <sub>123</sub> : Delikleri kabuğa transfer et	<i>DP</i> <sub>123</sub> : Delme modülü
<i>FR</i> <sub>124</sub> : Üretimi artırmak için delme hızını artır	<i>DP</i> <sub>124</sub> : Ölçeklenebilir mimari
<i>FR</i> <sub>125</sub> : Geçici perçinleme ile parçaları birleştir	<i>DP</i> <sub>125</sub> : Geçici perçinleme modülü

$$\begin{Bmatrix} FR_{121} \\ FR_{122} \\ FR_{123} \\ FR_{124} \\ FR_{125} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{121} \\ DP_{122} \\ DP_{123} \\ DP_{124} \\ DP_{125} \end{Bmatrix} \quad (4.13)$$

Aparatlar modüller halinde oluşturulmuştur. Modüllerin diğer modüllere bağlı olmaması önemlidir. Modülerizasyona ek olarak kontrol konseptinin de hızlı ve yeniden yapılandırmaya uygun olması gerekir. Konvansiyonel kontrol sistemlerinde her robot için göreve özel program hazırlanır. Programlar ağ üzerinde diğer robotlarla da hareket ve görev etkileşimine girer. Yeniden yapılandırılabilir sistemde ise parçalar için model tabanlı kontrol sisteminde merkezi modül çalışır. Merkezi kontrol modülünde tüm taşıma, proses ve pozisyon verileri için montaj sisteminin simülasyonu hesaplanır. Alt modüller ise her bir robot için kinematik senkronizasyonlu hareketleri eş zamanlı olarak tanımlar ve gerçekleştirir. Aparat tasarlanırken gövde panellerinin ağırlıkları, proses kuvvetleri ve yükler göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışma alanı limitli olduğundan robot kollar kullanılarak bu alan artırılmaya çalışılmıştır. Kabuğu sabitlemek için altı serbestlik derecesinin de kinematik olarak tanımlanması, boyutlara göre belirli bölgelerden ve noktalardan tutulması gerekir. Şekil 4.15.'teki altı noktadan panelin tutulduğu aparat örneğinde tutma noktalarının her birinin en az üç aktif serbestlik derecesi bulunmaktadır.



Şekil 4.15. Sabit ve yeniden yapılandırılabilir montaj takımları [35]

#### Robotik destek çitası pozisyonlama sistemi

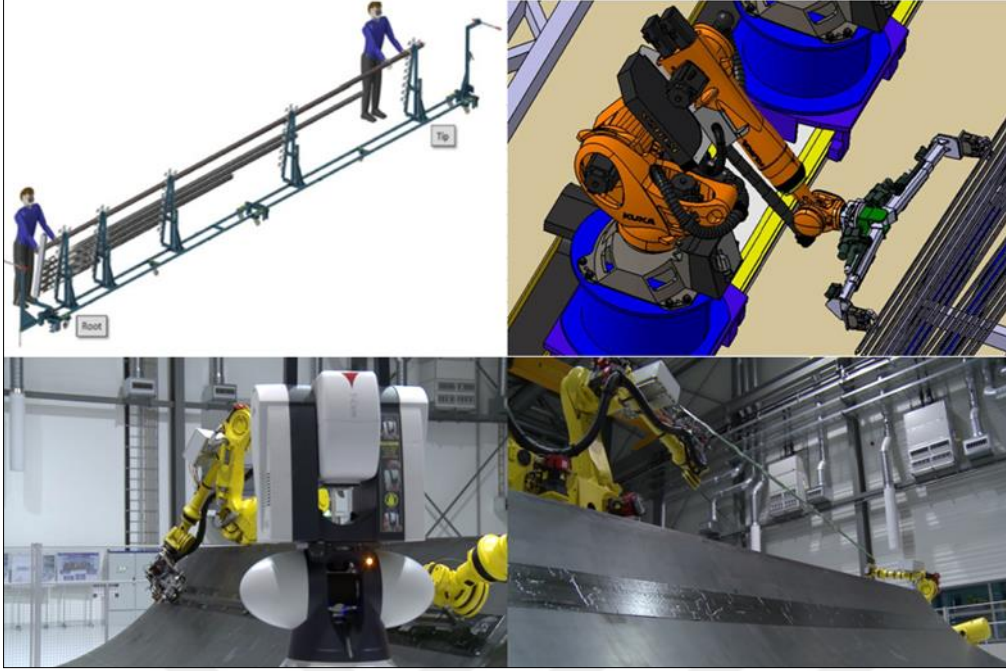
Panel montajında mevcut proseslerde kiriş, destek çitası gibi yapısal parçalar operatörler tarafından panel ve fişstür delikleri kullanılarak manuel olarak yerleştirilmektedir. Üretim

miktarı arttığında bu iş gücü yetersiz kalacaktır. Dünyada havacılık devleri benzer projelerdeki prosesleri robotlarla gerçekleştirmektedir. Bu projede de yapısal parçaları panellere yerleştirme proseslerinde robotlara ihtiyaç duyulmuştur. FRs-122 ve DPs-122 kompozisyonu Çizelge 4.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. FRs-122 ve DPs-122 kompozisyonu

FRs-122	DPs-122
<i>FR</i> <sub>1221</sub> : Uç işlevci ile tut	<i>DP</i> <sub>1221</sub> : Robot tutucuları
<i>FR</i> <sub>1222</sub> : Destek çıtalarını hazneye depola	<i>DP</i> <sub>1222</sub> : Mobil destek çıtası yerleştirme aparatı
<i>FR</i> <sub>1223</sub> : Üniteye destek çıtası taşı	<i>DP</i> <sub>1223</sub> : Otomatik yönlendirmeli araç
<i>FR</i> <sub>1224</sub> : Hareket transferi sağla	<i>DP</i> <sub>1224</sub> : Tekerlek sistemi
<i>FR</i> <sub>1225</sub> : Eklem eksen hareketlerini sağla	<i>DP</i> <sub>1225</sub> : Servo motorlar
<i>FR</i> <sub>1226</sub> : Yatay eksen hareketini sağla	<i>DP</i> <sub>1226</sub> : Raylı yatay hareket mekanizması
<i>FR</i> <sub>1227</sub> : Robotu programla	<i>DP</i> <sub>1227</sub> : Çevrimdışı programlama sistemleri
<i>FR</i> <sub>1228</sub> : Robotu kontrol et	<i>DP</i> <sub>1228</sub> : Kuka KR360 Siemens Kontrol 840D

Destek çıtaları Şekil 4.16'daki mobil destek çıtası fikstürüne otomatik yönlendirmeli araçlar tarafından taşınan destek çıtaları operatörler tarafından yerleştirilir. Fikstür yeniden yapılandırılabilir olduğundan ara kademede taşıyıcıların yeri kaydırılarak her destek çıtası boyuna uyarlanabildiği için benzer tüm projelerde kullanılabilir. Robotlar sabitlenen fikstürden destek çıtalarını almaktadır. Çevrimdışı programlama sistemleri ile programcı öncelikle destek çıtasını fikstürden seçer. Daha sonra aynı destek çıtasını panel üzerinden seçer, yazılım destek çıtasının başlangıç ve bitiş düzlemlerini ve bu düzlemler arasındaki uzaklığı hesaplayarak robotu destek çıtası fikstürüne daha sonra ise panele yönlendirerek yerleştirir ve prosesi tamamlar.



Şekil 4.16. Destek çitası yerleştirme fikstürü ve robotu [57]

Geliştirilmiş dinamik pozisyonlama sistemler sayesinde parçaların ve robotun pozisyon kontrolü için normalde bu tür proseslerde ihtiyaç olan tam otomatik lazer izleyici kullanımına gerek yoktur. Robotun tekrarlanabilirliği yani her defasında aynı işlemi gerçekleştirdiğinde adreslenen konuma dönebilme kabiliyeti  $\pm 0.1$  mm, robotun adreslenen konuma tam olarak gidebilme yeteneği olan doğruluğu ise  $\pm 0.05$  mm'dir. Doğruluk, robot parçalarının mekanik bağlantılarının yük taşıma kapasitesi ile hassasiyetine, servo motorların kabiliyetleri ile doğrudan ilişkilidir. Doğruluk, tekrarlanabilirliğin aksine yükün büyüklüğü ve tipinden etkilenir. Destek çitası yerleştirme için ise pozisyonel tolerans  $\pm 0.25$  mm'dir. Bu bilgiler doğrultusunda destek çitası yerleştirme robotu için fonksiyon gereksinimlerinin karşılandığı tasarım parametreleri ile oluşturulan tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1221} \\ FR_{1222} \\ FR_{1223} \\ FR_{1224} \\ FR_{1225} \\ FR_{1226} \\ FR_{1227} \\ FR_{1228} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1221} \\ DP_{1222} \\ DP_{1223} \\ DP_{1224} \\ DP_{1225} \\ DP_{1226} \\ DP_{1227} \\ DP_{1228} \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

### Robot tutucusu



















































Yukarıdaki işlemlerde parçaların yerlerinden alınarak istenen yerlere transfer edilmesinde robotların tutucuları en önemli ve fonksiyonel parçalardan biridir. Bir montaj hattında aynı tutucunun birden fazla işi yapması ve değişik özellikteki parçaları taşıması işlevsel anlamda çözüm gerektirmektedir. Olası problemleri ortadan kaldırmak ve proses akış sürecinin verimliliğini artırmak için aşağıdaki Şekil 4.17.'de gösterilen avantajlar nedeni ile mekanik tahrikli sistemli robot tutucuları kullanılacaktır.

Tutma işleminde ortaya çıkan harekete göre destek çıtası yerleştirme robotlarında da dönen parmaklı 4 serbestlik dereceli mekanik tutucular kullanılacaktır. Her robotta en az iki adet tutucu kullanılacaktır. Tutucular taşınacak parçanın zarar görmeden kavranması, taşınıp bırakılması ve tekrar alınması operasyonlarında görev yapacaktır. Robot tutucu sisteminin panellere uyguladığı basınç 35 kpa-620 kpa ve destek çıtalarını besleme zamanı 0.05m/s-0.05 m/s'dir. FRs-1221 ve DPs-1221 kompozisyonu Çizelge 4.8.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. FRs-1221 ve DPs-1221 kompozisyonu

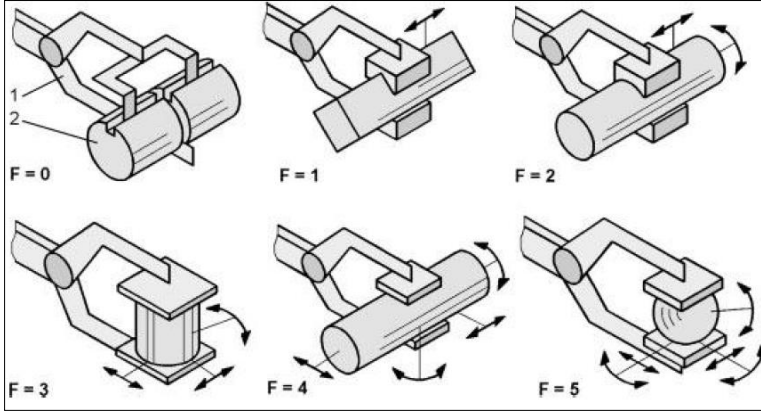
FRs-1221	DPs-1221
$FR_{12211}$ : Temas noktası belirle	$DP_{12211}$ : Yüzey temaslı
$FR_{12212}$ : Parçalar ile mesafeyi ayarla	$DP_{12212}$ : Mesafe sensörleri
$FR_{12213}$ : Parçaları tut	$DP_{12213}$ : Paralel tutucular

$$\begin{Bmatrix} FR_{12211} \\ FR_{12212} \\ FR_{12213} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{12211} \\ FR_{12212} \\ FR_{12213} \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

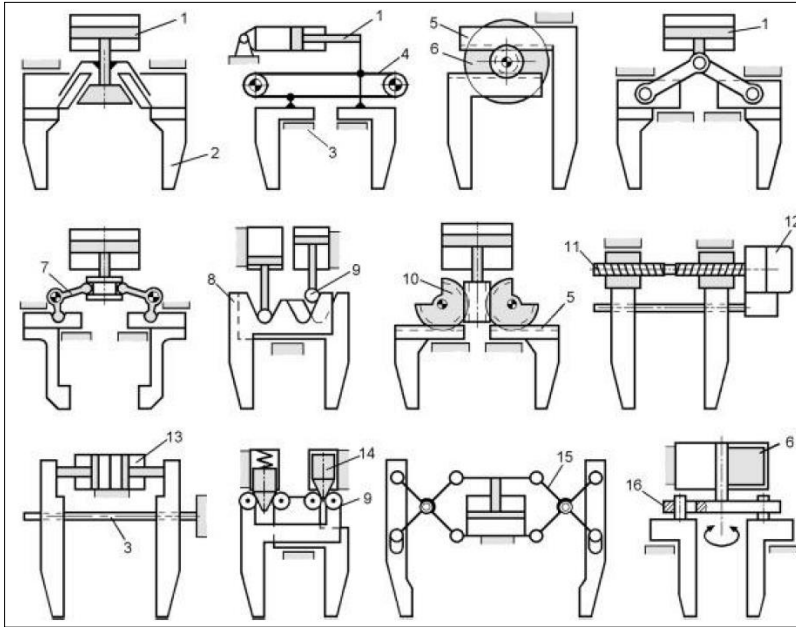
Tahrik Sistemi Değerlendirme Kriteri					
	Mekanik	Pnömatik	Hidrolik	Manyetik	Elektrik
Yüksek tutma kuvveti					
Kontrol edilebilirlik					
Enerji aktarımı					
Kirliliğe dayanıklılık					
Bakım					
Acil durumlarda durma					
Yapısal boyut					
Çevresel etki					
Maliyet					

Şekil 4.17. Farklı robot tutucu tahrik sistemlerinin karşılaştırılması [58]

Şekil 4.18.'de gösterilen robot tutucuları otomasyon uygulamalarının sonucunu önemli ölçüde etkilemektedir. Performans, hassasiyet ve esneklik açısından iş parçasının boyutlarına göre, rijit bir tutma noktası ile tutucu arasındaki uzaklık optimum olmalıdır. Tutucu parmakların ya esnek mesnet, tampon ya da tutulacak parçaya uyum gösterecek kendi kendine ayarlanabilen çenelere sahip olması gerekir. Kendiliğinden ayarlanabilen çeneler, her bir çenenin parça üzerinde iki noktada temas etmesini sağlar. Tek bir noktadan temas etmesi durumunda parçanın kendi eksenine etrafında dönme ihtimali artar ve proses akışı kesintiye uğrayarak verimi düşürür. Bu nedenle önerilen otomatik montaj hücresinde kullanılacak robotlar tarafından parçaları belirlenen konumlara yerleştirmek için doğrusal hareket edebilen Şekil 4.19.'da gösterilen standart paralel mekanik robot tutucuları tercih edilmiştir. Standart paralel robot tutucular pnömatik piston ve silindirler, dişli kayışlar ve raflar, tutucu aparatlar, servo motorlardan oluşur.



Şekil 4.18. Serbestlik derecelerine göre robot tutucuları [58]



1)Pnömatik Silindir 2) Tutucu aparat 3) Doğrusal Hareket Eyleyici 4) Dişli Kayış 5) Dişli raf  
6) Döner pnömatik silindir 7) Açılı kol 8) Sürgülü kam 9) Rulman 10) Dişli kesiti 11) Yivli mil 12)  
Dişli motor 13) İki silindirli regülatör 14) Pnömatik piston 15) Makaslı dişli 16) Diskli kam mili

Şekil 4.19. Standart paralel robot tutucuları [58]

FRs-1227 ve DPs-1227 kompozisyonu Çizelge 4.9.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. FRs-1227 ve DPs-1227 kompozisyonu

FRs-1227	DPs-1227
$FR_{12271}$ : Yatay eksen hareketini sağla	$DP_{12271}$ : Raf ve pinyon sürücü sistemi
$FR_{12272}$ : Güç kaynağı belirle	$DP_{12272}$ : Elektrik motoru




$FR_{1227}$  için DP opsiyonları oluşturulmuş ve matris aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{12271} \\ FR_{12272} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{12271} \\ FR_{12272} \end{Bmatrix} \quad (4.16)$$

#### *Raylı yatay hareket mekanizması*

Robotta yatay eksen hareketlerinin belirlenmesi için  $FR_{1227}$  için tablo oluşturulmuştur. Robot mekanizmaları için en uygun ve hassasiyet gerektiren proseslerde kullanılan, dönel hareketten lineer hareket elde etmek için maliyeti optimum olan tasarım parametresi opsiyonu raf ve pinyon sürücü sistemi kullanılmıştır.  $FR_{1227}$  için tasarım parametresi opsiyonları Çizelge 4.10.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. FR1227 için tasarım parametresi opsiyonları [59]

Fonksiyonel Gereksinim	Tasarım Parametresi Opsiyonları	Referanslar	Avantajlar	Dezavantajlar
Robotun yatay hareketini sağla	Elektrik motoru 	-Vinçler -Kaldıraçlar	-Yüksek kaldırma kapasitesi vardır -Uzun mesafeler boyunca hareketi iletme mümkündür -Hızlıdır	-Daha pahalıdır
	Raf ve pinyon sürücü 	-Robot mekanizmaları -Tezgâh tablaları -CNC tezgâhlar	-Dönel hareketten doğrusal hareket elde etmede en ucuz yöntemdir -Hassasiyet gerektiren işlerde kullanılır -Robotik uygulamaları için uygundur	-Optimum hareket aktarma oranını yakalamak zordur -Motor ile kullanılan hız düşürücü pinyonu etkiler
	Vidalı Mil 	-Makine takımları -Presler -Vidalı mekanizmalar -Kaldıraçlar	-Yüksek sürtünme boşlukları kapatır -Yüksek taşıma kapasitesine sahiptir	-Pozisyonel doğruluk ve tekrarlanabilirlik problemlidir -Sürekli güç aktarma işlemi gereken sistemlerde kullanılması verimli değildir

Motor mili, düz bir dişli olan ve diş aralığı pinyona denk gelecek şekilde olan bir kremayerle eşleştirilmiş pinyona bağlanmıştır. Pinyon döndükçe kremayer doğrusal olarak hareket eder. Vidalı mil ve bilyeli mil kullanımı takım tezgâhlarında, endüstriyel robotlarda ve diğer otomasyon uygulamalarında en yaygındır. Hızı düşürmek, torku ve kesinliği artırmak için motor mili ile vidalı mil veya bilyeli mil arasına bir redüksiyon dişli kutusu yerleştirilir.

### *Çevrimdışı programlama sistemleri*

Robot programlama dilleri geleneksel olarak robotun nasıl hareket edeceğini tanımlayan komutlar ve yardımcı fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bu diller robot üreticileri tarafından geliştirilen oldukça özel bir dil grubunu oluştururlar. Robotun kısmi görevlerinin planlanması, hareketin sağlanması, taşınması ve yerleştirilmesi söz konusu olabilecek parçaların geometri bilgilerine sahip ürün varlığı gibi bir robot programına göre oldukça ilkel bir programın varlığını tanımlar. Bu duruma, doğru işlem sırasının tanımlanabileceği bir montaj, çevrede bulunan donatım ve diğer elemanlarla çarpışma riskinin olmayacağı hareket serisi örnek verilebilir. FRs-1228 ve DPs-1228 kompozisyonu Çizelge 4.11.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. FRs-1228 ve DPs-1228 tasarım kompozisyonu

FRs-1228	DPs-1228
<i>FR</i> <sub>12281</sub> : Programla	<i>DP</i> <sub>12281</sub> : Catia VBA
<i>FR</i> <sub>12282</sub> : Simüle et	<i>DP</i> <sub>12282</sub> : Vericut
<i>FR</i> <sub>12283</sub> : Programla ve simüle et	<i>DP</i> <sub>12283</sub> : Delmia, Cenet, Soul OLPS, VDAF

Bu bilgiler doğrultusunda oluşturulan FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{12281} \\ FR_{12282} \\ FR_{12283} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{12281} \\ DP_{12282} \\ DP_{12283} \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Robot programlama yöntemleri çevrimiçi ve çevrimdışı programlama olmak üzere ikiye ayrılır. Programlama işinin doğrudan robotun programlama cihazı kullanılarak programın belleğe doğrudan yazılması çevrimiçi programlamadır. En büyük avantajı doğrudan oluşudur ve robotun kullanılacağı alanda programlanmasıdır. Program robotta hemen

denenebilir ve eksiklikler yerinde görülerek, işe uygunluğu anlık tespit edilir. Simülasyon programlarına da ihtiyaç duyulmaz. Dezavantajı ise az sayıda iş parçası ve değişik parçaların sık sık üretilmesi gereken durumlarda, robotun programlanması için iş yapmaktan alıkonmasıdır. Özellikle seri bağlı bir robotun sadece programlama işlemleri için tüm üretim sistemini durdurması kabul edilemez. Şekil 4.20.'de çevrimiçi ve çevrimdışı programlama sistemlerine sahip robotlar gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Robotlarda çevrimiçi ve çevrimdışı programlama sistemleri

Çevrimdışı programlama, gelişmiş iş istasyonları bilgisayarlar, yazılım ve simülasyon sistemleri kullanılarak, robotun kullanılacağı sürece hakim olan mühendisler tarafından yapılır. Avantajı, robotları görmekte oldukları görevden programlama işlemleri için alıkoymadığından sağladıkları üretkenlik ve elde edilen program dokümantasyonudur. Hazırlanan programlar sadece tek bir robot için değil, işletim sistemi, kontrol algoritmaları benzer olan tüm robotlar için kullanılabilir. Zorluğu ise üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım modelleri, matematiksel modeller ve simülasyon programları kullanma

zorunluluğudur. Bunun yanında doğrudan deneme yapamama ve trial run adı verilen programların denenmesi sürecindeki risk ve zaman kaybıdır.

Çevrimiçi ve çevrimdışı programlama sistemlerindeki tecrübelerimin de yardımıyla ve tüm bu avantajlar, dezavantajlar göz önünde bulundurularak tezdeki projede çevrimdışı programlama sistemine sahip robotlar kullanılacaktır. Delmia, Cenit gibi çevrimdışı programlama sistemleri, programlama ve simülasyon gereksinimlerini tek bir paket halinde karşılarken, CATIA Visual Basic gibi programlama dillerinde yazılan programlar çarpışma tespitleri için ek bir simülasyon sistemine ihtiyaç duymaktadır.

#### 4.3.3. Gövde kaburgası montaj hücre sistemleri

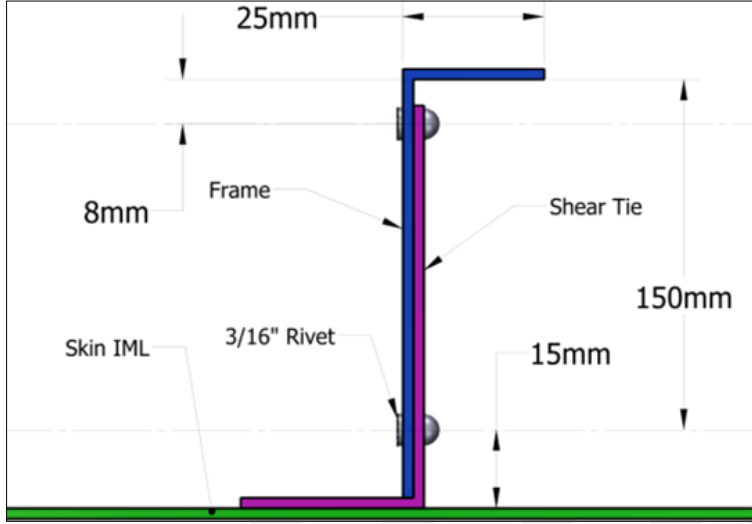
Havacılık endüstrisinde uçak parçaları montajının büyük çoğunluğu delik delme ve perçinleme prosesleriyle gerçekleştirilir. Perçinleme, iki ya da daha fazla parçanın perçin bağlantı elemanlarıyla birbirinden ayrılmayacak şekilde birleştirilmesidir. Perçinleme, uçakların yapısal parçalarının üretiminde ve montajında kullanılan geniş kapsamlı bir metottur. Uçak gövdelerinde kullanılan Şekil 4.21.'de gösterilen tipik gövde kaburgası ve yapısal bağlantı parçaları montajında parçaların mevcut durumda birleştirilmesi manuel araç gereç setleri ile operatörler tarafından yapılmaktadır. Bu da işçilik, kalite ve zaman kaybı demektir. Üretim artışı sağlandığında manuel işlemler yetersiz kalacaktır. İyileştirilmiş sistemde bu proses yenilikçi, esnek ve modüler bir çözüm olan gövde kaburga perçinleme tezgâhları ya da gövde kaburga montaj robotlarıyla yapılacaktır. Bu duruma göre oluşturulan FRs-13 ve DPs-13 kompozisyonu Çizelge 4.12.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. FRs-13 ve DPs-13 tasarım kompozisyonu

FRs-13	DPs-13
<i>FR<sub>131</sub></i> : Yapısal bağlantı parçalarını konumla ve yerleştir	<i>DP<sub>131</sub></i> : Manuel operatör
<i>FR<sub>132</sub></i> : Delikleri kabuğa transfer et ve komponentleri perçinlerle birleştir	<i>DP<sub>132</sub></i> : Gövde kaburga montaj hücresi
<i>FR<sub>133</sub></i> : Üretim artışı için delme hızını artır	<i>DP<sub>133</sub></i> : Ölçeklenebilir mimari
<i>FR<sub>134</sub></i> : Geçici perçinlerle komponentleri birleştir	<i>DP<sub>134</sub></i> : Geçici perçinleme modülü

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{131} \\ FR_{132} \\ FR_{133} \\ FR_{134} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{131} \\ DP_{132} \\ DP_{133} \\ DP_{134} \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$



Şekil 4.21. Uçak gövdelerinde tipik kaburga toka bağlantısı [60]

FRs-132 ve DP s-132 kompozisyonu Çizelge 4.13.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. FRs-132 ve DP s-132 tasarım kompozisyonu

FRs-132	DP s-132
$FR_{1321}$ : Tezgâh ile perçinle	$DP_{1321}$ : Kaburga perçinleme tezgâhı
$FR_{1322}$ : Robot ile perçinle	$DP_{1322}$ : Kaburga toka robotu

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

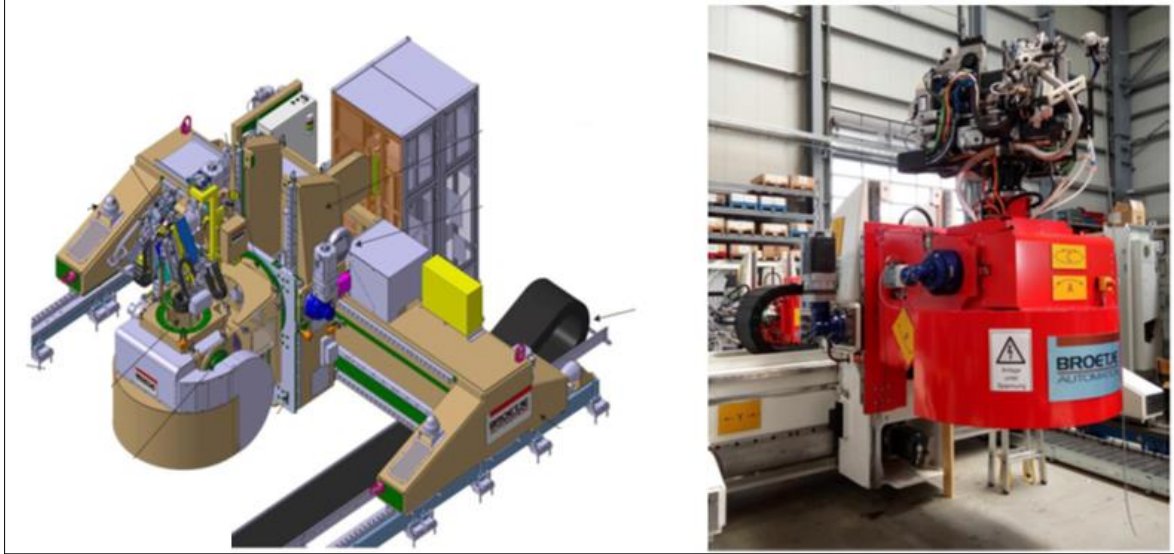
$$\begin{Bmatrix} FR_{1321} \\ FR_{1322} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{1321} \\ FR_{1322} \end{Bmatrix} \quad (4.19)$$

#### Gövde yapı kaburgası perçinleme tezgâhı

Şekil 4.22'de gösterilen gövde yapı kaburgası perçinleme tezgâhları farklı tipte uçak gövde panellerinde kaburga ve yapısal bağlantı parçalarının montajı için tasarlanmıştır. Gövde

kaburgalarının perçinlenmesinde göz önünde bulundurulması gereken en önemli konu gövde kaburgaları ile kabuk arasındaki montaj boşluğudur. Uç işlevci 150 mm ve üzeri mesafelerde çalışabilmektedir.

Sıkıştırma, delme, perçin yerleştirme ve dolu gövdeli perçinler için ezme işlemlerini maksimum 20 mm kalınlığa kadar gerçekleştirmektedir. Tezgâhın sıkma kuvveti 20-120 DaN aralığındadır. Pozisyonlayıcı ünitelerde lineer eksen pozisyon toleransı,  $\pm 0.2$  mm, tekrarlanabilirliği  $\pm 0.15$ , döner eksenlerde doğruluk  $\pm 50$  yay/sn, tekrarlanabilirlik  $\pm 30$  yay/sn, tüm eksenlerin toplam pozisyon toleransı ise  $1^\circ/\text{dk}$ 'dir. Pozisyonlama işlemlerinden sonra kaburga ve yapısal bağlantı parçaları delinmekte, 6/32", 7/32" ve 8/32" çapındaki perçinler plastik besleme tüpleri ile pnömatik olarak tutuculara beslenmektedir. Perçin yaylı tutucular ile durdurulup, uç kısmından tutulmakta, elektrikli ve pnömatik aparatlarla perçini deliğe yerleştirmektedir. Alt anvil kısmı ise ezme işlemini gerçekleştirerek prosesi tamamlamaktadır.



Şekil 4.22. Gövde yapı kaburgası perçinleme tezgâhı [61]

Tezgâh konsepti otomatik istasyonda gövde panellerini yükleme boşaltma kabiliyetlerine de sahiptir. Bu da tezgâhın panellerin altında yatay X yönünde çalışması anlamına gelir. Bu yön iki servo motorla hareket ettirilen, DP<sub>12271</sub>'de bahsedilen raf ve pinyon sürücü sistemine sahip raylarla ihtiyaca yönelik artırılabilir. Paneller bir konveyör sistemi ile tezgâha yüklenir. İşlemler tamamlandığında ise paneller otomatik olarak istasyondan ayrılır. FRs-1321 ve DPs-1321 kompozisyonu Çizelge 4.14.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. FRs-1321 ve DPs-1321 tasarım kompozisyonu

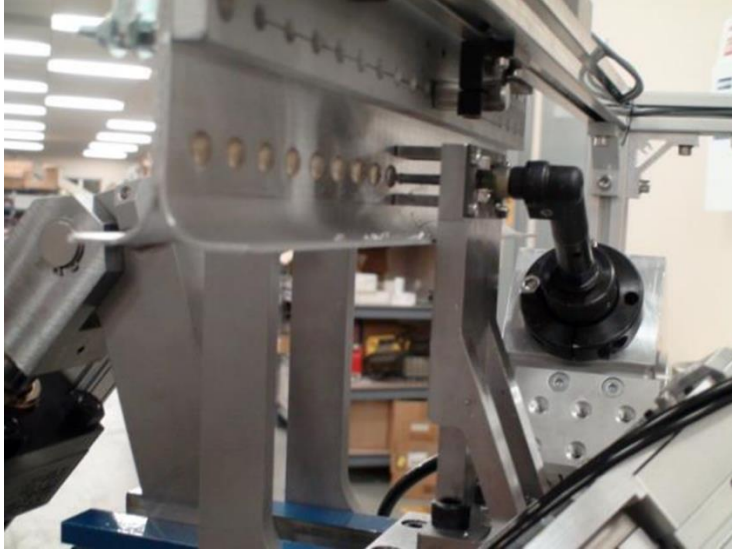
FRs-1321	DPs-1321
$FR_{13211}$ : Tezgâhı hareket ettir ve uygun konuma getir	$DP_{13211}$ : Raylı platform
$FR_{13212}$ : Panel ve kaburgaları birleştir	$DP_{13212}$ : Uç işlevci perçinleme kafası

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{13211} \\ FR_{13212} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{13211} \\ FR_{13212} \end{Bmatrix} \quad (4.20)$$

#### Gövde yapı kaburgası perçinleme robotu

Gövde yapı kaburgası perçinleme tezgâhlarına alternatif olarak kullanılacak Şekil 4.23.'te gösterilen perçinleme robotları da farklı tipte uçak gövde panellerinde kaburga ve yapısal bağlantı parçalarının montajı için tasarlanmıştır. Bu robotlarda Kuka KR360-2 veya Kuka KR500-3 robotları kullanılabilir. X eksenini hareketini raylı sistemler üzerinde yapar. Bu hareket yedinci eksen hareketidir. Robotun doğruluğu  $\pm 0.3$  mm, tekrarlanabilirliği  $\pm 0.05$  mm'dir. Bu hassasiyet kalibrasyon, ağ, basınç ve sıcaklık kompanzasyonları ile elde edilmiştir. Robotun hızı 20 m/dk, sıkma kuvveti 6 bar basınçta 3000 daN, delme kuvveti 80 daN'dır. Uç işlevci perçinleme kafası parçayı sıkma, delme, perçin yerleştirme ve dolu gövdeli perçinler için ezme işlemlerini kalınlığı ölçerek maksimum 7 mm kalınlığa kadar gerçekleştirmektedir. Elektrikli iş mili ile kontrol edilebilir delme hızı 500-6000 devir/dakika'dır. Gagalama ile delme fonksiyonuna sahiptir. 5/32", 6/32", 7/32" ve 8/32" çapındaki perçinleri yerleştirebilmektedir.



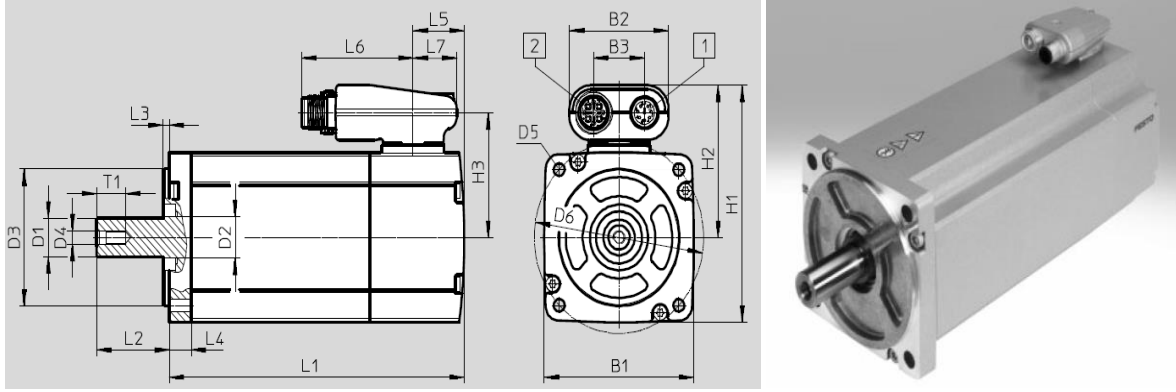
Şekil 4.23. Gövde yapı kaburgası perçinleme robotu [62]

FRs-13211 ve DPs-13211 kompozisyonu Çizelge 4.15.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. FRs-13211 ve DPs-13211 tasarım kompozisyonu

FRs-13211	DPs-13211
$FR_{132111}$ : Robotu konumla	$DP_{132111}$ : Konum sensörleri ve kontrol algoritmaları
$FR_{132112}$ : Eklem eksen hareketlerini sağla	$DP_{132112}$ : Servo motorlar
$FR_{132113}$ : Yatay eksen hareketini sağla	$DP_{132113}$ : Raylı yatay hareket mekanizması
$FR_{132114}$ : Robotu programla	$DP_{132114}$ : Çevrimdışı programlama sistemi

$FR_{132112}$  fonksiyonel gereksiniminin  $DP_{132112}$  tasarım parametresi olan Şekil 4.24.'te gösterilen servo, herhangi bir mekanizmanın işleyişini hatayı algılayarak yan bir geri besleme düzeneğinin yardımıyla denetleyen ve hatayı gideren otomatik aygıttır. Servo motorlar, elektrik motoru, dişli redüktör mekanizması ve konum bildirici encoderden oluşan bütünlük bir yapıya sahiptir. Robot teknolojisinde en çok kullanılan motor çeşitidir. Servo motorlar, çıkış, mekaniksel konum, hız veya ivme gibi parametrelerin kontrol edildiği, hareket kontrolü yapılan bir düzenektir. En büyük özellikleri hassas bir konum kontrolüne sahip olmalarıdır. Arka bölümlerinde bulunan manyetik veya optik bir konum bildirici ve kontrol devresi sayesinde konum hata bildirimini veya negatif geri besleme metodu ile kontrol edilirler.



Şekil 4.24. Servo motor [62]

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{132111} \\ FR_{132112} \\ FR_{132113} \\ FR_{132114} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{132111} \\ DP_{132112} \\ DP_{132113} \\ DP_{132114} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Benzer şekilde FRs-14 ve DPs-14, FRs-15 ve DPs-15, FRs-16 ve DPs-16 kompozisyonu sırasıyla Çizelge 4.16.-4.17. ve 4.18.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. FRs-14 ve DPs-14 tasarım kompozisyonu

FRs-14	DPs-14
<i>FR<sub>141</sub></i> : Tutucu aparatları gevşet ve kaldır	<i>DP<sub>141</sub></i> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR<sub>142</sub></i> : Çapak alma ve temizleme için panelleri ergonomik olarak destekle	<i>DP<sub>142</sub></i> : Operatörler için fikstür destekleme aparatları
<i>FR<sub>143</sub></i> : Çapak al ve temizle	<i>DP<sub>143</sub></i> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR<sub>144</sub></i> : Üretim artışı için çapak alma ve temizleme hızını artır	<i>DP<sub>144</sub></i> : Operatör sayısını artır
<i>FR<sub>145</sub></i> : Operatörler için ergonomik erişim sağla	<i>DP<sub>145</sub></i> : Yükseltme platformu

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{141} \\ FR_{142} \\ FR_{143} \\ FR_{144} \\ FR_{145} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{141} \\ DP_{142} \\ DP_{143} \\ DP_{144} \\ DP_{145} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Çizelge 4.17. FRs-15 ve DPs-15 tasarım kompozisyonu

FRs-15	DPs-15
<i>FR</i> <sub>151</sub> : Sızdırmazlık macunu uygulamaları için panelleri ergonomik olarak destekle	<i>DP</i> <sub>151</sub> : Operatörler için fiş tür destekleme aparatları
<i>FR</i> <sub>152</sub> : Sızdırmazlık macunu uygula	<i>DP</i> <sub>152</sub> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR</i> <sub>153</sub> : Parçaları yeniden yerleştir	<i>DP</i> <sub>153</sub> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR</i> <sub>154</sub> : Operatörler için ergonomik erişim sağla	<i>DP</i> <sub>154</sub> : Yükseltme platformu

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{151} \\ FR_{152} \\ FR_{153} \\ FR_{154} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{151} \\ DP_{152} \\ DP_{153} \\ DP_{154} \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Çizelge 4.18. FRs-16 ve DPs-16 tasarım kompozisyonu

FRs-16	DPs-16
<i>FR</i> <sub>161</sub> : Geçici perçin konum kontrolü	<i>DP</i> <sub>161</sub> : Konum kontrol yöntemleri
<i>FR</i> <sub>162</sub> : Perçinleri yerleştir	<i>DP</i> <sub>162</sub> : Manuel perçinleme modülü
<i>FR</i> <sub>163</sub> : Bağlantı somunlarını yerleştir	<i>DP</i> <sub>163</sub> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR</i> <sub>164</sub> : Üretim artışı için manuel perçinleme hızını artır	<i>DP</i> <sub>164</sub> : Operatör sayısını artır
<i>FR</i> <sub>165</sub> : Operatörler için ergonomik erişim	<i>DP</i> <sub>165</sub> : Yükseltme platformu

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{161} \\ FR_{162} \\ FR_{163} \\ FR_{164} \\ FR_{165} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{161} \\ DP_{162} \\ DP_{163} \\ DP_{164} \\ DP_{165} \end{Bmatrix} \quad (4.22)$$

#### 4.3.4. Konum kontrol sistemleri

DP161 tasarım parametresinde bahsedilen konum kontrol yöntemleri mevcut durumda projede teknik resimden okuma ve cetveller ile ölçerek manuel markalama şeklindedir. Bu proseste iyileştirme ihtiyacı bulunmaktadır. Prosesin hatasız ve kısa zamanda tamamlanması için otomatize edilmelidir. FRs-161 ve DPs-161 kompozisyonu Çizelge 4.19.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. FRs-161 ve DPs-161 tasarım kompozisyonu

FRs-161	DPs-161
<i>FR<sub>1611</sub></i> : Teknik resim ile manuel markalama	<i>DP<sub>1611</sub></i> : Teknik resim, cetvel, işaretleyici
<i>FR<sub>1612</sub></i> : Yardımcı aparat, şablon ile markalama	<i>DP<sub>1612</sub></i> : Sac metal ve sabitleme aparatları
<i>FR<sub>1613</sub></i> : Artırılmış gerçeklik sistemleri ile markalama	<i>DP<sub>1613</sub></i> : Artırılmış gerçeklik üç boyutlu optik projeksiyon cihazı

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

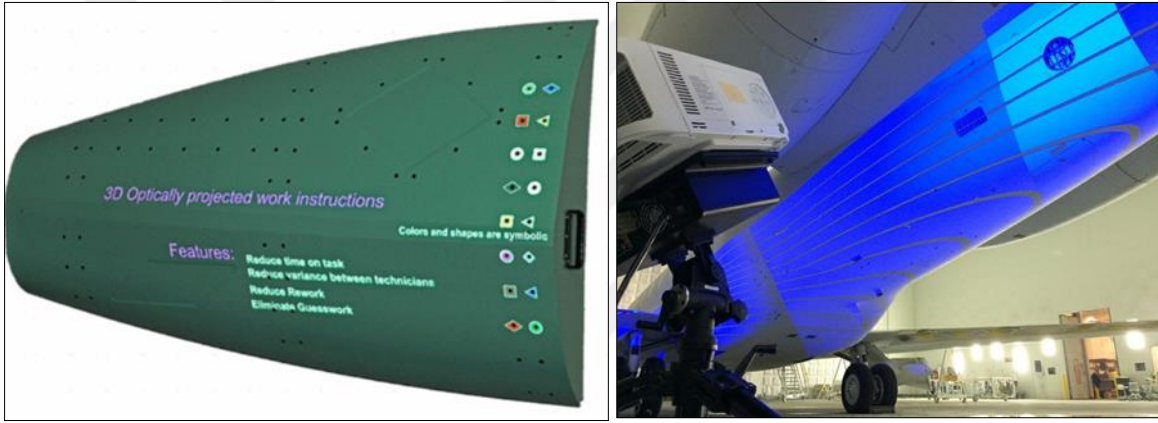
$$\begin{Bmatrix} FR_{1611} \\ FR_{1612} \\ FR_{1613} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{1611} \\ FR_{1612} \\ FR_{1613} \end{Bmatrix} \quad (4.23)$$

#### Artırılmış gerçeklik üç boyutlu projeksiyon cihazı

Artırılmış gerçeklik ile projeksiyon teknolojileri geometri ve boyuttan bağımsız olarak görsel çalışma talimatlarını parça üzerine yansıtmaktadır. Bu da tekrarlanan işlemleri ve zamanı azaltmaktadır. Boeing 737 motor sistemi arıza araştırma sürecinde artırılmış gerçeklik teknolojilerinin kullanılması sayesinde bakım süresinde %17 kısalma sağlanırken, gerçekleşen işin kalitesinde %24 artış gözlenmiştir. Uçak motoru hava alığı parçalarının

üretim proseslerinde 80 saat, kanat kabuk montajlarında 96 saat, orta düzey uçak modifikasyonlarında ise 80 saat zaman kazancı sağlanmıştır [63].

Kısım 19 projesinde de tack rivet adı verilen parçaların geçici olarak birleştirilmesini ve tezgâhlarda da referans noktası olarak kullanılmasını sağlayan geçici perçinler için panellerin üzerine DP<sub>1613</sub>'te belirtilen ve Şekil 4.25.'te gösterilen projectionworks üç boyutlu optik projeksiyon cihazları ile görsel yansıtma yapılacaktır. Böylece teknik resim okuma, cetveller ile panel üzerinde işaretleme ve markalama işlemleri ile shop aid adı verilen yardımcı sac metal sabitleme aparatlarının kullanılması ortadan kaldırılacaktır. Bu da kısa zamanda hatasız geçici perçinleme işlemlerinin yapılmasını sağlayacaktır.



Şekil 4.25. Artırılmış gerçeklik ile markalama [63]

FRs-17 ve DPs-17 kompozisyonu Çizelge 4.20.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. FRs-17 ve DPs-17 tasarım kompozisyonu

FRs-17	DPs-17
<i>FR<sub>171</sub></i> : Tool, panel ve parçaları tezgâha yükle	<i>DP<sub>171</sub></i> : Malzeme taşıma sistemi
<i>FR<sub>172</sub></i> : Tezgâh ile montajı tamamla	<i>DP<sub>172</sub></i> : Yeniden yapılandırılabilir perçinleme sistemi
<i>FR<sub>173</sub></i> : Kalan perçinleri yerleştir ve bağlantı somunlarını yerleştir	<i>DP<sub>173</sub></i> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR<sub>174</sub></i> : Uygun torkta sık	<i>DP<sub>174</sub></i> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR<sub>175</sub></i> : Üretim artışı için manuel perçinleme hızını artır	<i>DP<sub>175</sub></i> : Modüler mimari

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{171} \\ FR_{172} \\ FR_{173} \\ FR_{174} \\ FR_{175} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{171} \\ DP_{172} \\ DP_{173} \\ DP_{174} \\ DP_{175} \end{Bmatrix} \quad (4.24)$$

#### 4.3.5. Malzeme taşıma sistemleri

Amerikan Malzeme Taşıma Endüstrisi tarafından “malzemelerin ve ürünlerin üretim ve dağıtım sürecinde, tüketiminde ve hurdaya ayrılmalarında iletimleri, korunmaları, depolanmaları ve kontrol edilmeleri” olarak tanımlanmıştır. Malzemelerin taşınması güvenli, verimli, düşük maliyette, zamanında ve doğru bir şekilde yapılmalıdır. ABD’de tahmin edilen taşıma maliyet değerlerinin ortalaması toplam imalat işçilik maliyetinin %20-25’i civarındadır. Bu oran üretim tipine ve malzeme taşınmasında otomasyon seviyesine bağlı olarak değişmektedir.

Matematiksel eşitlikler araç bazlı malzeme iletme sistemlerinin işleyişini açıklamak için geliştirilirler. Bu eşitliklerin geliştirilmesinde aracın tüm taşıma boyunca sabit hızda ilerlediği ve hızlanmanın, yavaşlamanın ve diğer olabilecek hız değişimlerinin ihmal edildiği kabul edilir. Bir araç bazlı iletim sisteminin işleyişinde bir tipik teslimat çevrim süresi, yük alma istasyonunda yükleme süresi, indirme istasyonuna dolu hareket süresi, indirme istasyonunda boşaltma süresi ve teslimatlar arasında aracın boş hareket süresinden oluşmaktadır. Bir aracın bir teslimat yapması için gereken toplam çevrim süresi aşağıda verilmiştir.

$$T_c = T_L + \frac{L_d}{v_c} + T_U + \frac{L_e}{v_c} \quad (4.25)$$

$T_c$  = teslimat çevrim süresi, dk/teslimat;  $T_L$  = yükleme istasyonunda yükleme süresi, dakika;  $L_d$  = yükleme ve boşaltma istasyonu arasında aracın hareket mesafesi, m;  $v_c$  = taşıyıcı hızı, m/dk;  $T_U$  = boşaltma istasyonunda boşaltma süresi, dakika ve  $L_e$  = aracın bir sonraki teslimat çevriminin başlama noktasına kadar yüksüz olarak gittiği mesafe m’dir [64].

Trafik sıkışıklığından dolayı oluşan zaman kayıpları ile ilgili olarak zaman kayıplarının sistem performansına etkisini tahmin etmek için trafik faktörü  $F_t$  tanımlanmıştır. Trafik faktörü bağlantılı verim düşmesinin kaynakları arasında kavşaklarda bekleme, araçların birbirini engellemesi ve yükleme boşaltma istasyonlarında kuyrukta bekleme sayılabilir. Taşıma işlemlerinde insan faktörü varsa verimlilik olumsuz yönde etkilenir. İşçi verimliliği insan operatörün gerçek iş hızının standart veya normal performans altında beklenen iş hızına oranı olarak tanımlanır ve  $E_w$  sembolü ile gösterilir. Tanımlanan bu faktörlerle, bir aracın bir saat içinde kullanılabilirlik süresi  $A$ ,  $F_t$  ve  $E_w$  ile düzeltilmiş 60 dakika olarak ifade edilebilir.

$$AT = 60AF_tE_w \quad (4.26)$$

Eşitlikte,  $AT$  = kullanılabilir süre, araç başına dk/sa;  $A$ = kullanılabilirlik;  $F_t$ = trafik faktörü ve  $E_w$  = işçi verimliliğidir. Şekil 4.26.'da tekerlekli manuel panel taşıma aparatları gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Tekerlekli manuel panel taşıma aparatları

Bir aracın bir saatte yaptığı teslimat sayısı hesaplanırsa;

$$R_{dv} = \frac{AT}{T_c} \quad (4.27)$$

Sistemde tanımlanan toplam teslimat gereksinimini  $R_f$  karşılamak için gereken toplam araç sayısı öncelikle toplam iş yükünü hesaplayarak ardından araç başına kullanılabilir süreye bölerek hesaplanır. İş yükü malzeme taşıma sistemi tarafından bir saatte yerine getirilmesi gereken ve zaman cinsinden ifade edilen toplam iş miktarı olarak tanımlanır. İş yükü aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır

$$WL = R_f T_c \quad (4.28)$$

Eşitlikte,  $WL$  = iş yükü, dk/sa;  $R_f$  = sistemde bir saatte gerçekleşen toplam teslimat akış hızı; teslimat/saat ve  $T_c$  = teslimat çevrim süresi, dk/teslimattır. Artık bu iş yükü için gereken araç sayısı hesaplanabilir.

$$n_c = \frac{WL}{AT} \quad (4.29)$$

Eşitlikte,  $n_c$  = gerekli taşıyıcı araçların sayısı,  $WL$  = iş yükü, dk/saat ve  $AT$  = araç başına kullanılabilir süre, dk/sa'tır. Eşitlik (4.28) ve (4.29), eşitlik (4.30)'da yerlerine konursa  $n_c$ 'yi belirlemek için alternatif bir yol bulunmuş olur.

$$n_c = \frac{R_f}{R_{dv}} \quad (4.30)$$

Eşitlikte,  $n_c$  = gerekli taşıyıcı araçların sayısı,  $R_f$  = sistemden toplam teslimat gereksinimi, teslimat/saat ve  $R_{dv}$  = araç başına teslimat hızı, araç başına teslimat/saattir [64]. Bu bilgiler ile el ile taşıma sistemlerinin verimi nasıl etkilediği tespit edilmiş ve manuel taşıma sistemlerinin iptal edilmesi ile oluşturulan FR171 fonksiyonel gereksinimlerinin karşılanması için panel malzeme taşıma sistemleri opsiyonları Çizelge 4.21.'deki gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.21. FRs-171 ve DPs-171 tasarım kompozisyonu

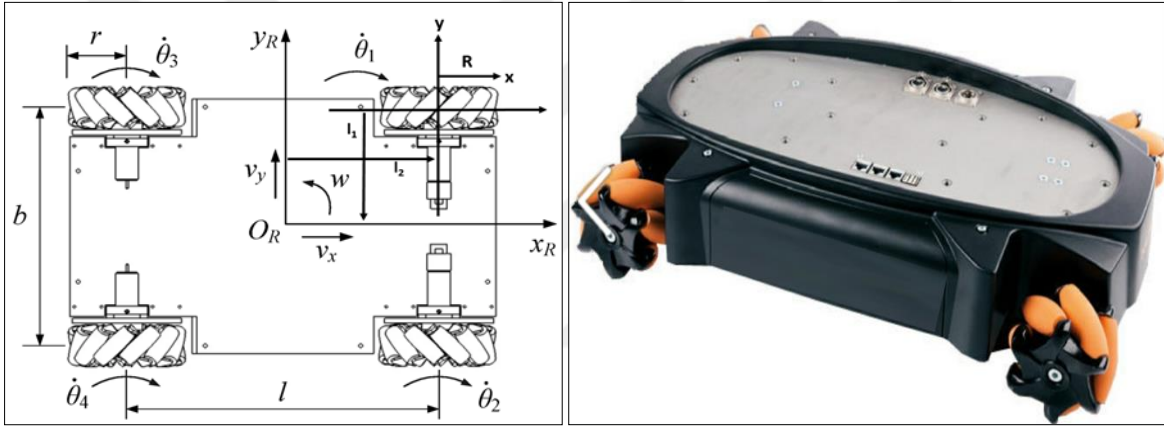
FRs-171	DPs-171
<i>FR</i> <sub>1711</sub> : Yerden taşıma sistemi ile taşı	<i>DP</i> <sub>1711</sub> : Otomatik yönlendirmeli araçlar
<i>FR</i> <sub>1712</sub> : Raylı taşıma sistemi ile taşı	<i>DP</i> <sub>1712</sub> : Robotlu taşıma sistemleri
<i>FR</i> <sub>1713</sub> : Havadan taşıma sistemi ile taşı	<i>DP</i> <sub>1713</sub> : Modüler vinç sistemi

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1711} \\ FR_{1712} \\ FR_{1713} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1711} \\ DP_{1712} \\ DP_{1713} \end{Bmatrix} \quad (4.31)$$

### Otomatik yönlendirmeli araçlar

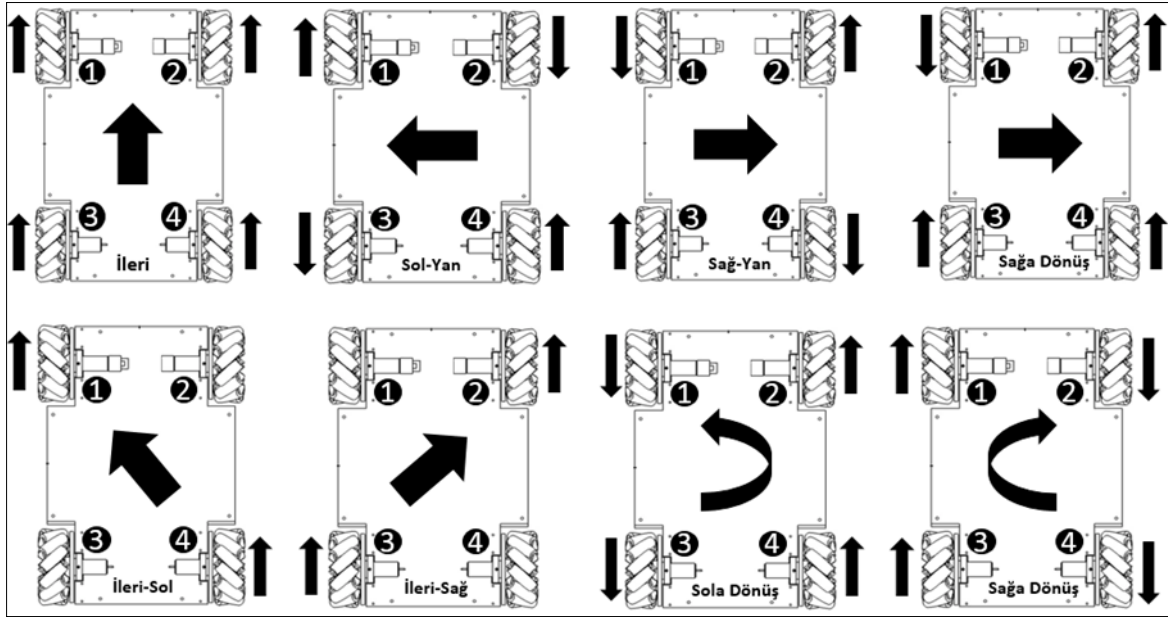
Otomatik yönlendirmeli araçlar, bir diğer adıyla otonom mobil robotlar Şekil 4.27.'de gösterilen her yöne hareket edebilen tekerlek sistemi ile dar alanlarda bile manevra yaparak esnek hareket kabiliyetleri sergiler.



Şekil 4.27. Her yöne hareket edebilen tekerlek sistemi

$$\begin{bmatrix} \vartheta_x \\ \vartheta_y \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ \frac{1}{l_1+l_2} & \frac{1}{l_1+l_2} & \frac{1}{l_1+l_2} & \frac{1}{l_1+l_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Omni yönlü araç terimi Şekil 4.28'deki gibi her yöne hareket edebilen araçlar için kullanılır. Her yöne hareket edebilen tekerleklere sahip otonom mobil robotlarda tekerlek konfigürasyonu otomobillerdeki gibi dört tekerleğin paralel konumlanmasından oluşmaktadır.



Şekil 4.28. Otonom mobil robot hareketleri

Otonom mobil robot hareketlerini yapabilen araçlarda dönüş açısı, yön değiştirme hızı ve hareket hızı parametrik sabit ya da değiştirilebilir değerler olarak tanımlanabilir. Bu parametrik değerler eşitlik (4.33)'teki gibi hesaplanır.

$$V_1 = V_d \sin\left(\theta_d + \frac{\pi}{4}\right) + V_\theta$$

$$V_2 = V_d \cos\left(\theta_d + \frac{\pi}{4}\right) - V_\theta$$

$$V_3 = V_d \cos\left(\theta_d + \frac{\pi}{4}\right) + V_\theta$$

$$V_4 = V_d \sin\left(\theta_d + \frac{\pi}{4}\right) - V_\theta \quad (4.33)$$

$V_x$  :  $x$ . tekerlek için gerilim çarpanı

$V_d$  : İstenen hız [-1,1]

$\theta_d$  : İstenen açı [0,2 $\pi$ ]

$V_\theta$  : İstenen hız [-1,1]

Kuvvet vektörü hesaplanırsa  $V_d \sin\left(\theta_d + \frac{\pi}{4}\right)$  ile hesaplanır. Dönüş açılarında modifikasyon ise  $V_\theta$  ile kontrol edilir [65]. Her yöne hareket edebilen tekerleklerde lateral hareket serbestliği olmasına karşın, bu yöndeki hareketin gerektiği zaman frenlenmesi zordur. Fakat kontrol algoritmaları ve sensörler teknolojisindeki gelişmeler bu zorluğu ortadan kaldırmıştır. Her yöne hareket edebilen tekerlekler verimlidir çünkü yönlendirme ve hareket

tüm tekerleklerin katılımı ile gerçekleştiği için toplam güç vektörü tüm tekerleklerin vektörlerinin toplamından oluşmaktadır [66].

Otonom mobil robotlar navigasyon sistemleri ile çevrimdışı programlanarak fabrika yerleşimini tarar, belirlenen rotaya gidebilir ve bir engel ile karşılaştığında alternatif rotalar belirleyerek taşıma işlemlerini gerçekleştirir. Güvenlikli lazer tarayıcılar ile çarpışmaları önler. Üçlü bağlantı konfigürasyonları ile uç uca eklenerek yeniden yapılandırılabilir ve daha fazla yük taşınması sağlanabilir. Kısım 19 projesinde mevcut durumda el ile çekilen tekerlekli manuel taşıma aparatları ve tavan vinçleri kullanılmaktadır. Panellerin otonom mobil robotlar ile taşınması verimliliği artıracaktır. Bu bilgiler göz önünde bulundurularak FRs-1711 ve DPs-1711 kompozisyonu Çizelge 4.22.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22. FRs-1711 ve DPs-1711 tasarım kompozisyonu

FRs-1711	DPs-1711
<i>FR<sub>17111</sub></i> : Paneli ve toolu yükle	<i>DP<sub>17111</sub></i> : Yeniden yapılandırılabilir aparat
<i>FR<sub>17112</sub></i> : Doğru rotayı bul	<i>DP<sub>17112</sub></i> : Otonom navigasyon sistemi
<i>FR<sub>17113</sub></i> : Doğru rotaya git	<i>DP<sub>17113</sub></i> : Otonom navigasyon sistemi
<i>FR<sub>17114</sub></i> : Çarpışmayı engelle	<i>DP<sub>17114</sub></i> : Güvenlik lazer tarayıcı
<i>FR<sub>17115</sub></i> : Z ekseninde hareket ederek paneli bırak	<i>DP<sub>17115</sub></i> : Hidrolik silindirler
<i>FR<sub>17116</sub></i> : Ölçeklenebilir mimari tasarla	<i>DP<sub>17116</sub></i> : Üçlü konfigürasyon

FR-DP tasarım matrisi ise aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{pmatrix} FR_{17111} \\ FR_{17112} \\ FR_{17113} \\ FR_{17114} \\ FR_{17115} \\ FR_{17116} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{17111} \\ DP_{17112} \\ DP_{17113} \\ DP_{17114} \\ DP_{17115} \\ DP_{17116} \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

### Robotlu taşıma sistemleri

Endüstriyel bir robottan en önemli beklentiler yük taşıma kapasitesi, tekrarlanabilirliği ve doğruluğudur. Tanımlanan yük miktarı, mekanizmanın hareket hızına bağlıdır. Tanımlanan

yükten daha fazla oranda yük taşıyabilme kabiliyeti hızla orantılı olup, daha fazla yük ancak daha düşük hızlarda taşınabilir. Robot ile taşıma sistemleri raylı sistemlerden oluşur. Raylı taşıma sistemleri, sabit ray sistemi tarafından yönlendirilen motorlu araçlardan oluşmaktadır. Ray sistemi tek raydan veya iki paralel raydan oluşur. Sabit ray hattının bulunması bu sistemleri otonom mobil robotlardan ayıran unsurdur. Otonom mobil robotlar birbirlerinden bağımsız çalışırlar ve araçlara monteli elektrik motorlarından tahrik edilirler. Güçlerini üzerlerine monteli akülerden alırken, ray yönlendirmeli araçlar elektrik gücü elektrikli ray sisteminden alabilirler. Ray güdümlü araç sistemlerinde bir hattan başka bir hatta geçmeyi sağlayan makasları, döner tablaları ve diğer özel hat parçalarını kullanarak farklı rotalar izlenebilir. Raylı taşıma sistemleri, konveyör sistemlerine göre daha esnektir. Otonom mobil robotlara göre esnekliği daha azdır. Kısım 19 projesinde paneller ve aparatların taşınması için tam otomatik hücreler tasarlanarak endüstriyel robotlarla taşıma işleminin gerçekleştirilmesi alternatif olarak planlanmıştır. Endüstriyel taşıma robotları için FRs-1712 ve DPs-1712 parametreleri Çizelge 4.23.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.23. FRs-1712 ve DPs-1712 tasarım kompozisyonu

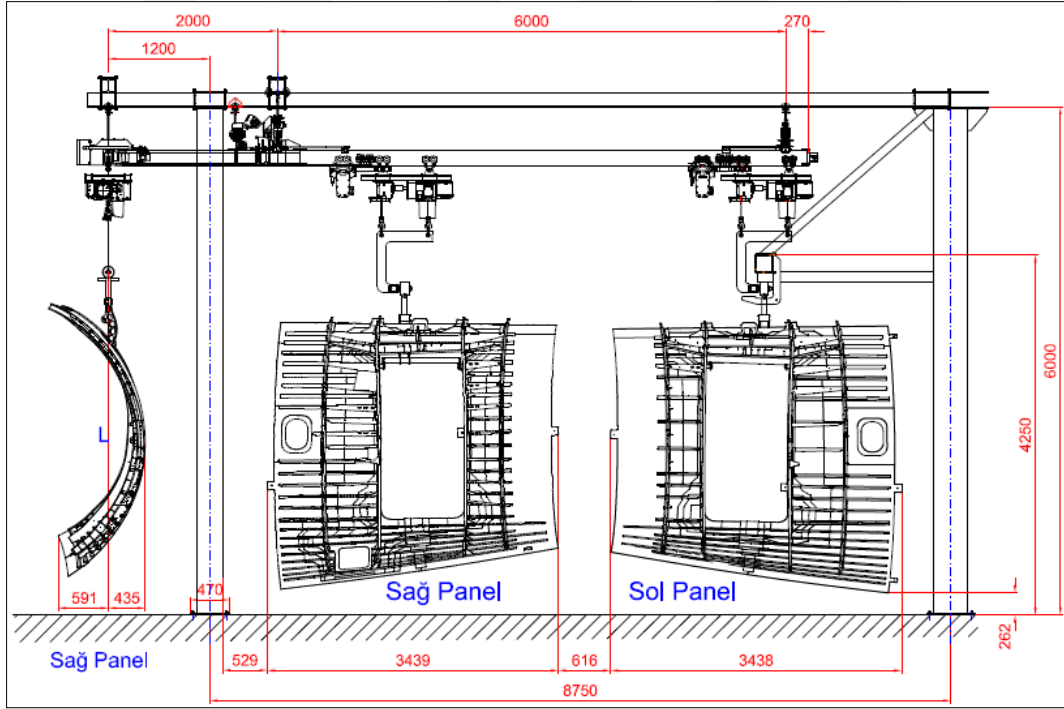
FRs-1712	DPs-1712
<i>FR</i> <sub>17121</sub> : Uç işlevci ile tut	<i>DP</i> <sub>17121</sub> : Tutucu aparat
<i>FR</i> <sub>17122</sub> : Eksenleri hareket ettir	<i>DP</i> <sub>17122</sub> : Servo motorlar
<i>FR</i> <sub>17123</sub> : Yatay eksen hareketi sağla	<i>DP</i> <sub>17123</sub> : Raylı yatay hareket mekanizması
<i>FR</i> <sub>17124</sub> : Robotu programla	<i>DP</i> <sub>17124</sub> : Çevrimiçi programlama sistemi
<i>FR</i> <sub>17125</sub> : Yazılım ile robot kontrolünü sağla	<i>DP</i> <sub>17125</sub> : Kuka KR360-500 & Siemens Kontrol 840D

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{17121} \\ FR_{17122} \\ FR_{17123} \\ FR_{17124} \\ FR_{17125} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{17121} \\ DP_{17122} \\ DP_{17123} \\ DP_{17124} \\ DP_{17125} \end{Bmatrix} \quad (4.35)$$

### Modüler vinç sistemi

Panellerin havadan taşınması için modüler vinçler, destek amacıyla bir veya daha fazla baş üstü kirişi kullanarak ağır yükleri kaldırmak ve hareket ettirmek için tasarlanan bir çeşit malzeme taşıma ekipmanıdır. Vinçlerin başlıca tipleri arasında köprülü vinçler, gezer vinç ve pergel vinçler bulunur. Her üç tip vinçte de Şekil 4.29'da görüldüğü üzere vincin baş üstü kirişinde uzunluğunca gezinen taşıyıcı yük arabası ve arabaya takılı en az bir palanga bulunur. Palangalar z ekseninde hareket sağlar. Kısım 19 projesinde panel taşıma için en uygun taşıma yöntemi tam otomatik monoray hatta sahip, tek kiriş askılı vinçtir. Sistem modülerdir projede üretim oranına bağlı olarak hatlar uzatılabilir. Panel tutma aparatları ile altı farklı panel için havadan taşıma prosesi yapılacaktır.



Şekil 4.29. Uçak gövde panelleri için havadan taşıma sistemi

Bu bilgilere istinaden FRs-1713 ve DPs-1713 parametreleri Çizelge 4.24.'teki gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.24. FRs-1713 ve DPs-1713 tasarım kompozisyonu

FRs-1713	DPs-1713
<i>FR<sub>17131</sub></i> : Panel ve vinç arası bağlantı sağla	<i>DP<sub>17131</sub></i> : Panel tutma aparatları
<i>FR<sub>17132</sub></i> : Paneli kaldır	<i>DP<sub>17132</sub></i> : Tek giriş askılı vinç
<i>FR<sub>17133</sub></i> : Paneli transfer et	<i>DP<sub>17133</sub></i> : Motorlu makas
<i>FR<sub>17134</sub></i> : Taşıma esnasında ceraskalı kilitle	<i>DP<sub>17134</sub></i> : Kilitleme mekanizması
<i>FR<sub>17135</sub></i> : Panelin kendi ekseninde dönmesini engelle	<i>DP<sub>17135</sub></i> : Çift kancalı elektrikli zincirli ceraskal
<i>FR<sub>17136</sub></i> : Paneli hat üzerinde taşı	<i>DP<sub>17136</sub></i> : Monoray hat

FR-DP tasarım matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{17131} \\ FR_{17132} \\ FR_{17133} \\ FR_{17134} \\ FR_{17135} \\ FR_{17136} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{17131} \\ DP_{17132} \\ DP_{17133} \\ DP_{17134} \\ DP_{17135} \\ DP_{17136} \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

#### 4.3.6. Perçinleme sistemleri

Perçinleme sistemlerinde FRs-172 ve DPs-172 parametreleri Çizelge 4.25.'teki gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.25. FRs-172 ve DPs-172 tasarım kompozisyonu

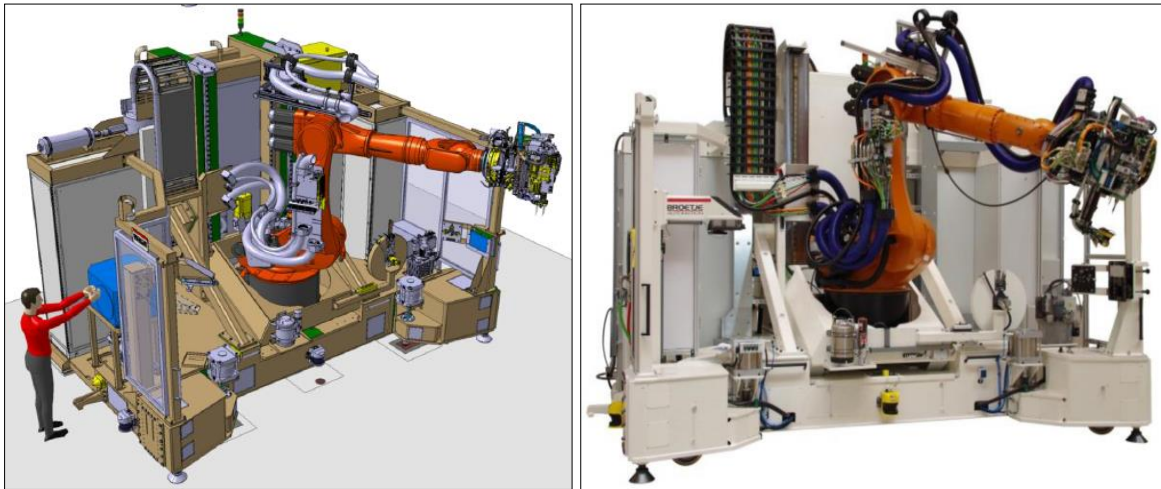
FRs-172	DPs-172
<i>FR<sub>1721</sub></i> : Robot ile perçinle	<i>DP<sub>1721</sub></i> : Mobil perçinleme robotu
<i>FR<sub>1722</sub></i> : Tezgâh ile perçinle	<i>DP<sub>1722</sub></i> : Otomatik perçin tezgâhı
<i>FR<sub>1723</sub></i> : Robot ile perçinsiz birleştir	<i>DP<sub>1723</sub></i> : Dönel sürtünmeli noktasal birleştirme robotu

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1721} \\ FR_{1722} \\ FR_{1723} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1721} \\ DP_{1722} \\ DP_{1723} \end{Bmatrix} \quad (4.37)$$

### Mobil perçinleme robotu

Delme ve perçinleme robotları uçak panelleri üzerinde takılacak olan bağlayıcıları yerleştiren veya delik delme işlemlerini otomatik olarak sayısal kodlar kullanarak yapan Şekil 4.30.'da gösterildiği üzere altı eksenli robotlardır. İş istasyonundan iş istasyonuna hareket kabiliyeti olan hidrolik tekerlekli bir platforma entegredir. Bu platforma sürtünmeyi azaltarak robotun hareketini kolaylaştırmak için hava yastıkları eklenmiştir. Robotun dikey hareketi 2 metredir ve hareket Z eksenindeki sistem ile sağlanmaktadır. Robotun delme uç işlevcisi 10 delik/dk kabiliyetindedir. Sıkma kuvveti 100-1200 N arasındadır. Delme hızı 5000-20000 rpm'dir. Maksimum 30 mm kalınlığındaki parçalarda kullanılır. Robot OSI, Composi-Lok, Maxibolt, Centrix, Hi-lok ve solid rivet tipi perçinleri yerleştirebilmektedir. Robotun perçin besleme ünitesi ve perçin kasetleri, referans delik tespit sistemi, yağlama üniteleri, normalite sensörleri, sızdırmazlık malzemesi besleme ünitesi, vakumlu talaş çekme ünitesi, kırılan-eksik çakı dedektörü, kayıp perçin dedektörü, tezgâh proses sayacı, talaş uzaklaştırıcısı, video monitör sistemi, pozisyonlama sistemi, kontrol göstergeleri, delik havşa ölçüm problemleri, operatör kontrol paneli otomatik perçin tezgâhlarına benzerdir. Mevcut Kısım 19 projesinde otomatik perçin tezgâhları kullanıldığından mobil robotlar bulunmamaktadır. Mobil robotlar alan ihtiyacını azaltacak ve mobiliteleri sayesinde üretim sisteminin esnekliğini artıracaktır.



Şekil 4.30. Mobil delik delme ve perçinleme robotu [67]

FRs-172 ve DPs-172 kompozisyonu Çizelge 4.26.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. FRs-172 ve DPs-172 tasarım kompozisyonu

FRs-1721	DPs-1721
<i>FR</i> <sub>17211</sub> : Robotu hareket ettir ve uygun pozisyona getir	<i>DP</i> <sub>17211</sub> : Mobil platform
<i>FR</i> <sub>17212</sub> : Panel ve yapısal parçaları perçin ile birleştir	<i>DP</i> <sub>17212</sub> : Uç işlevci perçinleme kafası

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{17211} \\ FR_{17212} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{17211} \\ FR_{17212} \end{Bmatrix} \quad (4.38)$$

FRs-17211 ve DPs-17211 kompozisyonu Çizelge 4.27.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27. FRs-17211 ve DPs-17211 tasarım kompozisyonu

FRs-17211	DPs-17211
<i>FR</i> <sub>172111</sub> : Platformu uygun pozisyona getir	<i>DP</i> <sub>172111</sub> : Hidrolik çok yönlü tekerlekler
<i>FR</i> <sub>172112</sub> : Robotu yere sabitle	<i>DP</i> <sub>172112</sub> : Pedestal noktası
<i>FR</i> <sub>172113</sub> : Robot hareket ederken yer ile sürtünmeyi azalt	<i>DP</i> <sub>172113</sub> : Hava yastıkları
<i>FR</i> <sub>172114</sub> : Robotun dikey yönde hareketini sağla	<i>DP</i> <sub>172114</sub> : Robot Z stroku
<i>FR</i> <sub>172115</sub> : Robotu merkezle	<i>DP</i> <sub>172115</sub> : Merkezleme silindiri

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

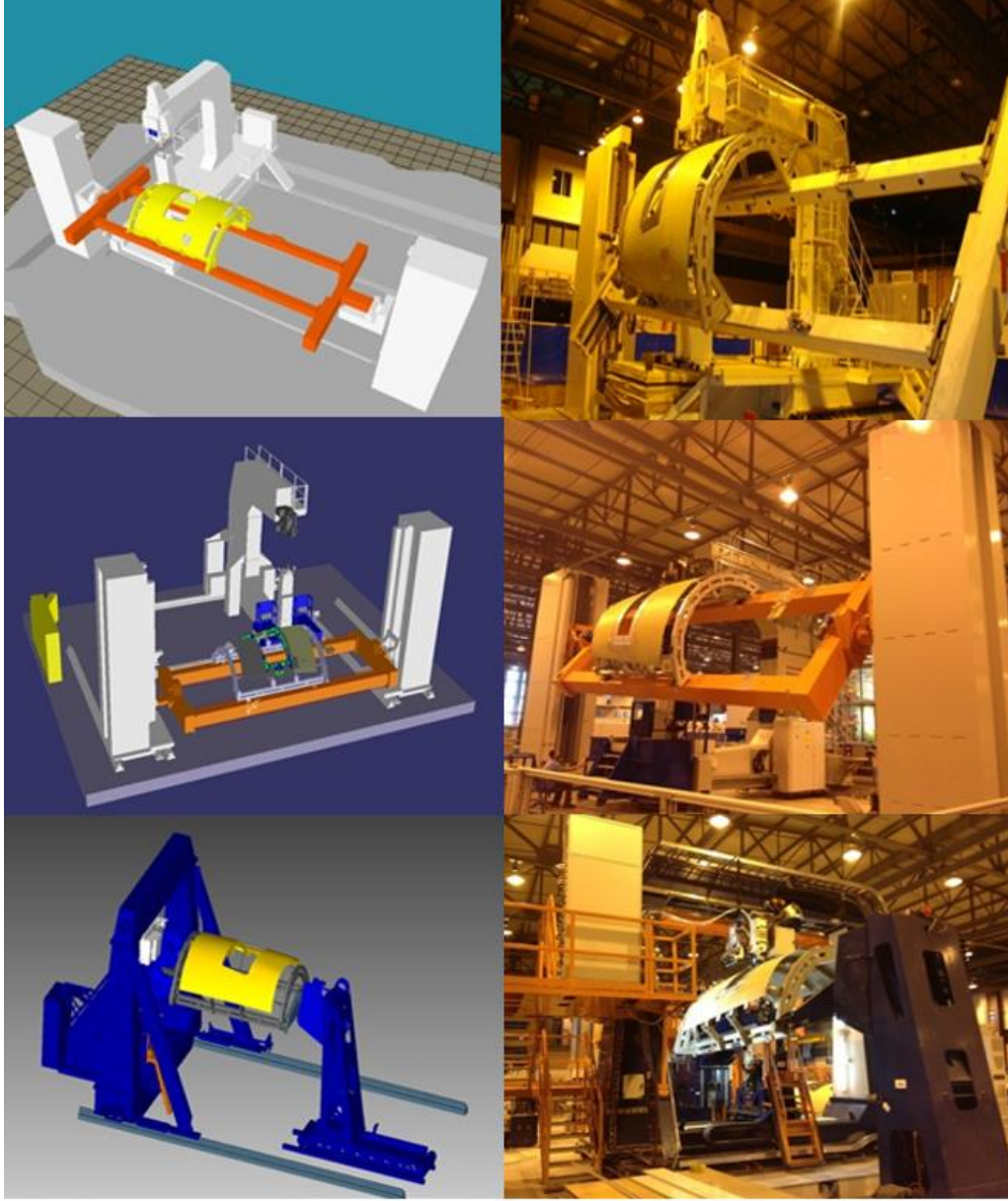
$$\begin{Bmatrix} FR_{172111} \\ FR_{172112} \\ FR_{172113} \\ FR_{172114} \\ FR_{172115} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{172111} \\ DP_{172112} \\ DP_{172113} \\ DP_{172114} \\ DP_{172115} \end{Bmatrix} \quad (4.39)$$

### Otomatik perçin tezgâhları

Otomatik perçin tezgâhları uçak panelleri üzerinde takılacak olan bağlayıcıları yerleştiren veya delik delme işlemlerini otomatik olarak sayısal kodlar kullanarak yapan tezgâhlardır. Yolcu uçağı temel gövde yapılarının kabuk, destek çıtası, gövde kaburgası ve diğer destek parçalarının montajı için kullanılmaktadır. Otomatik perçin tezgâhlarının tasarım temelleri bağlayıcılar, perçinleme ekipmanları ve montaj tekniklerindeki gelişmeler nedeniyle farklı bir boyut kazanmıştır. Başlangıçta sadece üniversal ve havşa başlı perçinler otomatik olarak yerleştirilirken modern otomatik perçin tezgâhlarıyla hi-lock perçinler ve özel perçinler de bu tezgâhların kabiliyet alanına girmiştir. Ayrıca alt montajlar, büyük uçak gövde panelleri, kanatların montajı da kolaylıkla yapılabilmektedir [68].

Şekil 4.31.'de gösterilen otomatik perçin tezgâhları hızlı, seri, çevrimdışı programlama sistemleri ve simülasyonlar sayesinde de neredeyse hatasız çalışır fakat oldukça hacimlidir ve büyük bir çalışma alanı kaplar. Delik delme, havşa açma, sızdırmazlık malzemesi sürme, perçin başı ezme, ölçüm ve kontroller için kullanılır. Tüm hareketleri 12 eksen ile kontrol edilen tam otomatik CNC kontrollü bu tezgâh, Siemens 840D dijital kontrol sistemi ile çalışır. Sensörleri kapalı iken düz plaka üzerinde proses çevrimi 15-20 perçin/dk adet, sensörler açık iken uçak paneli üzerinde 6-8 perçin/dakika' dır. Tezgâhta ayrıca yüksek hızlı (20000 rpm) çakı, otomatik çakı ve perçin parmak değıştirici, çakı için mikro yağlama sistemi, sızdırmazlık elemanı uygulama sistemi için kontrolör, normalite sensörleri, referans delik algılama gibi birçok teknolojik sistem bulunur.

Kısım 19 projesinde de mevcut durumda otomatik perçin tezgâhları kullanılmaktadır. Bu tezgâh ve fikstürler yeniden yapılandırılabilirdiğı, otomatik anvil değıştirme sistemi gibi ihtiyaca yönelik farklı özellikler de entegre edildiğı zaman verimlilik artacaktır.



Şekil 4.31. Otomatik perçin tezgâhları [69]

Otomatik perçin tezgâhları ile ilgili temel FR-DP parametreleri Çizelge 4.28.'de açıklanmıştır.

Çizelge 4.28. FRs-17212 ve DPs-17212 tasarım kompozisyonu

FRs-17212	DPs-17212
<i>FR</i> <sub>172121</sub> : Panel ile pozisyonu ayarla	<i>DP</i> <sub>172121</sub> : Pozisyon ve normalite sensörü
<i>FR</i> <sub>172122</sub> : Matkabı yağla	<i>DP</i> <sub>172122</sub> : Yağlama ünitesi
<i>FR</i> <sub>172123</sub> : Geçici perçin deliklerini bul	<i>DP</i> <sub>172123</sub> : Referans delik tespit sistemi

Çizelge 4.28. (devam) FRs-17212 ve DPs-17212 tasarım kompozisyonu

<i>FR</i> <sub>172124</sub> : Paneli üstten destekle	<i>DP</i> <sub>172124</sub> : Baskı plakası
<i>FR</i> <sub>172125</sub> : Uygun matkabı seç ve del	<i>DP</i> <sub>172125</sub> : Besleme ve değiştirme ünitesi
<i>FR</i> <sub>172126</sub> : Deliği ölç	<i>DP</i> <sub>172126</sub> : Delik probu
<i>FR</i> <sub>172127</sub> : Uygun çapta del	<i>DP</i> <sub>172127</sub> : Delme ünitesi
<i>FR</i> <sub>172128</sub> : Perçinleri yerleştir	<i>DP</i> <sub>172128</sub> : Perçin besleme sistemi ve enjektörü
<i>FR</i> <sub>172129</sub> : Talaşları uzaklaştır	<i>DP</i> <sub>172129</sub> : Talaş vakum ünitesi

Bu bilgilere istinaden FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{172121} \\ FR_{172122} \\ FR_{172123} \\ FR_{172124} \\ FR_{172125} \\ FR_{172126} \\ FR_{172127} \\ FR_{172128} \\ FR_{172129} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{172121} \\ DP_{172122} \\ DP_{172123} \\ DP_{172124} \\ DP_{172125} \\ DP_{172126} \\ DP_{172127} \\ DP_{172128} \\ DP_{172129} \end{Bmatrix} \quad (4.40)$$

FRs-1722 ve DPs-1722 kompozisyonu Çizelge 4.29.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.29. FRs-1722 ve DPs-1722 tasarım kompozisyonu

FRs-1722	DPs-1722
<i>FR</i> <sub>17221</sub> : Panel ve yapısal parçaları perçin ile birleştir	<i>DP</i> <sub>17221</sub> : Üst perçinleme kafası
<i>FR</i> <sub>17222</sub> : Perçinleri ez ve destek sağla	<i>DP</i> <sub>17222</sub> : Alt perçinleme kafası
<i>FR</i> <sub>17223</sub> : Paneli uygun pozisyonda tut	<i>DP</i> <sub>17223</sub> : Panel konumlayıcı

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{17221} \\ FR_{17222} \\ FR_{17223} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{17221} \\ FR_{17222} \\ FR_{17223} \end{Bmatrix} \quad (4.41)$$

*DP*<sub>17221</sub>'de bahsedilen Şekil 4.32.'de gösterilen üst perçinleme kafası otomatik perçin tezgâhlarının teknoloji ve uygulama açısından en karmaşık, maliyeti en yüksek kısmıdır.

Mesafe ve normalite sensörleri, basınçlı üst baskı plakası, çakı ünitesi, sızdırmazlık malzemesi besleme ünitesi, çakı ve üst anvil değiştirme sistemi, perçin yerleştirme sistemi, perçin delik tespit sistemi, vakumlu talaş çekme ünitesi gibi birçok hayati fonksiyonu bünyesinde barındırır. Üst perçinleme kafasının bu teknolojik sistemleri ve üniteleri sayesinde NC programdan alınan veriler, kontrol sistemiyle entegre olarak perçinleme işlemleri kusursuz gerçekleştirilir.



Şekil 4.32. Üst perçinleme kafası [70]

FRs-17221 ve DPs-17221 kompozisyonu Çizelge 4.30.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.30. FRs-17221 ve DPs-17221 tasarım kompozisyonu

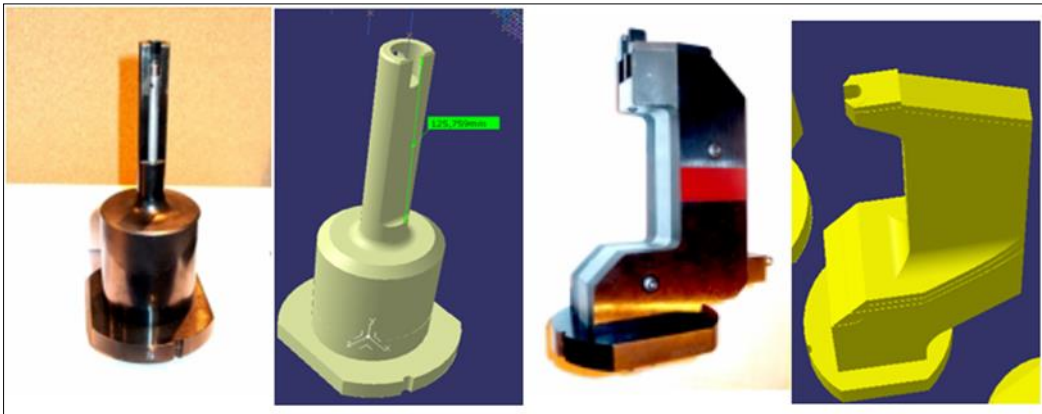
FRs-17221	DPs-17221
<i>FR</i> <sub>172211</sub> : Panel ile mesafeyi ayarla	<i>DP</i> <sub>172211</sub> : Mesafe ve normalite sensörü
<i>FR</i> <sub>172212</sub> : Matkabı yağla	<i>DP</i> <sub>172212</sub> : Yağlama ünitesi
<i>FR</i> <sub>172213</sub> : Geçici perçin deliklerini bul	<i>DP</i> <sub>172213</sub> : Referans delik tespit sistemi
<i>FR</i> <sub>172214</sub> : Paneli üstten destekle	<i>DP</i> <sub>172214</sub> : Baskı plakası
<i>FR</i> <sub>172215</sub> : Uygun matkabı seç ve del	<i>DP</i> <sub>172215</sub> : Besleme ve değiştirme ünitesi
<i>FR</i> <sub>172216</sub> : Uygun çapta del	<i>DP</i> <sub>172216</sub> : Delme ünitesi
<i>FR</i> <sub>172217</sub> : Perçinleri yerleştir	<i>DP</i> <sub>172217</sub> : Perçin enjektörü
<i>FR</i> <sub>172218</sub> : Sızdırmazlık macunu uygula	<i>DP</i> <sub>172218</sub> : Macun uygulayıcısı
<i>FR</i> <sub>172219</sub> : Talaşları uzaklaştır	<i>DP</i> <sub>172219</sub> : Talaş vakum ünitesi

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{172211} \\ FR_{172212} \\ FR_{172213} \\ FR_{172214} \\ FR_{172215} \\ FR_{172216} \\ FR_{172217} \\ FR_{172218} \\ FR_{172219} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{172211} \\ DP_{172212} \\ DP_{172213} \\ DP_{172214} \\ DP_{172215} \\ DP_{172216} \\ DP_{172217} \\ DP_{172218} \\ DP_{172219} \end{pmatrix} \quad (4.42)$$

DP<sub>17222</sub>'de bahsedilen alt perçinleme kafası olan Şekil 4.33.'te gösterilen anviller tezgâhın en kritik ve en önemli parçalarından biridir. Anviller delme, sızdırmazlık malzemesi sürme, perçin yerleştirme ve perçin ezme proseslerinde parça yüzeyine dik olarak uyguladığı kuvvet sayesinde montajı yapılacak parçalar arasına talaş girmesini engeller, universal tip perçinlerde içindeki pnömatik hareketli sistem sayesinde perçin ezmeyi sağlar. Farklı perçin tipleri, farklı çaptaki delikler, uçak parçası üzerindeki geometri anvil kullanımını etkiler. Bu durumlara bağlı olarak farklı anviller kullanılır. Tezgâhta kullanılan anvil çeşitleri şunlardır:

- 5/32 “Ofset Ezici Anvil (Universal Tip Perçinler için)
- 3/16 “Ofset Ezici Anvil (Universal Tip Perçinler için)
- 5/32 “Düz Ezici Anvil (Universal Tip Perçinler için)
- 3/16 “Düz Ezici Anvil (Universal Tip Perçinler için)
- Ofset Delici Anvil (Hi-lok Tip Perçinler için)
- Düz Delici Anvil (Hi-lok Tip Perçinler için)



Şekil 4.33. Düz ve ofset anviller

Operatörlerin tezgâh ile gerçekleştirdiği işlemlerin tümü Şekil 4.34.'teki operatör kontrol paneli aracılığıyla gerçekleştirilir. NC programdan alınan veriler doğrultusunda montaj prosesleri gerçekleştirilirken operatörün yapması gereken işlemler (referans delik takibi, anvil değiştirme, tezgâh ayarları gibi) operatör kontrol ekranlarında gösterilir. Operatör tezgâh hızını, anlık tezgâh koordinatlarını, normalite sensörlerinin durumunu, hangi tip perçin çakılacağı, referans delikleri ve diğer işlemleri takip eder.



Şekil 4.34. Operatör kontrol paneli

Şekil 4.35.'te gösterilen perçin besleme sistemi; kaset rafı, kaset yerleştirme bölgeleri, perçin kasetleri ve kod levhasından oluşan, NC programdan alınan veriler doğrultusunda prosese uygun tipte ve boydaki perçini, tezgâhın üst perçinleme kafasına ileten sistemdir. Perçin tezgahlarında panel montajına başlamadan önce proses adımları önceden belirlendiği için operatörler tarafından tezgâh ayarları yapılırken perçin kasetleri de prosese uygun perçinlerle doldurulur. Perçin rafına yerleştirilen kaset sayısı 24 adete kadar çıkabilir. Her bir kaset içinde perçin boyuna göre 800-1500 adet perçin bulunur.



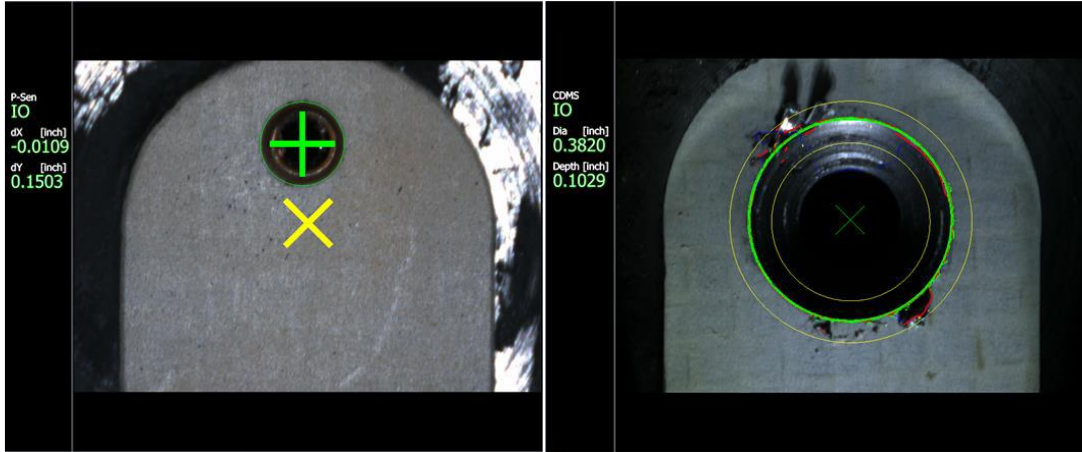
Şekil 4.35. Perçin besleme ünitesi ve perçin kasetleri [70]

Şekil 4.36.'da gösterilen kenar mesafe izleyici; aygıtları alt anvilin döner tablasına yerleştirilir ve destek çıtalrı boyunca bağlayıcıların aynı hat üzerinde yerleştirilmesini sağlar. Destek çıtalrının yanal yüzeyinden anvili 10 mm öteleyerek hep aynı mesafede prosesin yapılması mantığıyla çalışır. Referans deliklerde sıfırlanan koordinatlara yardımcı olarak görev yapar. Yazılım sistemindeki gelişmelerle bu cihazın yaptığı işlevi programlamada iki noktadan senkronizasyon ya da çizgisel doğrulama gibi komutlar yapabilmektedir. Bu komutlar iki referans noktası arasındaki en kısa mesafeyi hesaplayarak doğrusal olarak perçinlerin pozisyonlarını ayarlamaktadır.



Şekil 4.36. Kenar mesafe izleyici cihazı

Referans delik tespit sistemi; uçak panelindeki yapısal elemanların perçin tezgâhında geçici olarak tutturulmasını sağlayan referans delikler tezgâhta kameralı referans delik sistemiyle tespit edilir. Kamera sisteminin aldığı görüntü tezgâhın kontrol sistemindeki binlerce görüntüyle eşleştirilir, birbirine geometrik olarak en çok benzeyen Şekil 4.37.'de gösterilen görüntü eşleştirmesi yapılarak tezgâh referans deliğinin merkezine doğru hareket eder böylece perçinler hizalı bir biçimde, belirli bir doğrultuda yerleştirilerek sapmalar minimize edilir.



Şekil 4.37. Referans delik tespit monitörü

Sızdırmazlık malzemesi besleme ünitesi; her perçin için delme ve havşa açma prosesleri sonrasında havşa ağzına dört taraftan limitlere göre belirli miktarlarda sızdırmazlık malzemesi besler. Vakumlu talaş çekme ünitesi; panelde veya test plakalarında delme sonrası oluşan talaşları ve talaş partiküllerini vakum sistemiyle toplar. Kırılan-eksik çakı dedektörü; delme operasyonları öncesinde fotoelektrik döngü komutları eksik veya kırılan

çakıyı tespit eder, prosesi otomatik olarak durdurur, tezgâhın ve parçanın zarar görmesini engeller. Kayıp perçin dedektörü; delme operasyonları öncesinde fotoelektrik döngü komutları tezgâhın üst kısmındaki perçin parmaklarının boş olduğu durumlarda bu durumu tespit eder, prosesi durdurur. Tezgâhın boşa hareket etmesini engeller. Yağlama ünitesi; delme sırasında çakının soğuması için sis biçiminde yağ püskürtür. Tezgâh proses sayacı; tezgâh proses zamanlarını, sayılarını gösterir ve kaydeder. Talaş uzaklaştırıcısı; delme esnasında uçak yüzeyinde baskı plakası etrafında oluşan metal partikülleri uzaklaştırır. Video monitör sistemi; tezgâh çalışırken operatörün çeşitli açılardan tezgâhı ve prosesleri monitör sistemleriyle takip etmesine imkân verir. Normalite sensörleri; tezgâhta perçinleme proseslerinin düzgün yapılabilmesi için çakıların, perçin sistemlerinin, perçinlerin ve anvilin uçak yüzeyine dik olması gerekir. Tezgâhın üst kısmında genellikle dört adet bulunan normalite sensörleri tezgâh eksenlerini koordine ederek konturlu uçak yüzeyinin takip edilmesini sağlar. Uçak parçası pozisyonlama sistemi; uçak parçasını perçinleme prosesleri için tezgâh koordinatlarını düzenleyerek uygun pozisyona getirir. Kontrol göstergeleri; sistem parametrelerini, gösterge durumlarını, hata ve uyarı mesajlarını gösterir. Delik-havşa ölçüm problemleri; delme ve havşa açma prosesleri tamamlandıktan sonra deliklerin ve yerleştirilen perçinlerin havşa yüksekliklerini ölçerek hafızasındaki değerle karşılaştırır, bu değerler uyumsuzluk gösterirse tezgâhı durdurarak uyarı verir. Operatör delik ve havşa ayarlarını tekrar yaparak ölçüm değerlerinin limitler içerisinde olmasını sağlar. Uyarı mesajları elimine edilir. Bu bilgilere istinaden FRs-17222 ve DPs-17222 kompozisyonu Çizelge 4.31.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.31. FRs-17222 ve DPs-17222 tasarım kompozisyonu

FRs-17222	DPs-17222
<i>FR</i> <sub>172221</sub> : Perçinleri ez ve panele destek sağla	<i>DP</i> <sub>172221</sub> : Düz ve ofset anvil
<i>FR</i> <sub>172222</sub> : Anvil açısını ayarla	<i>DP</i> <sub>172222</sub> : Döner ünite
<i>FR</i> <sub>172223</sub> : Paneli ve tezgâhı kontrol et	<i>DP</i> <sub>172223</sub> : Operatör kontrol kamerası
<i>FR</i> <sub>172224</sub> : Anvilin z ekseni yönünde hareketini sağla	<i>DP</i> <sub>172224</sub> : Kaldırma ünitesi
<i>FR</i> <sub>172225</sub> : Perçinlerin aynı hizada olmasını sağla	<i>DP</i> <sub>172225</sub> : Program ve kenar mesafe izleyici

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{172221} \\ FR_{172222} \\ FR_{172223} \\ FR_{172224} \\ FR_{172225} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{172221} \\ DP_{172222} \\ DP_{172223} \\ DP_{172224} \\ DP_{172225} \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

FRs-17223 ve DPs-17223 kompozisyonu Çizelge 4.32.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.32. FRs-17223 ve DPs-17223 tasarım kompozisyonu

FRs-17223	DPs-17223
<i>FR</i> <sub>172231</sub> : Üst perçinleme kafasının hareketini sağla	<i>DP</i> <sub>172231</sub> : C kulesi
<i>FR</i> <sub>172232</sub> : Paneli pozisyonla	<i>DP</i> <sub>172232</sub> : Z ve W kuleleri
<i>FR</i> <sub>172233</sub> : Operatörler ile tezgâhı kontrol et	<i>DP</i> <sub>172233</sub> : Operatör kontrol ünitesi
<i>FR</i> <sub>172234</sub> : Perçinleri tezgâha besle	<i>DP</i> <sub>172234</sub> : Otomatik perçin besleme sistemi
<i>FR</i> <sub>172235</sub> : Perçinleri depola	<i>DP</i> <sub>172235</sub> : Perçin kasetleri
<i>FR</i> <sub>172236</sub> : X ve Y yönünde hareket sağla	<i>DP</i> <sub>172236</sub> : X ve Y yönlü ray sistemi

Bu bilgiler doğrultusunda FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{172231} \\ FR_{172232} \\ FR_{172233} \\ FR_{172234} \\ FR_{172235} \\ FR_{172236} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{172231} \\ DP_{172232} \\ DP_{172233} \\ DP_{172234} \\ DP_{172235} \\ DP_{172236} \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

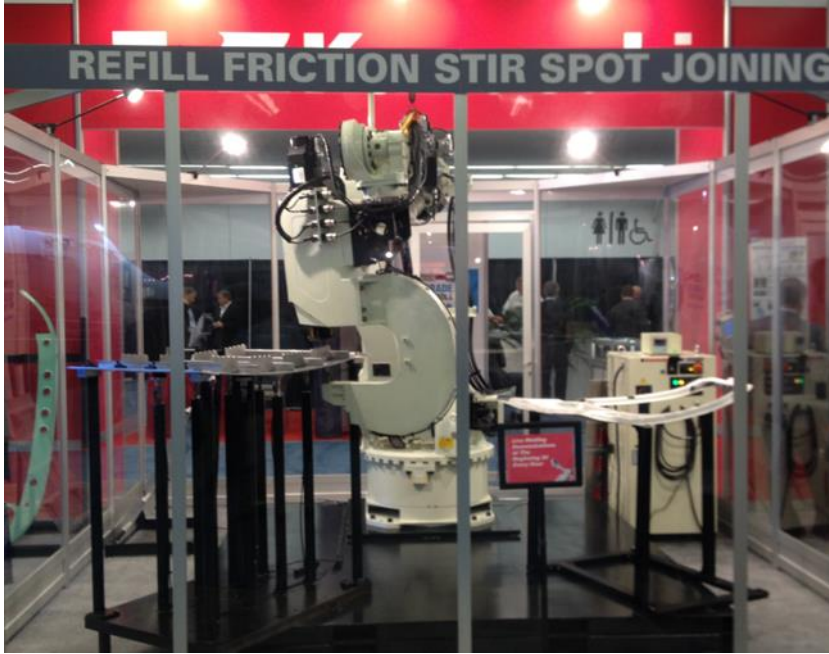
#### Dönel sürtünmeli noktasal birleştirme robotu

Havacılık montaj proseslerinde mevcut durumda DP<sub>1721</sub> ve DP<sub>1722</sub> tasarım parametrelerinde detaylı açıklanan perçinleme robotları ve otomatik perçin tezgâhları standart ve spesifikasyonları karşıladığı için sıkça kullanılmaktadır. Yine de perçinleme prosesi delme, çapak alma, perçin yerleştirme, perçin ezme gibi tüm montaj proses maliyetini etkileyen bir dizi yoğun işlemlerden oluşur. Bazı perçin başları çıkıntı oluşturarak hem yüzey kalitesini

etkiler hem de türbülans oluşmasına neden olur. Perçin bağlantılarının avantajlarını ve dezavantajlarını kısaca açıklarsak;

- Birleştirilecek parçaların delinmesi sebebiyle malzeme mukavemetinin azalması,
- Perçinler nedeniyle malzeme israfı ve ağırlık artışı,
- İşçilik yönünden fazla zaman alması,
- Kaynak bağlantılarında olduğu gibi birleşme yerinde ergime sebebiyle kristal yapıdaki değişimlerin ortaya çıkmaması,
- Isıl etkilerden dolayı kontrol edilemeyen yüksek iç gerilmelerin ve çarpılmaların olmaması,
- Yoğun kalite kontrol yöntemlerine gereksinim duymaması ve kalite kontrol her bir perçin için yapıldığından zaman alması.

Montaj proseslerinde Şekil 4.38.'de gösterilen dönel sürtünmeli noktasal birleştirme robotunun kullanılması perçin ve perçinleme proseslerine ilişkin tüm dezavantajları ortadan kaldıracaktır.



Şekil 4.38. Dönel sürtünmeli noktasal birleştirme robotu

FRs-1723 ve DPs-1723 kompozisyonu Çizelge 4.33.'te gösterilmiştir.

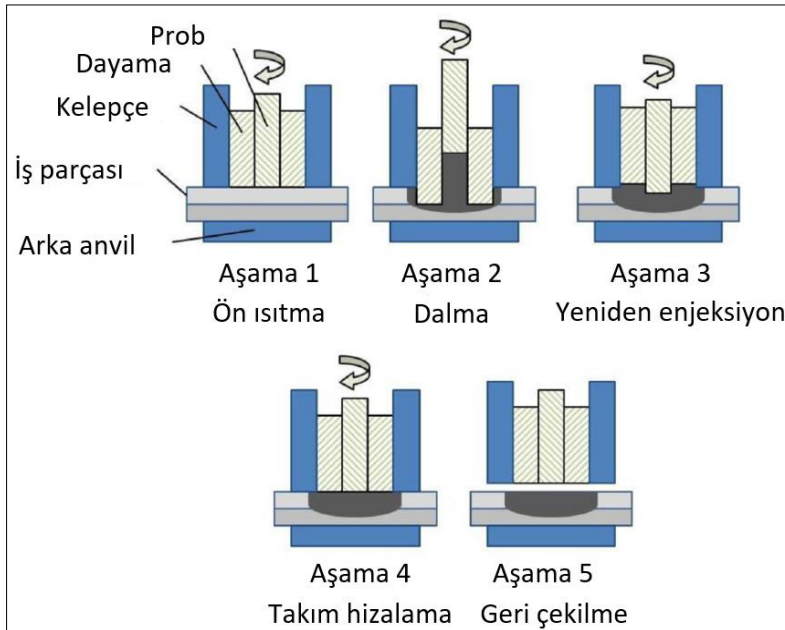
Çizelge 4.33. FRs-1723 ve DPs-1723 tasarım kompozisyonu

FRs-1723	DPs-1723
<i>FR</i> <sub>17231</sub> : Robotu hareket ettir ve uygun pozisyona getir	<i>DP</i> <sub>17231</sub> : Mobil platform
<i>FR</i> <sub>17232</sub> : Panel ve yapısal parçaları perçin ile birleştirir	<i>DP</i> <sub>17232</sub> : Uç İşlevci Sürtünmeli Dönel Birleştirme

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

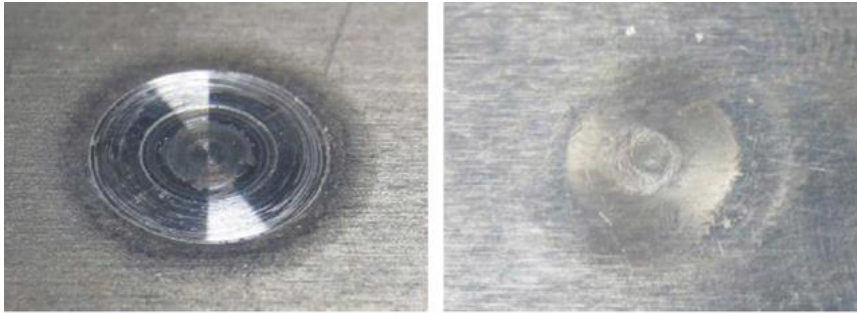
$$\begin{Bmatrix} FR_{17211} \\ FR_{17212} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} FR_{17211} \\ FR_{17212} \end{Bmatrix} \quad (4.45)$$

Şekil 4.39.'da proses aşamaları gösterilen teknoloji, birleştirilecek alüminyum uçak parçaları arasında moleküler düzeyde bağ oluşturan termo-mekanik bir teknolojidir. RFSJ bu bağlantıyı kurmak için herhangi bir dolgu maddesi ya da yabancı bir malzeme kullanmadığı için montaj yapılarında ekstra bir ağırlık oluşturmaz. Katı sıvı faz geçişleri olmadığı için sıvılaştırma veya katılaşmaya bağlı malzeme bozulmaları olmaz. Konvansiyonel noktasal kaynağın aksine delik delmeden mükemmel yüzeye sahip noktasal birleşim oluşturur.



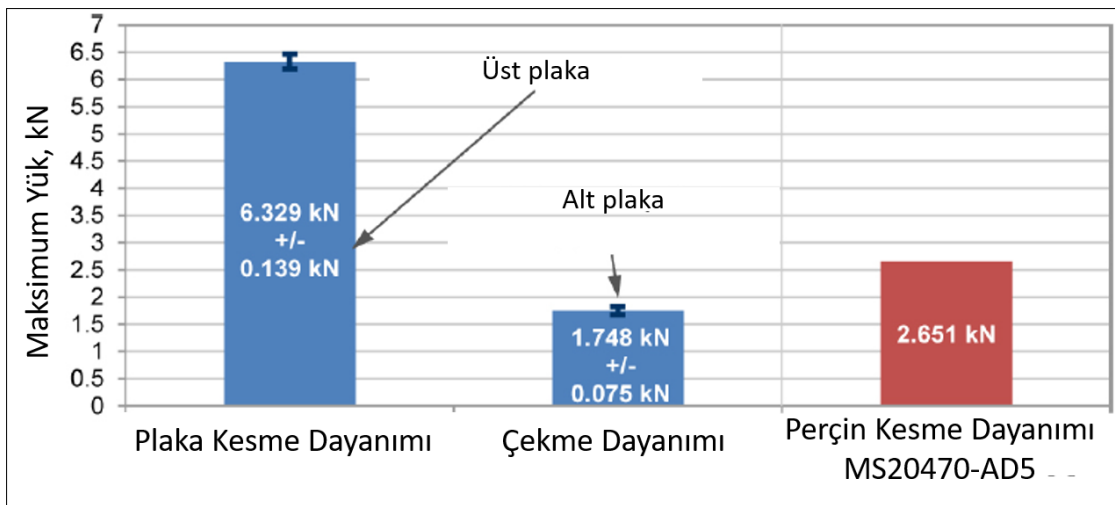
Şekil 4.39. RFSJ proses aşamaları [71]

Proseste birinci aşamada, robot uç işlevcisi tarafından, döner kaynak aparatı yüzey ile temas etmeden parça hafifçe sıkılır. Daha sonra döner kaynak aparatı belirli zaman aralıklarında yüzey ile temas ederek sürtünme vasıtasıyla parçaya ön ısıtma uygular. İkinci aşamada, shoulder ve probe kısmı devreye girer. Shoulder yüzeyle temas ederken probe geri çekilir ve boşluk oluşturarak alttaki malzemenin shoulder tarafından oluşturulan boşluğu doldurmasını sağlar. Bu prosese shoulder plunging adı verilir. Yüksek dalma kuvveti gerektirir. Yine de bu proses dolan malzeme hacmini ayarlayarak daha mukavim bağlantılar oluşturabilir.



Şekil 4.40. RFSJ prosesinde parçanın üst ve alt yüzeyi

Üçüncü aşamada, dönen probe ve shoulder dönme yönünün tersine hareket ederek, dolan malzemeyi tekrar geri enjekte eder ve parçayı eski formuna sokar. Yüzey kalitesini geliştirmek için parça shoulder ve probe aynı hizaya gelene kadar ters yönde hareketini sürdürür. Dördüncü aşamada, probe ve shoulder parça üzerinde Şekil 4.40.'ta gösterilen final yüzeyi oluşturmak için artık aynı hizaya gelmiştir. Beşinci aşamada, robot uç işlevcisinde bulunan döner kaynak aparatı parçayı serbest bırakır [71].



Şekil 4.41. MS20470-AD5 tipi perçinde mukavemet değerleri [71]

Şekil 4.41.'de gösterilen çalışma sonuçları optimize edilmiş RFSJ proses geliştirme metodolojisinin uygulandığı birincil uçak yapılarındaki bağlantı bölgelerinin mekanik ve metalürjik özelliklerinin uygun olduğunu göstermektedir [71]. FRs-17231 ve DPs-17231 kompozisyonu Çizelge 4.34.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.34. FRs-17231 ve DPs-17231 tasarım kompozisyonu

FRs-17231	DPs-17231
<i>FR</i> <sub>172311</sub> : Platformu uygun pozisyona getir	<i>DP</i> <sub>172311</sub> : Hidrolik çok yönlü tekerlekler
<i>FR</i> <sub>172312</sub> : Robotu yere sabitle	<i>DP</i> <sub>172312</sub> : Pedestal noktası
<i>FR</i> <sub>172313</sub> : Robot hareket ederken yer ile sürtünmeyi azalt	<i>DP</i> <sub>172313</sub> : Hava yastıkları
<i>FR</i> <sub>172314</sub> : Robotun dikey yönde hareketini sağla	<i>DP</i> <sub>172314</sub> : Robot z eksenli hareket mesafesi
<i>FR</i> <sub>172315</sub> : Robotu merkezle	<i>DP</i> <sub>172315</sub> : Merkezleme silindiri

Bu bilgiler doğrultusunda FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} FR_{172111} \\ FR_{172112} \\ FR_{172113} \\ FR_{172114} \\ FR_{172115} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{172111} \\ DP_{172112} \\ DP_{172113} \\ DP_{172114} \\ DP_{172115} \end{Bmatrix} \quad (4.46)$$

FRs-17232 ve DPs-17232 kompozisyonu Çizelge 4.35.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.35. FRs-17232 ve DPs-17232 tasarım kompozisyonu

FRs-17232	DPs-17232
<i>FR</i> <sub>172321</sub> : Panel ile pozisyonu ayarla	<i>DP</i> <sub>172321</sub> : Pozisyon ve normalite sensörü
<i>FR</i> <sub>172322</sub> : Paneli üstten destekle ve aparatı ısıt	<i>DP</i> <sub>172322</sub> : Baskı plakası ve ısıtma aparatı
<i>FR</i> <sub>172323</sub> : Panel baskı kuvvetini ayarla	<i>DP</i> <sub>172323</sub> : Piezoseramik kuvvet sensörleri
<i>FR</i> <sub>172324</sub> : Sürtünme ile birleştir	<i>DP</i> <sub>172324</sub> : RFSJ Perçinsiz birleştirme kafası

Bu bilgiler doğrultusunda, FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{172321} \\ FR_{172322} \\ FR_{172323} \\ FR_{172324} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{172321} \\ DP_{172322} \\ DP_{172323} \\ DP_{172324} \end{pmatrix} \quad (4.47)$$

FRs-18 ve DPs-18 kompozisyonu Çizelge 4.36.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.36. FRs-18 ve DPs-18 tasarım kompozisyonu

FRs-18	DPs-18
<i>FR</i> <sub>181</sub> : Perçinleri yerleştir	<i>DP</i> <sub>181</sub> : Manuel perçinleme modülü
<i>FR</i> <sub>182</sub> : Somunları yerleştir	<i>DP</i> <sub>182</sub> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR</i> <sub>183</sub> : Belirtilen torkta sık	<i>DP</i> <sub>183</sub> : Manuel operatör ve araç-gereç seti
<i>FR</i> <sub>184</sub> : Üretimi artırmak için manuel perçinleme hızını artır	<i>DP</i> <sub>184</sub> : Operatör sayısını artır

Bu bilgiler doğrultusunda FR-DP tasarım matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{pmatrix} FR_{1811} \\ FR_{1812} \\ FR_{1813} \\ FR_{1814} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{1811} \\ DP_{1812} \\ DP_{1813} \\ DP_{1814} \end{pmatrix} \quad (4.48)$$

#### 4.3.7. Montaj sistemi tasarım alternatifleri sonuçları

Yolcu uçağı gövde yapıları montajı için girdi kısıtları göz önünde bulundurularak müşteri gereksinimleri, fonksiyonel gereksinimlere (FRs), tasarım parametrelerine (DPs) ve proses değişkenlerine ayrıştırılmıştır. Ayrışım işlemi ayrık sistem oluşturmaya yöneliktir. Ayrık sistem tasarım sistemi parametrelerinin birbirlerinden bağımsız olması anlamına gelir. Geliştirilen metodolojide FRs ve DP's in ilk seviyeleri operasyonları, parça ailesini ve kapasiteyi kapsamaktadır.

*FR*<sub>0</sub>: Talep Miktarı Kadar Yolcu Uçağı Gövdesi Üret

*DP*<sub>0</sub>: Esnek Gövde Montaj Hücresi

FR<sub>0</sub> ve DP<sub>0</sub>' in alt grubu ve montaj sistemi için birinci seviye olan, müşteri gereksinimlerini karşılayan ve girdi kısıtlarını da içeren FR<sub>1</sub> ve DP<sub>1</sub> detaylandırılmıştır.

*FR<sub>1</sub>*: Talep Miktarı Kadar Yolcu Uçağı Gövde Paneli Üret

*DP<sub>1</sub>*: Esnek ve Ölçeklenebilir Gövde Paneli Montaj Hücresi

Tasarım parametrelerine odaklanılarak metodoloji tasarımcı için yeniden yapılandırılabilirlik karakteristiklerine ilişkin bir çözüm sunmaktadır. Tasarımın temeli oluşturulduktan sonra FRs ve DPs' ler için artık alt gruplara ayırışım işlemine başlanmıştır. Müşteri taleplerini en iyi karşılayan seçenekler tasarlanarak alt gruplar oluşturulmuştur. İkinci seviye FRs ve DPs' ler birincilerle uyum içindedir, müşteri talepleri ve parça ailelerine özeldir. Her gereksinim alt gruplara ayrıştırılarak detaylandırılmıştır. Özelleştirilebilirlik ve ölçeklenebilirlik tasarım parametrelerinin içerisine gömülmüştür. Tasarım ayırışımı tasarımın daha detaylı bir şekilde ifade edildiğı zigzag yöntemi ile alt gruplara ayrılarak detaylandırılmış ve fiziksel, anlamlı bir çözüm elde edilmesi amaçlanmıştır. Mevcut bir çözüm somutlaştırılana kadar ve daha fazla ayırışım fiziksel olarak mümkün olmayana kadar parametrelerin ayırışımına devam edilmiştir.

En alt seviyedeki fonksiyon gereksinimleri ve tasarım parametreleri spesifik bir parça özelliğı, mekanizma ya da sisteme karşılık gelmektedir. Tezde altıncı seviyeye kadar olan tasarım hiyerarşisi ayırışımı yapılmıştır.

FRs ve DPs lere göre altıncı seviyeye kadar ayırışımı yapılan metodolojide tasarım aktivitelerindeki karmaşıklığı yönetebilmek için referans oluşturan tasarım süper matrisi hazırlanmıştır. Süper matris 136x136 boyutlarında bir matristir. Büyük bir matris olduğundan yer kısıtından dolayı geliştirilen tasarım süper matrisinin bir bölümü Şekil 4.42.'de örnek olarak gösterilmiştir. Matris FR-DP arasındaki ilişkileri ve montaj sisteminin birbiri ile aksiyom bazındaki ilişkilerini göstermektedir.



## 5. MONTAJ SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU

Dijital üretim; bilgisayarlı tasarım araçları, modelleme, simülasyon ve montaj yöntemlerini birleştirir. Montaj süreçlerinin sanal modelleri, montaj sistemlerinin tasarımı için güvenilir bir araç olmuştur. Simülasyon çözümlerinin montaj sistemlerine uygulanması, üretim hatalarının ve maliyetlerinin azaltılmasına, kalite ve verimliliğin artmasına, teslimat sürelerinin kısaltılmasıyla pazara daha kısa sürede ulaşılmasına imkân sağlar. İyi bir modelleme ve simülasyon, bir montaj sisteminin davranışının anlaşılmasını önemli ölçüde artırır. Bu bölümün amacı simülasyon modellerini kullanarak uçak gövde paneli montaj sistemi tasarım senaryolarını incelemektir. Simülasyona entegre edilen sayısal verilerin nasıl elde edildiği ile ilgili bilgiler “5.2. Montaj Sistemi Alternatiflerinin Simülasyon Metotları” bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

### 5.1. Montaj Sistemlerinde Simülasyon Modelleri

Simülasyon, modelleme ve analiz en sık kullanılan araştırma tekniklerinden biridir. Simülasyon kullanarak darboğazları yönetmek, sipariş yönetim sistemlerini geliştirmek, ihtiyaç duyulan depolama kapasitesini tahmin etmek, farklı senaryolar kullanarak prosesleri geliştirmek için gerçekte denemeden önce test etmek mümkündür. Amacına uygun bir şekilde oluşturulan metodolojiyle birlikte kullanıldığında aşağıda belirtilen avantajlar sağlanır:

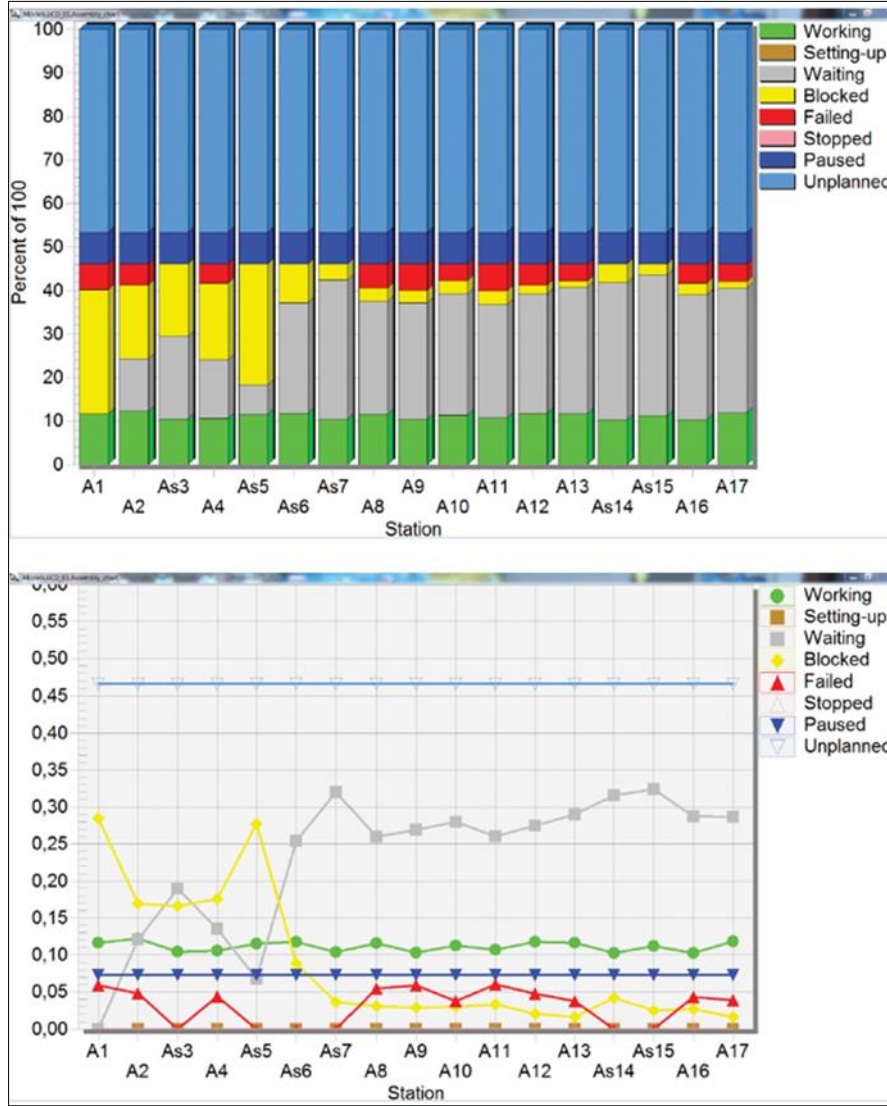
- Bir sistemin matematiksel modelinin geliştirilerek ve sistemin operasyonunu uzun süreler boyunca ayrıntılı olarak gözlemleyerek sistemin daha iyi anlaşılmasını sağlamak.
- Karmaşık sistemlerin ve alt sistemlerin iç etkileşimlerini araştırmak.
- Fizibilite için sistem hakkındaki hipotezleri test etmek.
- Uzun süreli operasyonları gözlemlemek için zamanı daraltmak ya da karmaşık bir operasyonu daha ayrıntılı gözlemlemek için zamanı genişletmek.
- Sistem modelini değiştirilerek bir sistemin çalışması üzerine değişikliklerin sistem üzerindeki etkilerini incelemek.
- Yeterli bilgi olmayan yeni durumlar ya da bilinmeyen durumlar için testler yapmak.
- Sistemdeki darboğazları tanımlamak.
- Model oluşturma yöntemiyle sistemi geliştirmek.
- Sistem konfigürasyonlarını analiz etmek için çoklu performans metrikleri kullanmak.

- Analitik çözümleri anlamak ve doğrulamak.
- Problem çözümleri için sistem yaklaşımı kullanmak.
- Animasyonlar vasıtası ile operasyonları görselleştirmek.
- İyi tasarlanmış ve sağlam sistemleri geliştirmek ve sistem geliştirme zamanını azaltmak.
- Optimize edilmiş imalat özelliklerini dağıtmak ve yönetimini sağlamak.
- Planlama ve otomasyon programlama zamanlarını %40 oranında azaltmak.
- Test ve kurulum işlemleri önemli ölçüde azaltmak.
- Üretim sisteminin sanal olarak devreye alınmasını sağlamak için olay temelli, sinyal tahrikli simülasyon teknolojisini kullanmak.
- Tipik iki boyutlu metotlar ile karşılaştırıldığında fabrika tasarım zamanını %50 oranında azaltmak.
- Mevcut üretim sistemlerinin verimliliğini %20 oranında artırmak.
- Optimize edilmiş üretim stratejilerinin geliştirilmesi yoluyla stok ve teslim süresini %60 oranında azaltmak.
- Farklı çalışma grupları arasında iki ya da üç boyutlu fabrika düzeni paylaşarak görünürlük ve öngörülebilirliği kolaylaştırmak. Tecnomatix, Simio, Visual Components gibi proses simülasyon yazılımları, ürün yaşam döngüsü yönetimi boyunca, özel ürünler üreten tesislerden karma model üreten tesislere kadar, çeşitli kombinasyonlar ile sanal olarak robot ve diğer otomatik imalat sistemlerini simüle etme ve geliştirme imkânı sağlar. Bu yazılımlar kullanılarak farklı üretim senaryoları, mevcut teknolojiler ve yeni teknolojiler mevcut üretim prosesi durdurulmadan tasarlanır.

Montaj sistemlerinin simülasyonunda akıllı nesnelere sayesinde konveyörlerden vinçlere, konteynerlerden otomatik yönlendirmeli araçlara ve operatörlere kadar tüm fabrika kaynakları görselleştirilebilir. Fabrika düzenini bu akıllı nesnelere sayesinde tipik iki boyutlu metotlardan çok daha hızlı bir şekilde modellemek mümkündür. Olay tabanlı simülasyon ile sanal olarak özel robotların programlanması, endüstri standartlarının oluşturulması, imalat sistemlerinin testleri ve doğrulanması, doğrulama ve hata ayıklama için fiziksel denemelere olan bağımlılığı azaltması önemlidir.

Fabrika tasarım ve görselleştirme yazılımlarını kullanmak, fabrika tasarım düzenine, montaj hatlarına ve kurulum sürecine eleştirel bir bakış açısı sunar. Olay tabanlı simülasyon ile fabrika düzeninin bağdaştırılmasını sağlayarak, üretim sisteminin parametrelerini optimize eder. Bu da darboğazların elimine edilmesine, katma değer katmayan işlemlerin

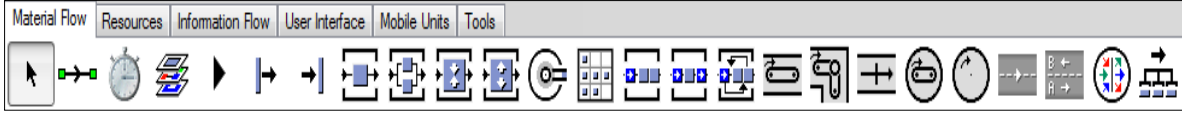
azaltılmasına, verimliliğin ve üretilen ürün miktarının artırılmasına olanak tanır. Malzeme akış mesafelerine, frekansa ve maliyete dayalı olarak fabrikaların verimliliğini yönetir. Şekil 5.1.'de örnek olarak bir montaj hattının proseslerinin simülasyon sonuçlarına göre durum grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Montaj sistemleri simülasyonunda örnek proses durum grafikleri [72]

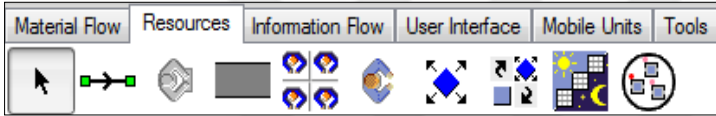
Simülasyon işlemi gerçekleştirilirken veriler toplanır, model kurulur ve sonrasında toplanan veriler modele işlenir. Simülasyon çalışma süresi ve hassasiyet ayarlanarak model çalıştırıldıktan sonra simülasyon sonuçları elde edilir. Sonuçlara göre modeller güncellenerek sistem optimize edilir. Optimizasyon ile birlikte üretim alanında da iyileştirmeler tamamlanır. Yeni bir sistem kurulacaksa simülasyon sonrası optimum sonuçların elde edildiği modellere göre sistem kurgulanır ve hayata geçirilir. Tez

çalışmasında uçak gövde paneli montaj sistemi tasarım, modelleme ve simülasyon için kullanılan Tecnomatix programında objeleri içeren üç ana başlık vardır. Bu ana başlıklar aşağıdaki gibidir. Şekil 5.2.'de gösterilen malzeme akışı objeleri; tasarlanan modeldeki malzeme akışlarının tanımlanması için kullanılır. Tek bir istasyondan, karmaşık montaj işlemlerine kadar farklı yapılarda objeler bulunmaktadır.



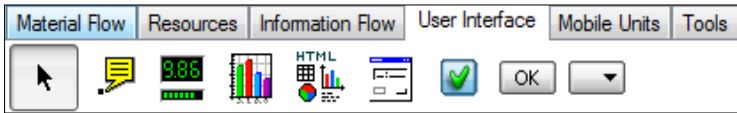
Şekil 5.2. Malzeme akışı objeleri

Şekil 5.3.'te gösterilen gösterilen kaynak objeleri tasarlanan modeldeki işçi, vardiya, takımlar, yürüme yolları gibi objelerin tanımlanması için kullanılır.



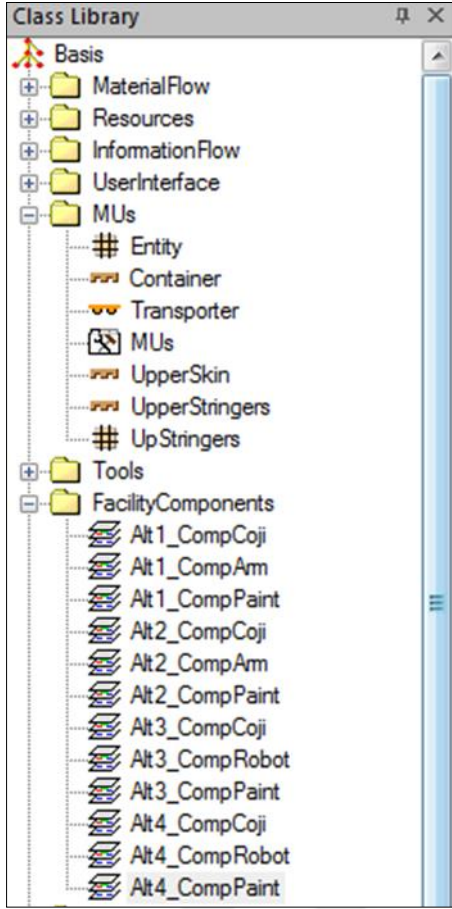
Şekil 5.3. Kaynak objeleri

Şekil 5.4.'te gösterilen genel objeler; tasarlanan modeldeki sonuçların elde edilmesi, grafiklerinin hazırlanması, gerekli notların tutulması için kullanılır.



Şekil 5.4. Genel objeler


Model dosyaları “Sınıf Kütüphanesi” içerisinde hiyerarşik şekilde yapılandırılmıştır. Dosyalar farklı objeleri içermektedir. Araç çubuğundaki her şey mevcuttur. İhtiyaca göre yapı artırılabilir. Şekil 5.5.'te tezde montaj sistemi simülasyonu için oluşturulan “Sınıf Kütüphanesi” gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Tecnomatix sınıf kütüphanesi

Tecnomatix programında tasarlanacak olan modeller için temel tasarım araçları ise aşağıdaki gibidir:


*MUs*: Hareketli üniteleri (eleman, konteyner, taşıyıcı) yani hareketli nesne objesidir.

*Eleman* : Kaynak tarafından üretilen malzeme akış proses objesidir. “Konteyner” ve “Taşıyıcı” araçları ile istasyondan istasyona taşınır. Herhangi bir iç hacme sahip değildir. Tek bir parçadır.

*Konteyner* : İçine eleman konulabilir. Belli bir hacmi vardır.

*Taşıyıcı* : Kamyon, tır gibi araçlardır. Eleman ve konteyner taşıyabilir.

*Kaynak* : Elemanların üretildiği yerdir.

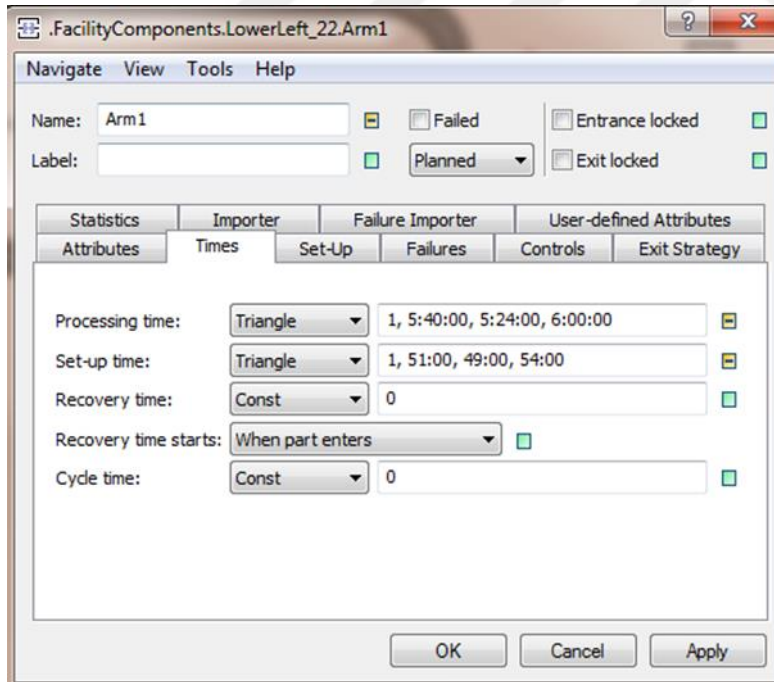
*Tekli İstasyon* : Elemanların işlem gördüğü yerdir. İstasyonlardan her seferinde bir parça geçebilmektedir. Şekil 5.6.’da örnek bir tekli istasyon hücresi gösterilmiştir.

Tekli istasyon içerisinde gerçekleştirilebilecek faaliyetler;


- Arızalı: Tezgâhı tamamen durdurur.
- Planlı: Tezgâhı planlanan zaman aralığında durdurur.
- Giriş Kilitli: Objenin girişini kapatır. Obje içerisindeki elemanlar hareket eder fakat eleman objeye giriş yapamaz.
- Çıkış Kilitli: Eleman objeye giriş yapabilir fakat objenin çıkışı kapalı olduğu için objeden çıktı alınamaz.

Tekli istasyonda yapılan bu değişiklikler sadece program çalışırken gerçekleştirilebilir. Paralel proseslerde giriş kilitli, çıkış kilitli kısımları önemlidir. Objelerde çıkış stratejisi;

- Arıza yapılan simülasyon zamanı: Bu ayar ile simülasyon aralığı olarak girilen zaman objenin durumuna bağlı olmadan makina duruşlarda veya çalışırken arıza verebilir.
- Proses süresi ile bağıntılı arıza: Makina sadece çalışıyor iken arıza verir.
- Operasyon süresi ile bağıntılı arıza: Makina işlem yapsa da yapmasa da çalıştığı süre içerisinde arıza verebilir.



Şekil 5.6. Tekli istasyon hücresi

**Olay Denetleyicisi**  : Simülasyon çalıştırıldığı esnada farklı prosesleri, hareketleri, olayları koordine ve senkronize eden objedir. Simülasyonun zamanlarını ayarlar, hızlandırır ya da yavaşlatır, başlatır ve bitirir. Kaynak, Tahliye, Olay Denetleyicisi olmak üzere bu üç

obje her simülasyonda olmalıdır. Olay denetleyicisi ayarlarında simülasyonun çalışacağı tarih aralığı belirlenir. Zaman atamaları gün, saat, dakika belirlemek için iki nokta üst üste eklenir (3:3:3:3→ 3 gün 3 saat 3 dakika 3 saniye anlamına gelir.) Model zaman birimi olarak saniye kullanılmaktadır. Ayarlar→ Rapor Özetini Göster sekmesinde simülasyon sonucunun çıktısı alınmaktadır.



*Stok* : İlk giren ilk çıkar mantığı ile çalışan stok objesidir. Stokta meydana gelen akışlarda stoğun istatistiksel analizi için Deney Yöneticisi kullanılır. Deney yöneticisinde Çıktı Değerlerini Tanımlayın sekmesi seçilerek optimum stok kapasitesi belirlenir. Optimum kapasite gerçekleştirilen denemeler sonunda tespit edilir. Denemeler stok kapasitesinde yapılan değişiklikler ile gerçekleştirilir.

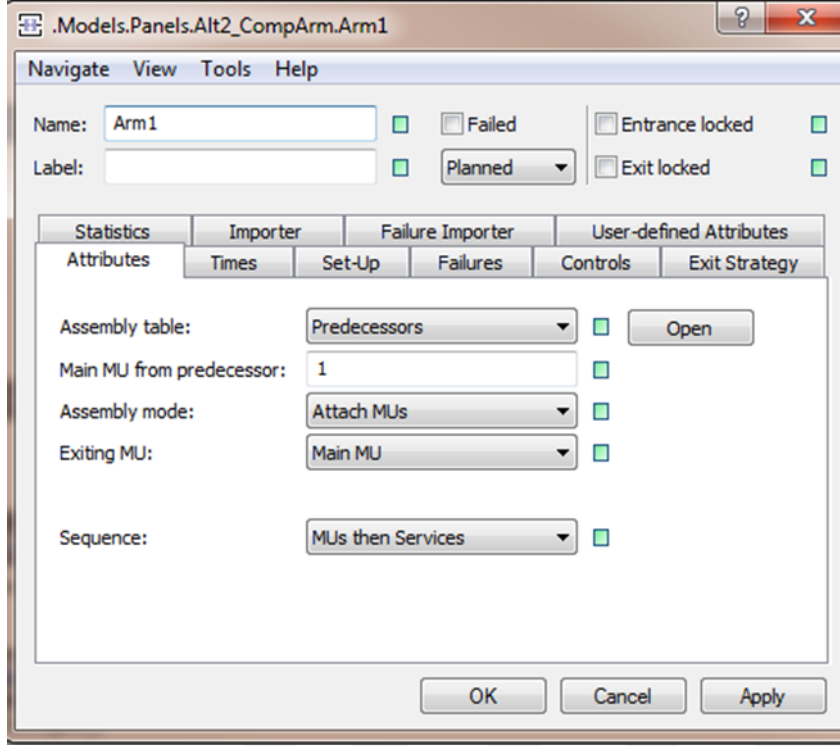


*Hat* : Konveyör olarak kullanılan objedir. Zamana bağlı ünitelerin hattı kapsayacak şekilde belirlenmesi için uzunluk ve hız değerleri girilir. Akış süresini değiştirmek için uzunluk girilmek istenirse hattın düz çizilmesi gerekmektedir. Hat boyunda değişiklik yapılamadığı durumlarda akış zamanı belirtilir. Simülasyonda “-1” sonsuz anlamına gelmektedir. Kontroller sekmesinde sensörler eklenerek hız ayarı yapılabilir. Hat Biriktirme biriktirme seçeneği işaretli değil ise:


- Transfer uzunluk seçeneği kaldırılırsa, boyut değiştirilse de ekran görünümü değişmez.
- Ana ekrandaki düzeltmeler eklenen objeleri etkiler.





*Montaj* : Detay parçaların ana parçalar ile birleştirilmesini sağlayan montaj istasyonudur. Montaj penceresinde öncel olarak konteynerler ele alınır. Programda elemanlar konteynerler ile birleşip montaj operasyonunu oluşturur. Kaynaklardan birinde konteyner akışı sağlanması için eleman yerine konteyner seçilir. Şekil 5.7.'de örnek bir montaj hücresi gösterilmiştir.





Şekil 5.7. Montaj hücresi


 **Demontaj**: Montajı yapılmış olan parçaların demontajının yani parçalarının ayrılmasını sağlayan objedir.


 **Paralel İstasyon**: Elemanların paralel istasyonlarda işlem gördüğü objedir. İçerisinde bulunan X ve Y matrisine göre tezgâh sayısı obje içerisinde paralel çalışacak şekilde belirlenmektedir. Proses süresi sekmeleri tezgâhlardaki işlem sürelerini göstermektedir.


 **Seç ve Yerleştir**: Bir elemanı bir istasyondan alıp diğer istasyona ileten taşıma robot objesidir. Bu objeye eleman isimleri girişte verilen isimler ile aynı olmalıdır. Böylece elemanların sistemden çıkışları özelliklerine göre yapılabilir.


 **Rota**: Taşıyıcıların hareket ettikleri alanlar geçiş yollarıdır. Tek yönlü hareket sağlanır. Çift yönlü hareket ihtiyacı var ise iki şeritli hat kullanılabilir.


**Döngü** : İlk istasyon ve son istasyon seçilerek ara stokların oluşturulması sağlayan objedir.

**Bağlantı** : Tüm istasyonların ve proses objelerinin birbiri ile bağlantılarını sağlayan objedir.


**Açısal Dönüştürücü & Döner Tabla** : Açısal Dönüştürücü elemanların yönünü belirtir. Hatlarda görsellik açısından sıkça kullanılacak bir yöntemdir. Döner Tabla gelen parçayı 90 derece çevirir. Farklı açılar tanımlamak için tabloya giriş ve çıkış açısı değerleri yazılmalıdır.


**Transfer İstasyonu** : Eleman ve konteyner gibi hareketli parçaların bir istasyondan, taşıyıcıdan diğerine aktarımını sağlayan objedir. Bu obje ile istasyonların, araçların, proseslerin birbirine bağlanması için bağlantı kullanılmasına ihtiyaç yoktur.


**Akış Kontrolü** : Karar verme objesidir. Objeye girişlerinde önce gelen elemana bakılır. Objeye çıkışlarında ise sonra gelen elemana bakılır. Çıkış stratejisi olarak yüzdeler seçildiğinde “Liste Kutusunu Aç” seçilir.


**İşçi Havuzu** : İşçileri üreten objedir. İşçiyi yönlendirmede üç seçenek mevcuttur:


- Çalışma bölgesinde “İşi tamamladıktan sonra kal” seçeneği seçilirse işçi iş bittikten sonra işçi havuzuna geri dönmez ve istasyonda bekler.
- İşçiler direkt olarak çalışma alanına gider.
- İşçiler iş istasyonu dolu olsa bile çalışmaya devam eder.


**Aracı** : İşçinin iş yapabilmesi için gereken sinyali veren objedir. Aracı ve İşçi Havuzu bir işçi simülasyonunda kullanılması şart objelerdir.

**İş Yeri** : İşçinin çalıştığı yeri belirten objedir. İş yeri proseslere yakın yerleştirilmelidir.

 *Darboğaz İşlemcisi*: Hattaki darboğazların hangi proseslerde ve istasyonlarda olduğunu göstermektedir.

 *Vardiya Takvimi*: Tüm prosesler için bayram tatili, resmî tatil gibi çalışılmayan zamanların ya da vardiyalı çalışmaların girildiği objedir. Zamanı kısalt seçeneği çalışılan zamanlar için yarım gün yapılan çalışmalarda kullanılır.

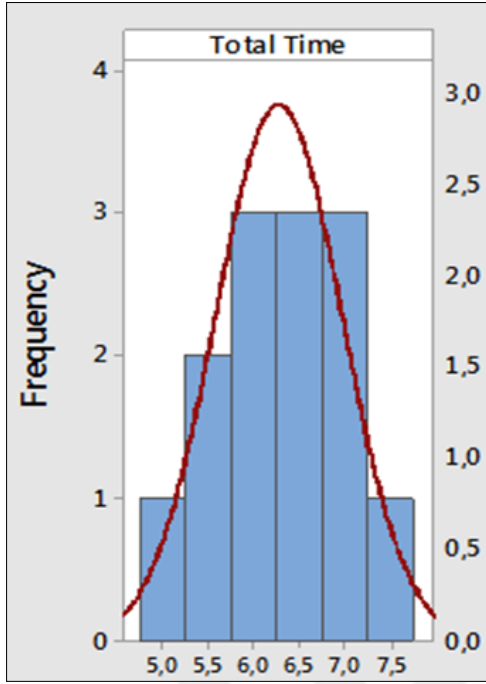
 *Grafik*: Simülasyon sonucu tüm prosesler için istatistiklerin görsel olarak ifade edilmesini sağlayan objedir.

 *Tahliye*: İstatistiksel verileri tutan objedir. Tahliye işlem zamanı sıfır olarak kullanılmalıdır. Model elemanları çıktı olarak saymaktadır.

## 5.2. Montaj Sistemi Alternatiflerinin Simülasyon Metotları

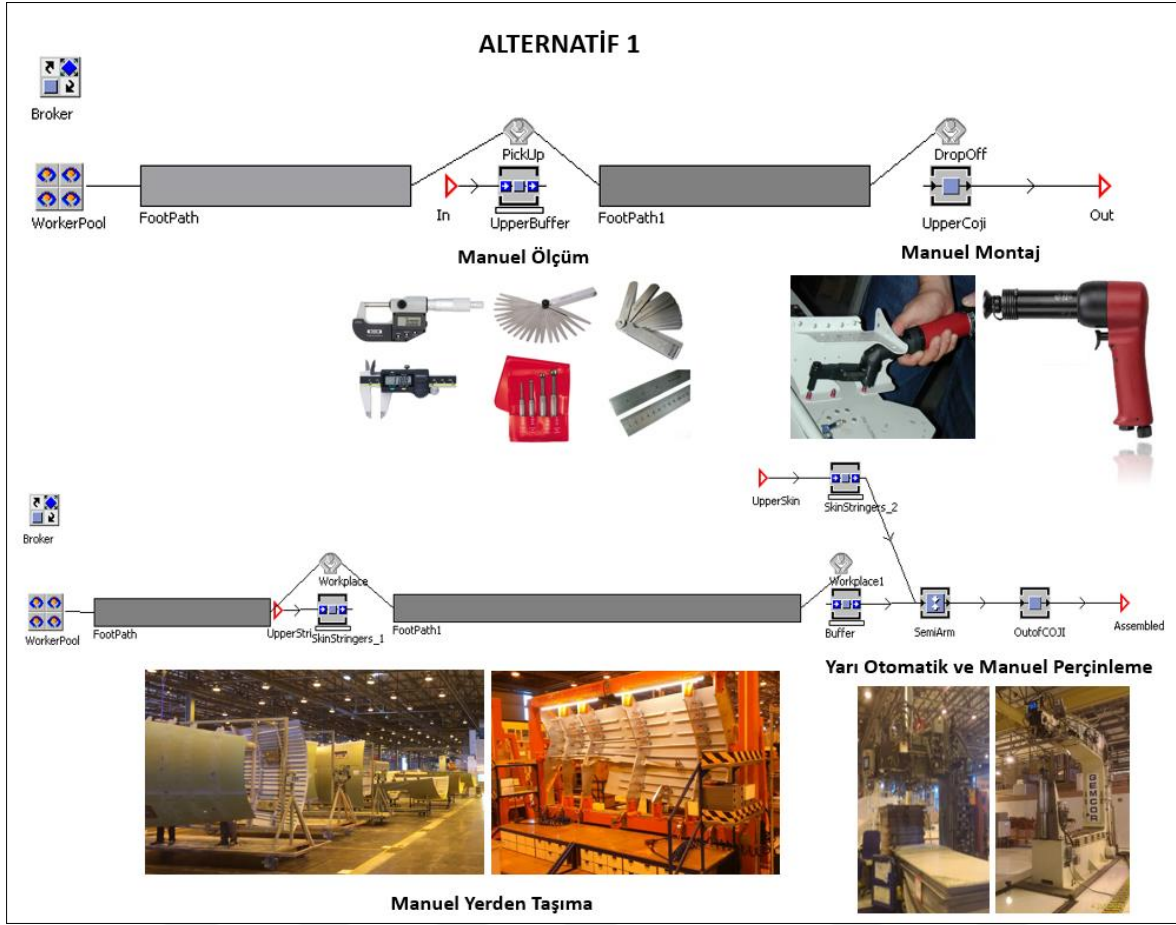
Uçak gövdesi paneli montaj sistemlerinde geliştirilen dört farklı alternatifin simülasyonu için Tecnomatix Plant Simulation programı kullanılmıştır. Tecnomatix, sürükle bırak yöntemiyle grafiksel nesne uygulamasını desteklemektedir [72].

Simülasyon programına entegre edilecek proses değerleri için öncelikle mevcut durum analizi yapılmıştır. İmalat Mühendisliği, Montaj Otomasyon Mühendisliği, Kapasite Planlama, Üretim Planlama, Sürekli İyileştirme, Yalın Üretim bölümlerinden ve imalat alanlarından tüm prosesler için tezgâh süreleri, tezgâhların ayar süreleri, parça yükleme ve boşaltma süreleri, işçilik süreleri gibi veriler alınmıştır. Veri madenciliği ile bir milyon veri Visual Basic kullanılarak hazırlanan makrolar yardımıyla analiz edilmiş, veriler anlamlı hale getirilmiştir. Kayıt tutulmayan veriler için ise alandaki montaj prosesleri başında ölçüm yapılarak veriler elde edilmiştir. Montaj alanında mevcut olmayan prosesler, tezgâhlar, robotlar ve taşıma sistemleri gibi sistemler için veriler uluslararası yayınlanan makalelerden alınarak montaj proseslerine uyarlanmıştır. Tüm veriler doğrulandıktan sonra proses değerleri, üçgensel dağılım ile standart sapma ortalama 0,16 olacak şekilde simülasyon programına aktarılmıştır. Örnek tezgâh ölçüm veri değerleri Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Örnek tezgâh ölçüm veri değeri

*Birinci alternatif;* ölçüm sistemleri için manuel ölçüm aparatlarını, panellerin sabitlenmesi için yeniden yapılandırılabilir olmayan fikstürleri, ön montaj işlemleri için manuel pozisyonlama ve montaj işlemlerini, panellerdeki perçin pozisyonlarının kontrolü için manuel şablonları ve aparatları, panellerin istasyonlardan istasyonlara taşınması için manuel taşıma araçlarını, uçak yapısal parçalarının montajı yani son montaj için yarı otomatik perçinleme tezgâhlarını ve manuel perçinleme işlemlerini kapsamaktadır. Uçak gövdesi paneli montaj sistemlerinde geliştirilen birinci alternatifin simülasyonu için detaylı bilgiler Şekil 5.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Uçak gövde paneli montaj sistemi birinci alternatifi

Birinci alternatif için simülasyonda buffer adı verilen stok alanları tezgâh öncesi işlemlerde 12 adet panel, tezgâh sonrası için ise 36 adet panel kapasitesindedir. COJI yazan istasyonlar, component jig yani uçak gövde panellerinin belirli noktalardan sabitlendiği ve manuel proseslerin yapıldığı istasyonlardır. COJI Sonrası ise manuel perçinleme, yarı otomatik perçin tezgâhları ile montaj ya da otomatik perçin tezgâhları ile montaj sonrası yapılan işlemleri kapsayan panellerin sabitlendiği istasyonlardır. İstasyonlardaki COJI proses değerleri Çizelge 5.1.'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1. COJI proses değerleri

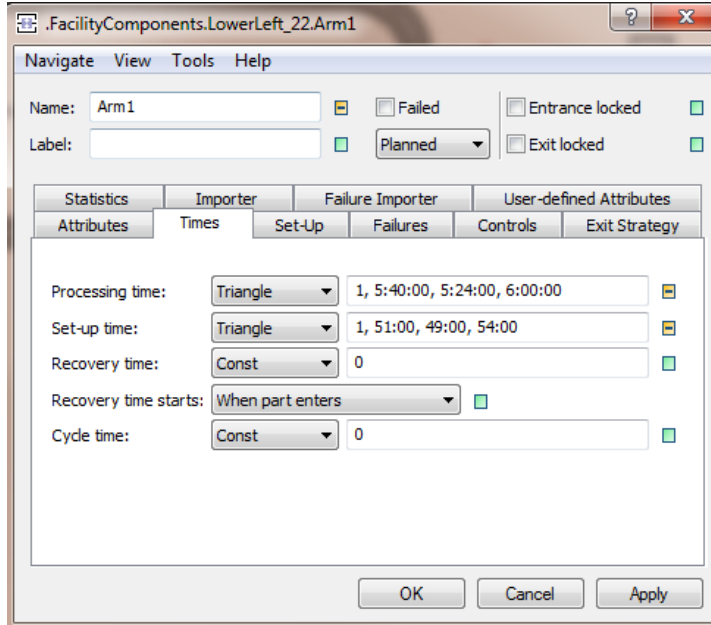
PANELLER	Proses	Proses Süresi (saat)	Min Süre (saat)	Max Süre (saat)	Standart Sapma
ÜST	COJI	8,67	8,50	8,90	0,122984
ÜST	COJI Sonrası	5,55	5,30	5,80	0,186190
ÜST SOL	COJI	12,80	12,55	12,95	0,116496
ÜST SOL	COJI Sonrası	8,36	8,00	8,50	0,208937
ÜST SAĞ	COJI	12,95	12,70	13,20	0,192423
ÜST SAĞ	COJI Sonrası	8,38	8,00	8,50	0,209001
ALT	COJI	22,39	22,00	22,60	0,185904
ALT	COJI Sonrası	12,69	12,50	12,90	0,154968
ALT SOL	COJI	18,81	18,50	18,95	0,148404
ALT SOL	COJI Sonrası	10,99	10,80	11,20	0,102711
ALT SAĞ	COJI	15,41	15,10	15,60	0,185306
ALT SAĞ	COJI Sonrası	9,43	9,20	9,60	0,134125

Birinci alternatifini kapsayan istasyonlarda tezgâha panellerin hazırlanmasıyla ilgili, geçici bağlayıcılar ile parçaların birbirine bağlanması, tezgâh kabiliyeti dışındaki parçaların montajı gibi işlemler manuel olarak yapılmaktadır. Manuel montaj proses süreleri Çizelge 5.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Manuel montaj proses değerleri

PANELLER	Toplam Perçin Sayısı	Geçici Bağlayıcı Sayısı	Proses Süresi (dakika)	Min Süre (dakika)	Max Süre (dakika)
ÜST	1406	281	93,7	89,0	98,4
ÜST SOL	1322	264	88,1	83,7	92,5
ÜST SAĞ	1322	264	88,1	83,7	92,5
ALT	2700	540	128,0	121,6	134,4
ALT SOL	1920	384	180,0	171,0	189,0
ALT SAĞ	1360	272	90,7	86,1	95,2

Yarı otomatik perçin tezgâhları verileri elde edilirken, tam otomatik perçin tezgâhı verilerinden de yararlanılmıştır. Simülasyon değerleri tek vardiya üzerinden hesaplanmış, bir vardiyanın 8 saat, bir ayın ise 20 çalışma günü olduğu bilgisi kullanılmıştır. Cojilerin ve tezgâhların arıza yüzdeleri, coji sonrası yarı otomatik perçin tezgâhları kullanılarak montaj tamamlanırken parça yükleme boşaltma, ayar süreleri, proses süreleri dikkate alınarak Şekil 5.10.'da örneği gösterilen üçgensel dağılım değerleri simülasyona girilmiştir. Tüm verilere dayanarak elde edilen simülasyon çıktıları Çizelge 5.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Üçgensel dağılım simülasyon girdileri

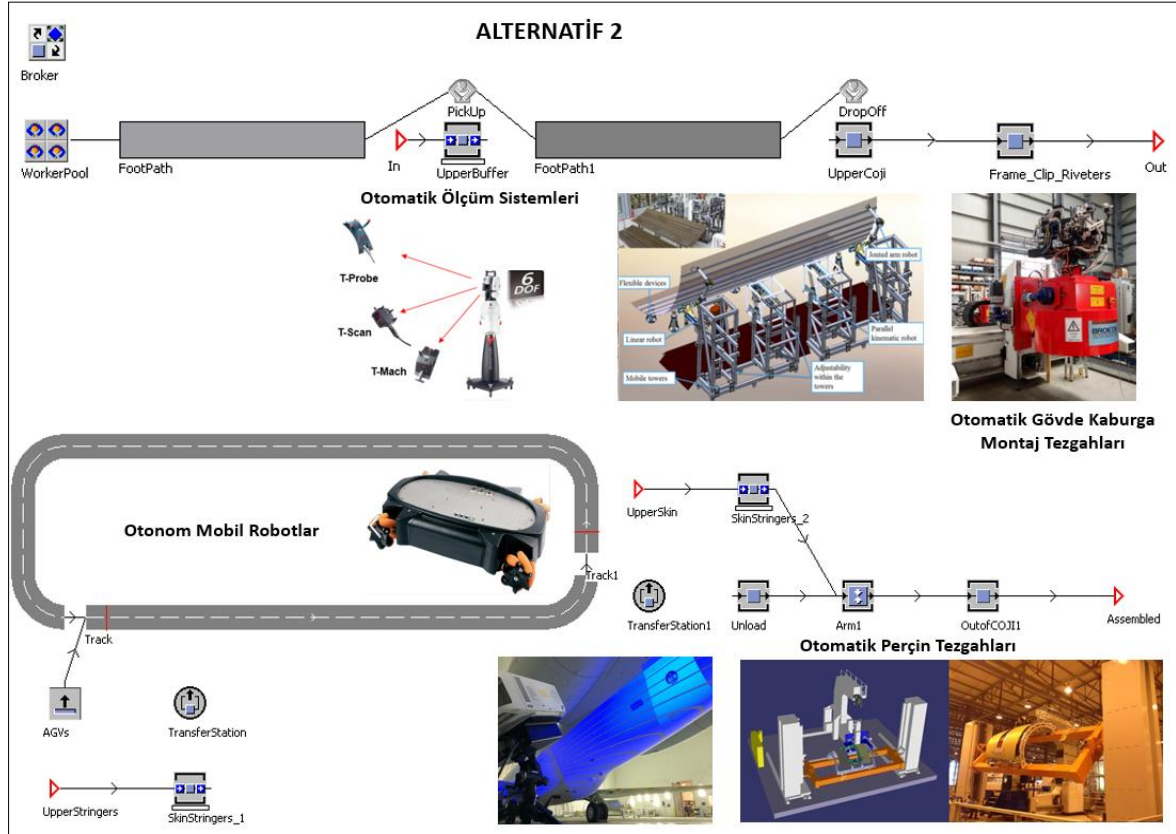
Çizelge 5.3. Birinci alternatif için simülasyon sonuçları

PANEL	Çalışma Süresi %	Ayar Süresi %	Parça Bekleme Süresi %	Arıza Süresi %	Üretilen Gövde Paneli Sayısı
ÜST	77,46	0,25	21,13	1,16	12
ÜST SOL	74,56	0,29	23,94	1,21	12
ÜST SAĞ	74,45	0,29	24,3	0,96	12
ALT	69,03	0,46	29,27	1,24	10
ALT SOL	70,64	0,38	27,86	1,13	11
ALT SAĞ	71,83	0,36	26,68	1,13	11

Birinci alternatif için elde edilen simülasyon sonuçlarında alt panel bağlayıcı sayısı diğer panellere göre daha fazla olduğu için üretilen panel adeti azalmıştır. Alt panelin set-up işlemleri de daha uzun sürmektedir. Üst paneller ise alt panellere göre daha az bağlayıcıya sahip olduğundan üretim adeti daha fazladır. Manuel işlemlere dayalı birinci alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalamada %70' in üzerindedir. Toplamda 68 adet panel üretimine imkân vermektedir. Bir gövde 6 panelden oluştuğu için bu da yaklaşık 11 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

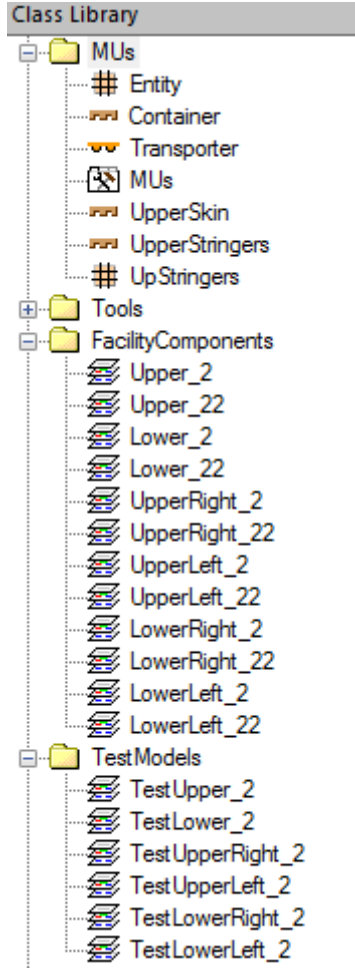
İkinci alternatif; ölçüm sistemleri için tam otomatik lazer izleyicileri, panellerin sabitlenmesi için yeniden yapılandırılabilir fiktürleri, ön montaj işlemleri için kaburga montaj hücrelerini ve kaburga perçinleme tezgâhlarını, panellerdeki perçin pozisyonlarının kontrolü için 3D projeksiyonları, panellerin istasyonlardan istasyonlara taşınması için otonom mobil araçları,

uçak yapısal parçalarının montajı yani son montaj için tam otomatik perçinleme tezgâhlarını kapsamaktadır. Uçak gövdesi paneli montaj sistemlerinde geliştirilen ikinci alternatifin simülasyonu için detaylı bilgiler Şekil 5.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Uçak gövde paneli montaj sistemi ikinci alternatifi

İkinci alternatif için simülasyonda stok alanları aynıdır. Fakat ölçümler manuel olarak değil otomatik lazer izleyiciler ile yapılmaktadır. Uluslararası makalelere göre otomatik ölçümler manuel ölçümlere göre %30 avantaj sağlamaktadır. Simülasyona bu yüzdelik iyileştirme göz önünde bulundurularak veri girişleri yapılmıştır. İkinci alternatif için Tecnomatix programında oluşturulan “Sınıf Kütüphanesi” simülasyon modülleri Şekil 5.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. İkinci alternatif simülasyon modülleri

Ayrıca ikinci alternatifte, birinci alternatifte manuel olarak yapılan kaburga toka bağlantıları perçinleme tezgâhları ile otomatize edilmiştir. Montaj proses sıralamasına göre tezgâhlar COJI operasyonlarından sonra görev alacaktır. Bu tezgâhlar uçak gövdelerindeki kaburga parçaları ile toka parçalarını birleştirmektedir. Simülasyon değerleri kaburga toka perçinleme tezgâhının minimum, ortalama ve maksimum süreleri COJI'lerdeki manuel proses sürelerinden çıkarılarak hesaplanmıştır. Yapılan fizibilite çalışmasına göre hesaplanan tezgâh değerleri Çizelge 5.4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Kaburga toka perçinleme proses değerleri

PANELLER	Toka Perçin Sayısı	Toka Sayısı	Proses Süresi (dakika)	Min Süre (dakika)	Max Süre (dakika)
ÜST	8	32	51	49	54
ÜST SOL	8	33	53	50	55
ÜST SAĞ	8	36	58	55	60
ALT	8	60	96	91	101
ALT SOL	8	70	112	106	118
ALT SAĞ	8	70	112	106	118

Panel bekleme yüzdelerinin azaltılması hedeflenerek ikinci alternatifteki panellerin taşınması için otonom mobil robotlar kullanılmıştır. Yarı otomatik perçin tezgâhlarının yerini ise tam otomatik perçin tezgâhları almıştır. Üretim alanından ve sistemden gerçek veriler ile elde edilen otomatik perçin tezgâhları değerleri Çizelge 5.5.'te ve simülasyon sonuçları Çizelge 5.6.'da gösterilmiştir. Proses değerleri sadece perçin sayısına bağlı değildir. Geometrik faktörler de proses sürelerini etkilemektedir.

Çizelge 5.5. Otomatik perçin tezgâhı proses değerleri

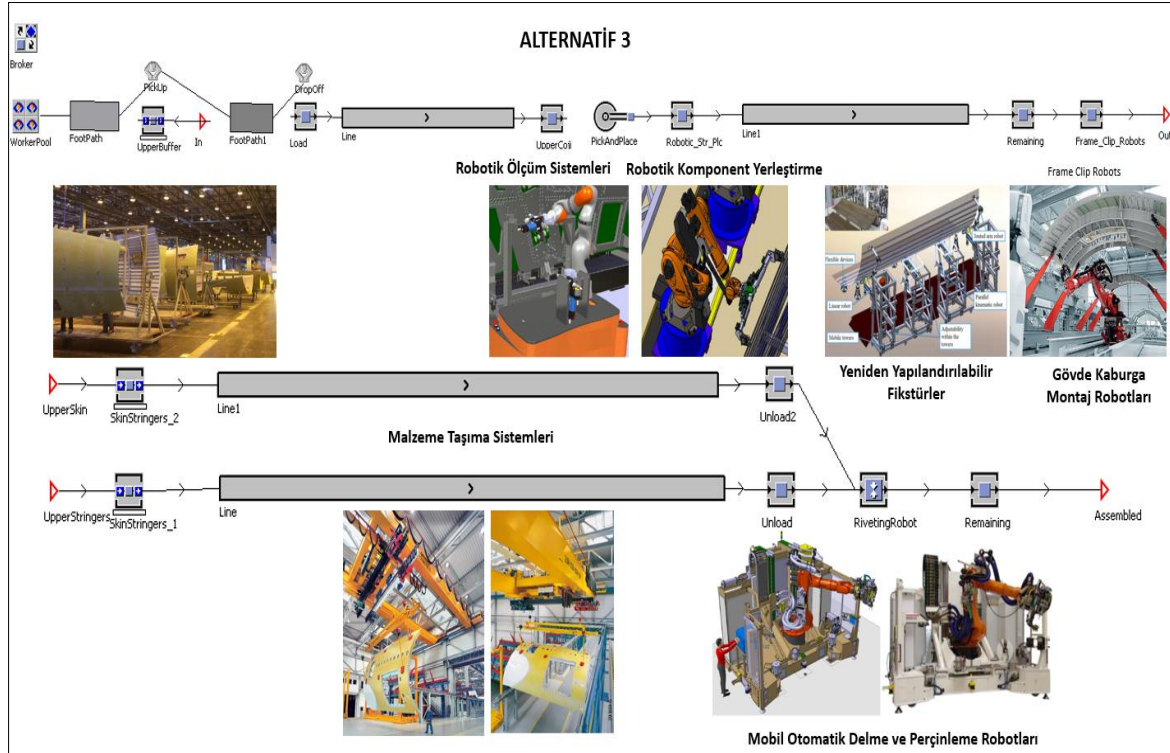
PANELLER	Toplam Perçin Sayısı	Proses Süresi (saat)	Min Süre (saat)	Max Süre (saat)	Standart Sapma
ÜST	1406	5,49	5,20	5,70	0,174135
ÜST SOL	1322	5,46	5,30	5,70	0,146272
ÜST SAĞ	1322	5,61	5,35	5,90	0,168213
ALT	2700	5,80	5,40	6,00	0,176009
ALT SOL	1920	5,67	5,40	6,00	0,204194
ALT SAĞ	1360	5,71	5,50	6,00	0,166797

Çizelge 5.6. İkinci alternatif için simülasyon sonuçları

PANEL	Çalışma Süresi %	Ayar Süresi %	Parça Bekleme Süresi %	Arıza Süresi %	Üretilen Gövde Paneli Sayısı
ÜST	83,12	0,14	15,92	0,82	24
ÜST SOL	79,18	0,17	19,93	0,72	24
ÜST SAĞ	78,29	0,18	20,66	0,87	23
ALT	82,89	0,18	15,82	1,11	21
ALT SOL	76,89	0,21	21,94	0,96	23
ALT SAĞ	81,03	0,19	18,04	0,74	23

İkinci alternatif için elde edilen simülasyon sonuçlarında, alt panel bağlayıcı sayısı diğer panellere göre daha fazla olduğu için üretilen panel adeti diğer panellere göre daha azdır. Üst paneller ise alt panellere göre daha az bağlayıcıya sahip olduğundan üretim adeti diğer panellere göre daha fazladır. Panel bekleme süresi, malzeme taşıma için otonom mobil robotlar kullanılarak birinci alternatife göre %7 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, yarı otomatik perçin tezgâhları yerine tam otomatik perçin tezgâhları kullanılarak tezgâh ayar ve arıza süreleri %0,27 oranında azaltılmıştır. Otomatik proseslere dayalı ikinci alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalama %80'in üzerindedir. Toplamda 138 adet panel üretime imkân vermektedir. Bir gövde 6 panelden oluştuğu için bu da yaklaşık 23 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

Üçüncü alternatif; ölçüm sistemleri için robotik ölçüm cihazlarını, panellerin sabitlenmesi için yeniden yapılandırılabilir fikstürleri, parçaların pozisyonlanması için robotik destek çitası pozisyonlama sistemlerini, ön montaj işlemleri için kaburga montaj hücrelerini ve kaburga toka robotlarını, panellerdeki perçin pozisyonlarının kontrolü için 3D projeksiyonları, panellerin istasyonlardan istasyonlara taşınması için tam otomatik havadan taşıma sistemlerini, uçak yapısal parçalarının montajı yani son montaj için perçinleme robotlarını, boya işlemleri için robotik boya sistemlerini kapsamaktadır. Uçak gövdesi paneli montaj sistemlerinde geliştirilen üçüncü alternatifin simülasyonu için detaylı bilgiler Şekil 5.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Uçak gövde paneli montaj sistemi üçüncü alternatifi

Üçüncü alternatif robot konseptli simülasyon çalışması olduğundan ölçümler otomatik lazer izleyiciler yerine robotik ölçüm sistemleri ile yapılmaktadır. Taşıma sistemleri ikinci alternatiften farklı olarak havadan taşıma sistemleri ile yapılmaktadır. Havadan taşıma sistemi proses değerleri firmaların teknik spesifikasyonları baz alınarak hesaplanmış ve hesaplamalara vinç kaldırma hızı, taşıma ve hareket hızı dahil edilmiştir. Havadan taşıma sistemi 28 m/dk taşıma hızına sahiptir. Üçüncü alternatifteki sistemde havadan taşımalar için ortalama 10,7 dakika harcanmaktadır. Bu alternatifte destek çitası parçalarını yerleştirme işlemleri de robotlarla yapılmaktadır. Destek çitası yerleştirme robotunun proses değerlerinin hesaplanması için öncelikle her panelde bulunan destek çitası sayıları CATIA modelleri ve alandaki gerçek paneller üzerinden hesaplanmıştır. Destek çitası yerleştirme robotu için proses değerleri Çizelge 5.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Robotik destek çıtası yerleştirme robotu proses değerleri

PANELLER	Destek Çıtası Sayısı	Proses Süresi (dakika)	Min Süre (dakika)	Max Süre (dakika)
ÜST	23	108	102	113
ÜST SOL	17	80	76	84
ÜST SAĞ	17	80	76	84
ALT	18	66	62	69
ALT SOL	14	84	80	88
ALT SAĞ	9	42	40	44

Uluslararası teknik makalelerden benzer robotlar için de proses değerleri alınmıştır [73]. Bu değerler olduğu gibi kullanılmamıştır. Tezgâh üreticilerinin hazırladığı teknik makalelerde bulunan tezgâh proses değerleri hesaplanırken düz bir plaka üzerinde, tüm sensörler kapalı iken yapılan denemeler sonucu elde edilen veriler kullanılmaktadır. Alanda gerçek uçak parçalarında ise yüzeyler kavisli ve konturludur. Sensörler robot uç işlevcilerinin parçaya olan dikliğinin sağlanması amacıyla her zaman açıktır. Örneğin otomatik perçin tezgâhı için teknik makale verileri 15 perçin/dakika [74] ya da 17 perçin/dakika [75] iken alanda bir milyon veri ile yapılan otomatik perçin tezgâhı analizlerinde bu değerler 7-8 perçin/dakika olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla gerçek üretim verileri makale verilerinden %50-%65'e varan farklılıklar gösterebilmektedir. Bu nedenle simülasyona girilen robot değerleri bu farkın verilere uygulanabilmesi amacıyla düzeltme katsayıları ile çarpılmıştır. Kaburga toka robotu için proses değerleri Çizelge 5.8.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8. Kaburga toka robotu proses değerleri [76]

PANELLER	Toka Perçin Sayısı	Toka Sayısı	Proses Süresi (dakika)	Min Süre (dakika)	Max Süre (dakika)
ÜST	8	32	51	49	54
ÜST SOL	8	33	53	50	55
ÜST SAĞ	8	36	58	55	60
ALT	8	60	96	91	101
ALT SOL	8	70	112	106	118
ALT SAĞ	8	70	112	106	118

Üçüncü alternatifte tam otomatik perçin tezgâhlarının yerini mobil delme ve perçinleme robotları almıştır. Delme ve perçinleme robotu proses değerleri Çizelge 5.9.'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. Delme ve perçinleme robotu proses değerleri [77]

PANELLER	Toplam Perçin Sayısı	Proses Süresi (dakika)	Min Süre (dakika)	Max Süre (dakika)
ÜST	1406	281	267	295
ÜST SOL	1322	294	279	308
ÜST SAĞ	1322	264	279	308
ALT	2700	360	342	378
ALT SOL	1920	320	304	336
ALT SAĞ	1360	302	287	317

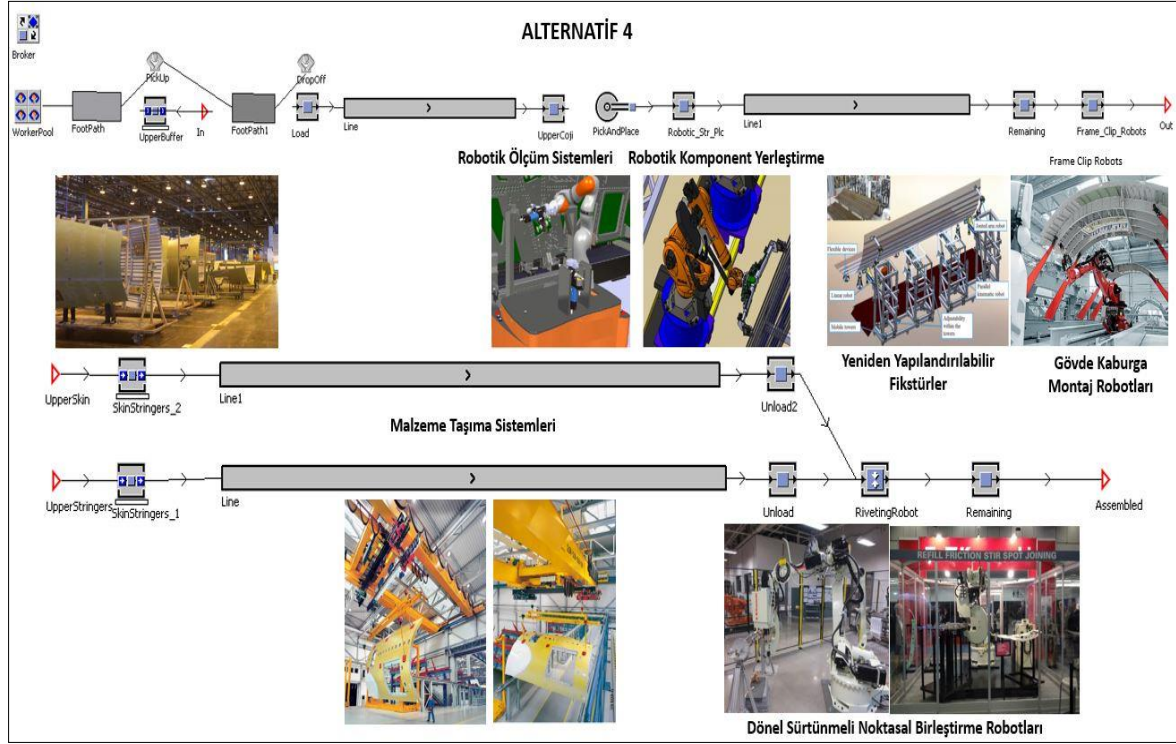
Üçüncü alternatif için elde edilen simülasyon sonuçlarında, benzer şekilde alt panel bağlayıcı sayısı diğer panellere göre daha fazla olduğu için üretilen panel adeti diğer panellere göre daha azdır. Üst paneller ise alt panellere göre daha az bağlayıcıya sahip olduğundan üretim adeti diğer panellere göre daha fazladır. Panel bekleme süresi, malzeme taşıma için modüler vinç sistemleri kullanılarak ikinci alternatife göre %4,65 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, tam otomatik perçin tezgâhları yerine mobil delik delme ve perçinleme robotları kullanılarak tezgâh ayar ve arıza süreleri sırasıyla %0,28 ve %0,32 oranında azaltılmıştır. Çizelge 5.10.'da simülasyon sonuçları gösterilen robotik proseslere dayalı üçüncü alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalama %85' in üzerindedir. Toplamda 153 adet panel üretimine imkân vermektedir. Bir gövde 6 panelden oluştuğu için bu da yaklaşık 25 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

Çizelge 5.10.Üçüncü alternatif için simülasyon sonuçları

PANEL	Çalışma Süresi%	Ayar Süresi %	Parça Bekleme Süresi %	Arıza Süresi%	Üretilen Gövde Paneli Sayısı
ÜST	86,50	0,07	12,77	0,66	28
ÜST SOL	86,31	0,07	13,22	0,40	27
ÜST SAĞ	86,65	0,07	12,82	0,46	27
ALT	82,35	0,09	16,91	0,65	22
ALT SOL	84,78	0,08	14,50	0,64	24
ALT SAĞ	85,03	0,08	14,15	0,74	25

Dördüncü alternatif; ölçüm sistemleri için tam otomatik lazer izleyicileri, panellerin sabitlenmesi için yeniden yapılandırılabilir fikstürleri, parçaların pozisyonlanması için robotik destek çitası pozisyonlama sistemlerini, ön montaj işlemleri için kaburga montaj hücrelerini ve kaburga perçinleme tezgâhlarını, panellerdeki perçin pozisyonlarının kontrolü için 3D projeksiyonları, panellerin istasyonlardan istasyonlara taşınması için tam otomatik

havadan taşıma sistemlerini, uçak yapısal parçalarının montajı yani son montaj için perçinsiz birleştirme robotlarını, boya işlemleri için robotik boya sistemlerini kapsamaktadır. Uçak gövdesi paneli montaj sistemlerinde geliştirilen dördüncü alternatifin simülasyonu için detaylı bilgiler Şekil 5.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Uçak gövde paneli montaj sistemi dördüncü alternatifi

Dördüncü alternatif de üçüncü alternatif gibi robot konseptli olmasına rağmen robotlar yöntem ve proses bakımından üçüncü alternatiften farklıdır. Kaburga toka robotları ve perçinleme robotlarının yerini dönel sürtünmeli noktasal kaynak robotları (RFSSW) almıştır. Bu robotlar perçinsiz birleştirme kabiliyetine sahiptir. Günümüzde yeni bir teknoloji olarak helikopterlerin yapısal parçalarının birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Teknik makalelere göre robot hızı birleştirme noktası başına 2-5 saniye arasındadır. Kanada'da düzenlenen SAE Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition'da gerçekleştirilen örnek olay gösteriminde aynı robotlar için proses süresi 5 saniye olarak ölçülmüştür. Simulasyon programına bu robot için proses değerleri panel başına bu verilere göre girilmiştir. Proses değerleri Çizelge 5.11.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.11. RFSSW toka robotu proses değerleri [78]

PANELLER	Toka Perçin Sayısı	Toka Sayısı	Proses Süresi (dakika)	Min Süre (dakika)	Max Süre (dakika)
ÜST	8	32	21	20	22
ÜST SOL	8	33	22	21	23
ÜST SAĞ	8	36	47	44	49
ALT	8	60	24	23	25
ALT SOL	8	70	47	44	49
ALT SAĞ	8	70	40	38	42

RFSSW perçinleme robotu için de proses değerleri Çizelge 5.12.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. RFSSW perçinleme robotu proses değerleri [78]

PANELLER	Toplam Perçin Sayısı	Proses Süresi (dakika)	Min Süre (dakika)	Max Süre (dakika)
ÜST	1406	117	111	123
ÜST SOL	1322	110	105	116
ÜST SAĞ	1322	110	105	116
ALT	2700	160	152	168
ALT SOL	1920	225	214	236
ALT SAĞ	1360	113	108	119

Dördüncü alternatif için elde edilen simülasyon sonuçlarında, perçinsiz birleştirme prosesleri, robotik perçinleme proseslerinden malzeme kullanılmadığından daha hızlıdır. Dolayısıyla üretim miktarı artmıştır. Panel bekleme süresi, malzeme taşıma için modüler vinç sistemleri kullanılarak üçüncü alternatife göre %5,19 oranında azaltılmıştır. Bu alternatifte tezgâh ayar ve arıza süreleri ise sırasıyla %0,03 ve %0,28 oranında azaltılmıştır. Çizelge 5.13.'te simülasyon sonuçları gösterilen RFSSW robotik proseslere dayalı dördüncü alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalama %90' ın üzerindedir. Toplamda 288 adet panel üretimine imkân vermektedir. Bir gövde 6 panelden oluştuğu için bu da yaklaşık 48 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

Çizelge 5.13. Dördüncü alternatif için simülasyon sonuçları

PANEL	Çalışma Süresi %	Ayar Süresi %	Parça Bekleme Süresi %	Arıza Süresi %	Üretilen Gövde Paneli Sayısı
ÜST	92,39	0,04	7,17	0,40	58
ÜST SOL	89,44	0,05	10,24	0,27	45
ÜST SAĞ	89,69	0,04	9,94	0,33	44
ALT	89,04	0,06	10,38	0,52	35
ALT SOL	92,29	0,04	7,43	0,24	52
ALT SAĞ	91,54	0,04	8,06	0,35	54

### 5.3. Montaj Sistemi Alternatiflerinin Simülasyon Sonuçları

Simülasyon sonuçlarında, havadan taşıma ve robotik montaj otomasyon prosesleri ile geliştirilen üçüncü alternatifin, yerden taşıma ve otomatik perçin tezgâhları ile geliştirilen ikinci alternatife ve manuel prosesler ile geliştirilen birinci alternatife göre daha verimli olduğu belirlenmiştir. Dördüncü alternatif ise perçinsiz birleştirme robotları kapsadığından daha hızlıdır ve üretim adeti tüm alternatiflere göre daha fazladır. Helikopter projelerinde hali hazırda kullanılmaktadır. Yolcu uçakları için de bu teknolojinin kullanılması amacıyla Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir.

Geliştirilen montaj tasarım sistemi alternatiflerinde, üçüncü alternatifte kullanılan havadan taşıma prosesleri havacılık için yerden taşımaya göre daha yaygın ve teknik olarak daha uygundur. Robotik montaj prosesleri montaj işlemlerinde, otomatik perçin tezgâhı gibi ileri teknolojik tezgâhlardan daha hızlıdır. Bu nedenle üçüncü alternatif, ikinci alternatife göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Manuel proseslerin azaltılmasından dolayı, ikinci ve üçüncü alternatifte üretim adetleri de birinci alternatifte hesaplanan üretim adetlerinin iki katına çıkmıştır. Dördüncü alternatifte kullanılan perçinsiz birleştirme robotlarının çevrim zamanı 2-5 saniye gibi çok kısa olmasından dolayı, dördüncü alternatifte en yüksek üretim oranı sağlanmıştır. Simülasyon sonuçlarındaki farklılıkların temel nedenleri bunlardır.

Uçak gövde paneli montaj sistemi kapasitesinin değerlendirilmesi, her alternatif senaryoda ölçülen verime dayanmaktadır. Dört farklı alternatif için uygulanan simülasyonda, yatırım maliyetleri, montaj sisteminin genel kullanım oranları, tezgâh kullanım oranları, üretim teslimat süreleri, üretim kapasiteleri açısından özetlenmiş sonuçlar Çizelge 5.14-5.17.'de verilmektedir.

Çizelge 5.14. Montaj sistemi alternatifleri için yaklaşık yatırım maliyetleri

ALTERNATİF GÖVDE PANELİ MONTAJ SİSTEMLERİ	YAKLAŞIK YATIRIM MALİYETLERİ (€)
Birinci	11 000 000
İkinci	21 000 000
Üçüncü	24 000 000
Dördüncü	25 000 000



Çizelge 5.15. Montaj sistemi alternatiflerinin tezgâh kullanım oranları (%)

UÇAK GÖVDE PANELİ MONTAJ SİSTEMİ ALTERNATİFLERİ	TEZGÂHLAR	TOPLAM PROSES SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK	TOPLAM AYAR SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK	TOPLAM PARÇA BEKLEME SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK	TOPLAM ARIZA SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK
BİRİNCİ	YARI OTOMATİK PERÇİN TEZGÂHI	73,26	0,32	24,73	1,69
İKİNCİ	TAM OTOMATİK PERÇİN TEZGÂHI	82,51	0,26	16,52	0,71
İKİNCİ	KABURGA TOKA PERÇİN TEZGÂHI	78,55	0,21	20,26	0,98
ÜÇÜNCÜ	DESTEK ÇİTASI YERLEŞTİRME ROBOTU	85,35	0,09	14,15	0,41
ÜÇÜNCÜ	KABURGA TOKA ROBOTU	83,21	0,07	15,84	0,88
ÜÇÜNCÜ	DELME VE PERÇİNLEME ROBOTU	84,67	0,07	14,79	0,47
DÖRDÜNCÜ	DESTEK ÇİTASI YERLEŞTİRME ROBOT	84,22	0,08	15,19	0,51
DÖRDÜNCÜ	KABURGA TOKA ROBOTU	84,58	0,07	14,83	0,52
DÖRDÜNCÜ	DÖNEL NOKTASAL KAYNAK ROBOTU	91,74	0,04	7,8	0,42

\*20 gün/ay x 8 çalışma saati/gün = 160 çalışma saati/ay



Çizelge 5.16. Montaj sistemi alternatiflerinin genel kullanım oranları

ALTERNATİFLER	TOPLAM PROSES SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK	TOPLAM AYAR SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK	TOPLAM PARÇA BEKLEME SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK	TOPLAM ARIZA SÜRESİ / TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ (%) AYLIK
BİRİNCİ	72,99	0,34	25,53	1,14
İKİNCİ	80,23	0,18	18,72	0,87
ÜÇÜNCÜ	85,27	0,08	14,06	0,59
DÖRDÜNCÜ	90,73	0,05	8,87	0,35

Çizelge 5.17. Montaj sistemi alternatiflerinin üretim teslimat süreleri

Üretim Teslimat Süreleri (ÜTS) (saat)				
Paneller	Uçak Gövde Paneli Montaj Sistemi Alternatifleri			
	Birinci	İkinci	Üçüncü	Dördüncü
ÜST	13,3	6,6	5,7	2,8
ÜST SOL	13,3	6,6	5,9	3,5
ÜST SAĞ	13,3	6,9	5,9	3,6
ALT	16	7,6	7,3	4,6
ALT SOL	14,5	6,9	6,6	3,1
ALT SAĞ	14,5	6,9	6,4	3,0

Çizelge 5.18. Montaj sistemi alternatiflerinin üretim kapasitesi

Üretim Miktarları (ay)				
Paneller (Panel/ay)	Uçak Gövde Paneli Montaj Sistemi Alternatifleri			
	Birinci	İkinci	Üçüncü	Dördüncü
ÜST	12	24	28	58
ÜST SOL	12	24	27	45
ÜST SAĞ	12	23	27	44
ALT	10	21	22	35
ALT SOL	11	23	24	52
ALT SAĞ	11	23	25	54
TOPLAM PANEL/AY:	68	138	153	288
TOPLAM SET/AY:	10	21	22	35

Simülasyonlar sonucundaki toplam set/ay değeri altı panelin bir gövdeyi oluşturduğu bilgisi ile yazılmıştır. Örneğin birinci alternatifte toplam 10 gövde üretilebilecek, diğer paneller ise

bir sonraki gövdeyi oluşturabilmek için alt paneli bekleyecektir. Sonuçlarda robotik proses odaklı üçüncü montaj sistemi tasarım alternatifinin, manuel proses odaklı ilk alternatife ve otomatik proses odaklı ikinci alternatife göre daha verimli olduğu görülmüştür. Manuel proseslerin azalması nedeniyle üretilen gövde paneli sayısı artmıştır. Modüler vinç kullanarak malzeme taşıma operasyonları, uçak gövde panelleri için otonom mobil robotlardan daha yaygın olarak kullanılmaktadır ve teknik açıdan daha uygundur. Robotik montaj prosesleri diğer gelişmiş montaj tezgâhlarından daha hızlıdır. Diğer alternatiflere göre en hızlı ve üretim miktarı en fazla olan alternatif, RFSSW robotik proses odaklı dördüncü alternatiftir. RFSSW robotları günümüzde yolcu uçakları üretiminde değil helikopter üretiminde kullanılmaktadır. Yolcu uçaklarında kullanılabilmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetlerine devam edilmektedir. Tezde elde edilen simülasyon sonuçları, havacılık endüstrisindeki uçak gövde paneli montaj sistemleri yatırımlarında kullanılabilir.

Montaj sistemi tasarımında metodoloji kullanılmış, alternatif montaj sistemleri için senaryolar oluşturulmuş ve uçak gövde panellerinin üretimi modüler fikstürlerin tasarımı ve analizi ile optimize edilmiştir. Montaj fikstürleri havacılık firmalarının bünyesinde tasarlanıp üretilmektedir. Bu çalışmaya örnek teşkil edecek şekilde altıncı bölümde “Modüler Montaj Fikstürlerinin Tasarımı ve Analizi” çalışması yapılmıştır.

Endüstriyel robotların tasarımı ve üretimi ise farklı bir uzmanlık gerektirdiğinden havacılık firmaları robot üreticilerinden proseslerine uygun olan robotları seçip montaj hatlarına entegre etmektedirler. Bu ihtiyaca yönelik olarak montaj sistemine entegre edilebilecek havacılık proseslerine uygun endüstriyel robotların parametrik yöntemlerle seçilebilmesi için yedinci bölümde “Endüstriyel Robotların Seçimi” çalışması yapılmıştır.

## 6. MONTAJ FIKSTÜRLERİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

### 6.1. Havacılıkta Sabit ve Modüler Montaj Fikstürleri

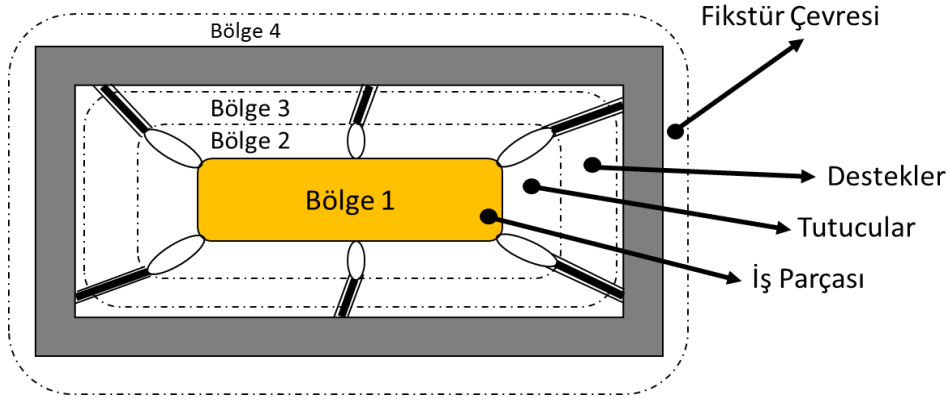
Havacılıkta uçak parça ve parça grupları imalatının, mühendislik gereksinimlerine uygun olarak yapılabilmesini sağlayan, gerekli her türlü ekipmana fikstür adı verilir.

Uçak üretimi için toplam maliyetin %44'ünden fazlasını oluşturan montaj sürecinde çok sayıda takım, aparat ve montaj fikstürü kullanılır [79]. Montaj fikstür tasarım ve üretim maliyetleri bir üretim sisteminin toplam maliyetinin %10-%20'sini oluşturmaktadır [80]. Büyük montaj fikstürlerinin tasarımı, üretimi, yerleşimi ve ölçümlerini kapsayan teslimat süreci 24 ay gibi önemli bir süreyi aşabilmektedir [81].

Havacılık endüstrisinde uçak üretimi proje bazlı üretim ile karakterize edilir. Montaj fikstürleri tek tip uçak ailesi için sipariş üzerine geleneksel fikstür tasarım yöntemleriyle özel olarak üretilir. Proje başlangıcında fikstürler arasında yapısal olarak benzerliklerin tespit edilmesi ve uygulanması maliyetlerin %30 azaltılmasını, teslimat sürelerinin ise %50 azaltılmasını sağlamaktadır [82].

Başarılı bir montaj operasyonu için montaj sırasında dış kuvvetlere maruz kalan parçaların sabit bir pozisyonda tutulması gerekir. Uçak gövde panelleri montajında kullanılan bu takım, aparat ve montaj fikstürlerinin görevi, manuel ya da otomatik montaj proseslerinde uçak gövde panellerini, üzerinde doğru bir şekilde pozisyonlamak, sabitlemek ve desteklemektir.

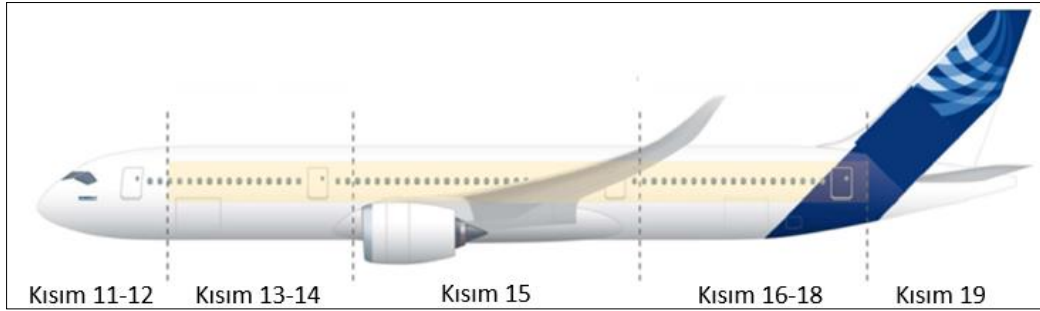
Tipik olarak montaj fikstürü tasarımı, fonksiyonlarına göre sabitleyici, konumlayıcı ve destek bölgelerinden oluşmaktadır. Şekil 6.1.'de bir montaj fikstürünün elemanlarının sınıflandırılması en basit hali ile gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Montaj fikstürü elemanlarının sınıflandırılması [83]

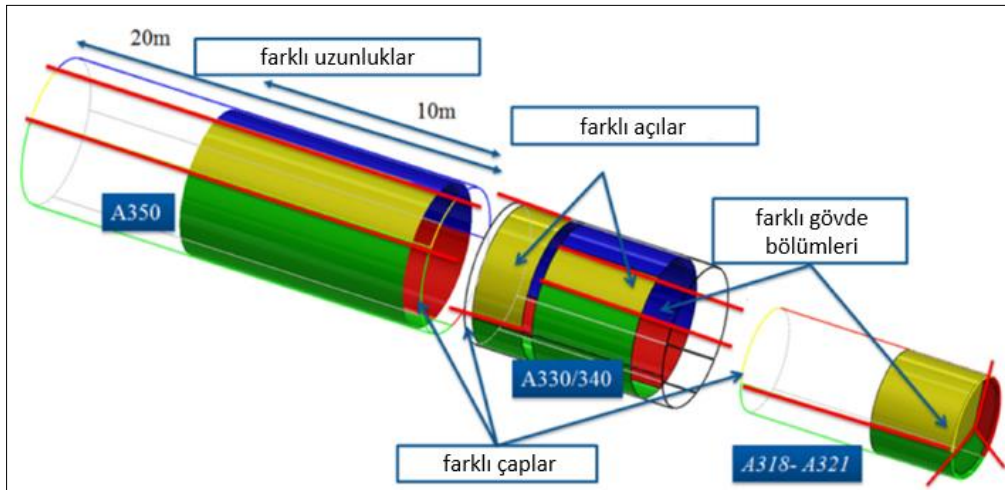
Montaj fikstürleri genellikle uçak gövde paneli boyutlarından daha büyük ve sabit bir yapıya sahiptir. Dolayısı ile yerini değiştirmek, yeniden kullanmak, üzerinde kalıcı değişiklikler yapmak oldukça zordur. Uçak gövde panellerinin üretim oranı artırılmak istenirse yeni montaj fikstürlerine ihtiyaç duyulmakta, üretim oranı azaltılmak istenirse de montaj fikstürleri mevcut kapasitenin altında kullanılmaktadır. Bu nedenlerle, havacılık endüstrisinin üretim taleplerini karşılamak için yeniden yapılandırılabilir fikstür sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yeniden yapılandırılabilir fikstür sistemlerinin geliştirilmesi, uçak gövde panelleri başına montaj maliyetinin düşürülmesini sağlar [84].

Geleneksel yaklaşımda, fikstürlerin tasarımı ve üretimi, proseslere ve parçaya özeldir. Esnek fikstür tasarım ve üretimleri ise geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak çeşitli prosesler ve parça geometrileri için yapılmaktadır. Farklı uçak tipleri karşılaştırıldığında, uçak yapılarında birçok benzerlik olduğu görülmektedir. Şekil 6.2.'de Kısım 11-12 uçağın kokpit bölgesini oluşturmaktadır. Bu bölgeye Kısım 13-14 gövdesinin montajı eklenmekte, gövde kanadın da yerleştirileceği Kısım 15 eklenerek uzatılmaktadır. Uçağın arka gövde kısmını Kısım 16-18 oluşturmaktadır. Yatay ve dikey dengeleyicilerin de monte edildiği gövdenin son kısmı ise Kısım 19'dur [85].



Şekil 6.2. Airbus A320 uçağı [35]

Bu gövdeler dört veya altı parça gövde panellerinin montajı ile oluşturulmaktadır. A330/A340 ve A350 uçağı boyut olarak A320 uçağından gövde uzunluğu ve gövde çapı bakımından Şekil 6.3.'teki gibi farklı boyutlarda olmasına rağmen uçak yapıları benzerdir. Yapısal bu benzerlikler göz ardı edildiğinde montaj sistemleri tek bir uçak gövdesine özel olmakta ve fikstürler de sadece tek bir gövde paneli için kullanılmaktadır. Yeni teknoloji ve malzemelerin de geliştirilmesi ile birlikte mevcut montaj sisteminde esneklik azalmakta, bu durum da yatırım ve değişiklik maliyetlerini oldukça yükseltmektedir. Çeşitli uçak modelleri için müşteri talepleri farklılık arz ettiğinden, esnek ve yeniden yapılandırılabilir uçak gövdesi montaj fikstürlerine ihtiyaç daha da artmaktadır. Farklı uçak modellerinin tek bir montaj hattında üretilebilmesi üretim hacmini ve verimliliği de artırmaktadır [35].

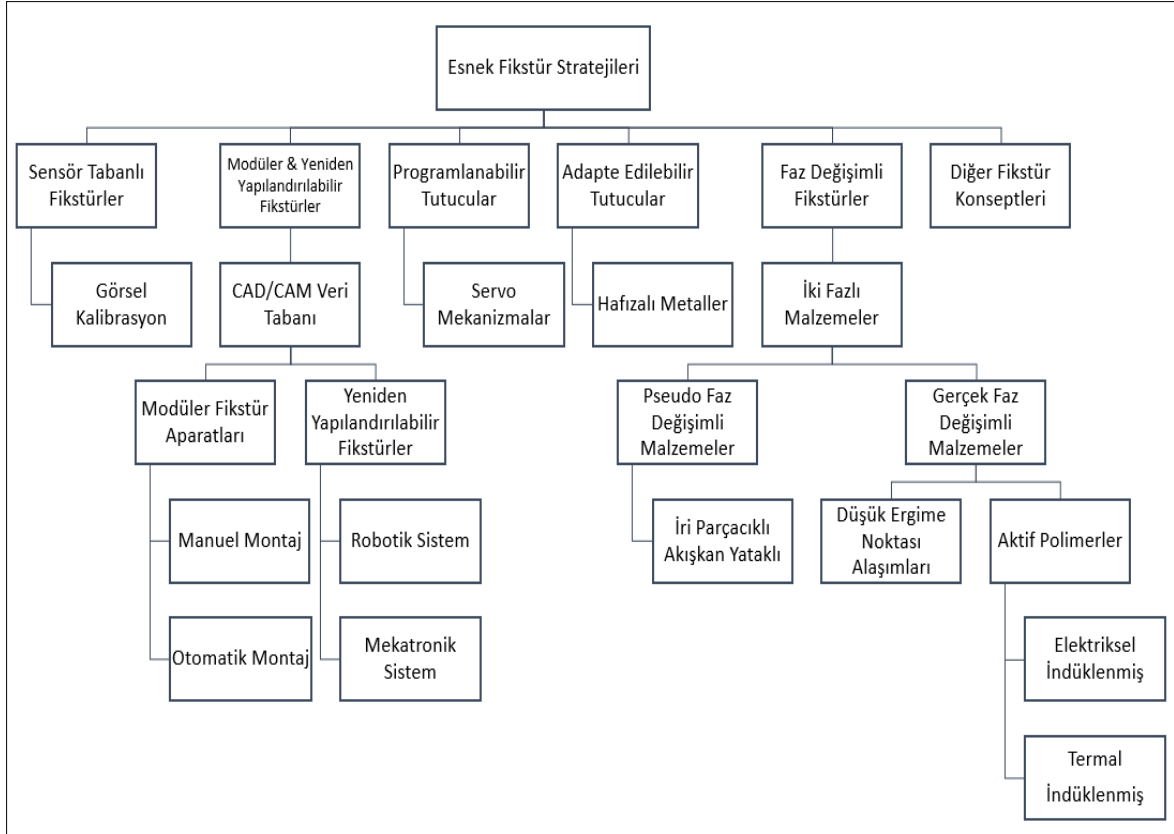


Şekil 6.3. Airbus A318-A321 A330/340 ve A350 uçakları gövde boyutları [35]

En yaygın takım tasarım konsepti kaynak ile çelik konstrüksiyonlarının birleştirilmesidir. Esnek ve yeniden yapılandırılabilir fişktür tasarımında ise kaynak yerine farklı birleştirme ve bağlantı yöntemleri kullanılmaktadır. Uçak üretiminde montaj genel olarak delik delme

ve perçinleme proseslerinden oluşmaktadır. Uçak parçaları fikstürlere sabitlenerek işlemler gerçekleştirilmektedir.

Uçak kanatları için yeniden yapılandırılabilir ya da modüler fikstür tasarımları mevcut iken uçak gövdeleri için bu tarz çalışmalar literatürde de yok denecek kadar azdır. Fikstür tasarımları için yol haritası niteliğindeki esnek fikstür stratejileri Şekil 6.4.'te gösterilmiştir.



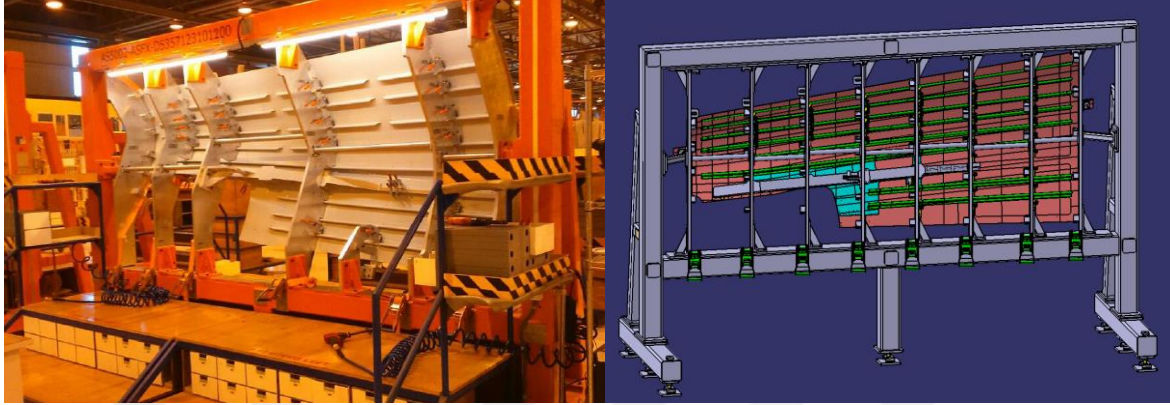
Şekil 6.4. Esnek fikstür stratejileri [86]

Bu nedenlerle uçak gövde panelleri için de yeniden yapılandırılabilir veya modüler montaj fikstürleri tasarımları ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

## 6.2. Sabit ve Modüler Montaj Fikstürlerinin Tasarımı

Sabit montaj fikstürlerinin tasarımında modüler kitler kullanılmamaktadır. Kirişler kaynak ile birleştirilmekte ve panel tutucular master geometriye göre şekillendirilmektedir. Modüler fikstür tasarımlarında ise kutu profil bağlantı sisteminin kullanılması Şekil 6.5.'te gösterilen geleneksel yöntemlere göre yapılan tasarımlara göre detay parça teknik resim hazırlama sürelerinde %81, fikstür üretiminde %58 zaman kazancı sağlamaktadır. İlk yatırımda fikstür

maliyeti geleneksel fikstür maliyetlerine göre %25 daha fazla olmasına rağmen kutu profil bağlantı konsepti farklı ve yeni projelerde tekrar kullanıldığında %74 oranında genel maliyeti azalmaktadır [36].



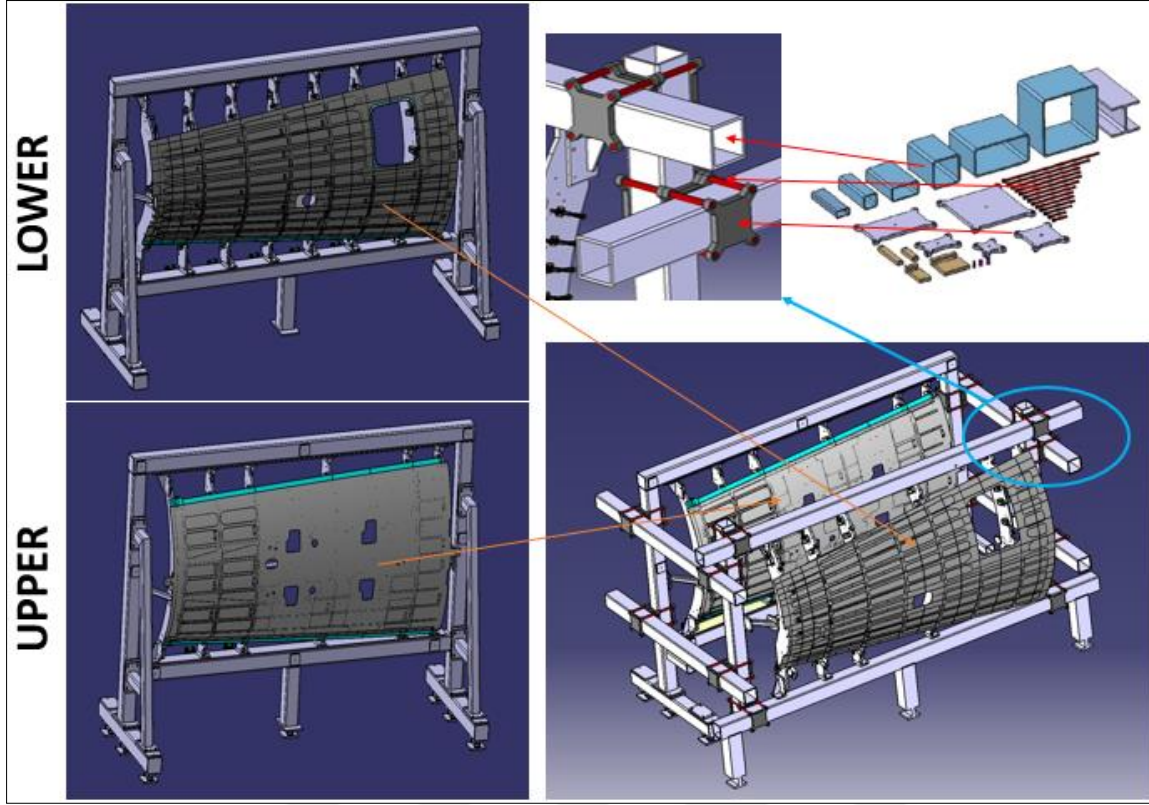
Şekil 6.5. Geleneksel sabit uçak gövde paneli fikstürleri

Farklı tipteki uçakların gövde panel fikstürleri de kutu profil bağlantı sisteminin bağlantı bölgeleri değiştirilerek tasarlanabilir. Gerçek üretim verilerinden ve simülasyon sonuçlarından da elde edildiği üzere alt panel aylık üretim miktarı en düşük olduğundan, modüler fikstür tasarımında diğer panel fikstürlerinin alt panel fikstürlerine dönüştürülmesi için kutu profil bağlantı sistemi kullanılmıştır. Mevcutta kullanılan, geleneksel uçak gövde panel fikstürlerinin boyutları Çizelge 6.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Sabit uçak gövde paneli fikstürlerinin boyutları

PANELLER	EN (mm)	BOY (mm)
Üst	3600	2050
Üst Sol	3635	1904
Üst Sağ	3635	1904
Alt	3680	2210
Alt Sol	3750	2150
Alt Sağ	3750	1700

Uçak gövde paneli fikstürleri için 150x150 boyutlarındaki her bir sabitleme plakasında dört adet delik mevcuttur. 25-100 mm plakalarda M5, 50-200 mm plakalarda M10, 100-400 mm plakalarda ise M16 cıvata kullanılmaktadır. Her cıvata 320 Nm ile sıkılmakta ve plaka yaklaşık 105000 N yüke maruz bırakılmaktadır. Toplamda bir plakaya ortalama 420000 N yük gelmektedir.



Şekil 6.6. Modüler kutu profil bağlantı uçak gövde paneli fikstürü

Modüler fikstür tasarlanırken ana çerçeve yapısı ve master geometri korunmuş, kutu profil bağlantı sistemi ile fikstür ötelenerek birleştirilmiştir. Ek destekler için üç adet pedestal konulmuştur. Örnek olarak Şekil 6.6.'da gösterilen fikstürlerde, üst panel montajı için çalışan bir operatör üst panel montajını bitirmesine müteakip bu paneli fikstürden çıkarabilmekte ve erişim problemi olmaksızın alt panel montajı çalışabilmektedir. Modüler tasarım ile birlikte üst, üst sol, üst sağ, alt sağ ve alt sağ panel fikstürleri alt panel fikstürlerine dönüştürülebilmektedir.

### 6.3. Sabit ve Modüler Montaj Fikstürlerinin Yapısal Analizi

Bu bölümde sabit ve modüler montaj fikstürlerinin analitik yöntemler ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapısal analizleri yapılmıştır.

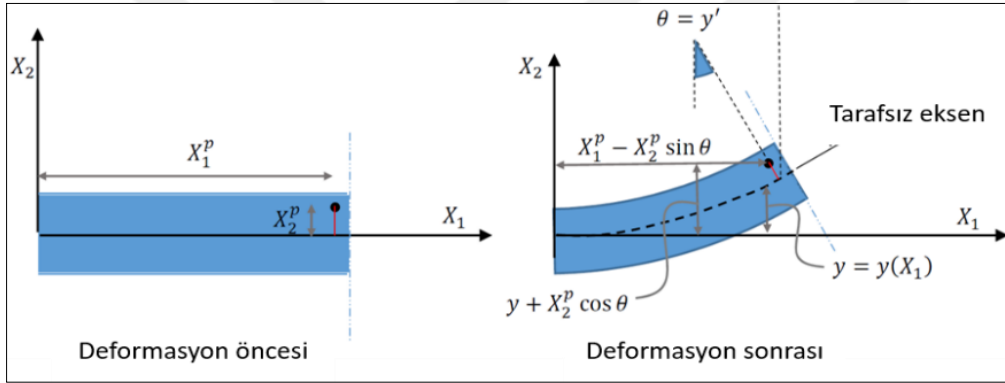
#### 6.3.1. Sabit montaj fikstürünün yapısal analizi için analitik yöntemler

Analitik hesaplamalar sistemlerin gelen yüklere karşı tolere edilebilir sınırlar içinde olduklarını doğrulamak için yapılır ve yapısal analizin önemli bir parçasıdır. Sabit montaj

fikstürünün yapısal analizi için analitik hesaplamalar kiriş teorileri incelenerek yapılmıştır. Bir kiriş, boyutlarından biri diğer ikisinden önemli ölçüde daha uzun olan, aynı zamanda aksenal, eğilme ve burulma yüklerini taşıyabilen bir yapı olarak tanımlanabilir. Analitik hesaplamalar ile kirişlerin yapısal analizi için iki ana teori incelenmiştir. Bunlar;

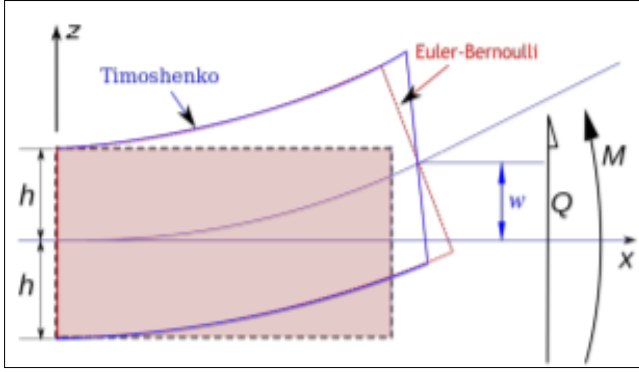
1. Euler-Bernoulli
2. Timoshenko

*Euler Bernoulli Kiriş Teorisi;* Euler Bernoulli kiriş teorisinde, Şekil 6.7.'deki gibi kiriş kesitinin kiriş eksenine göre eğilme sırasında bir düzlem olarak kaldığı varsayılır. Enine kesit sonsuz rijittir ve yüklemeye altında herhangi bir deformasyona uğramaz [87].



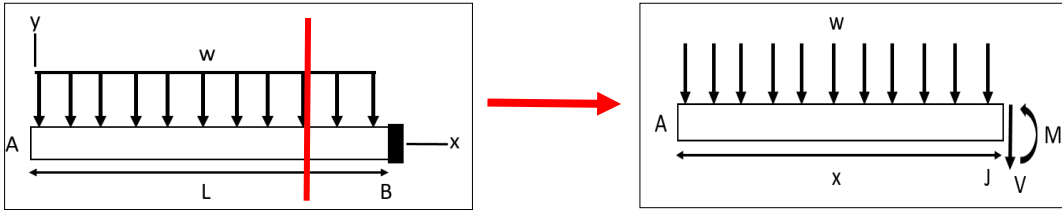
Şekil 6.7. Euler-Bernoulli kiriş teorisini

*Timoshenko Kiriş Teorisi;* Şekil 6.8.'deki Timoshenko kiriş teorisini, Euler-Bernoulli kiriş teorisine eğilme momenti, yanal yer değiştirme, rotasyonel atalet ve kayma distorsiyonunun etkileri eklenerek ortaya çıkarılmıştır. Bu teorideki en önemli parametre, alan azaltma faktörü olarak da adlandırılan  $k$  şekil faktörüdür. Bu parametreye kesit üzerinde kayma sabit olmadığı için ihtiyaç duyulmuştur [87].



Şekil 6.8. Timoshenko kiriş teorisi

Sabit fikstür kirişinin yapısal analizi için Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Amaç elastik eğrisi hesaplanacak olan kirişin serbest uçtaki eğilme değerinin bulunmasıdır. Bu eğilme değeri kutu profil bağlantı sistemi ile tasarlanan modüler montaj fikstürünün maksimum yük altındaki eğilme değeri ile karşılaştırılacak ve modüler montaj fikstürünün maksimum yük altında kullanılabilir olup olmadığı konusunda fikir verecektir. Montaj esnasında fikstüre gelen maksimum yük için serbest uçtaki eğilme 3 mm'den küçük ise fikstür tasarımı montaj proses gereksinimlerini karşılayacaktır [88]. Hesaplama için öncelikle kirişin Şekil 6.9.'daki gibi serbest cisim diyagramı çizilmiştir.



Şekil 6.9. Kirişin serbest cisim diyagramı

Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak momentin hesaplanması için kiriş x mesafesinden kesilirse;

$$\sum M_j = 0$$

$$(w * x) * \frac{x}{2} + M = 0$$

$$M = -\frac{1}{2} * w * x^2 \quad (6.1)$$

Yukarıda amacı ve yöntemi açıklanan bilgiler doğrultusunda sabit fikstürün montajında kirişlerin elastik eğrisinin diferansiyel denklemi momente eşitlenirse ve integre edilirse,

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M = -\frac{1}{2} * w * x^2$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{6} * w * x^3 + C_1 \quad (6.2)$$

Sabit fikstürün montajında kirişler için birinci sınır koşulları tanımlandığında,

$$\left[ x = L, \frac{dy}{dx} = 0 \right]$$

$$0 = -\frac{1}{6} * w * x^3 + C_1$$

$$C_1 = \frac{1}{6} * w * L^3$$

$$EI y = -\frac{1}{24} * w * x^4 + \frac{1}{6} * w * L^3 * x + C_2 \quad (6.3)$$

Sabit fikstürün montajında kirişler için ikinci sınır koşulları tanımlandığında,

$$[x = L, y = 0]$$

$$-\frac{1}{24} * w * x^4 + \frac{1}{6} * w * L^3 * x + C_2 = 0$$

$$C_2 = \left( \frac{1}{24} - \frac{1}{6} \right) * w * L^4 = -\frac{3}{24} * w * L^4$$

a) Elastik eğri;

$$y = -\frac{w}{24EI} * (x^4 - 4 * L^3 * x + 3 * L^4) \quad (6.4)$$

b)  $y @ x = 0$ ; Serbest uçtaki eğilme;

$$y_A = -\frac{3wL^4}{24EI} = \frac{wL^4}{8EI}$$

$$y_A = -\frac{3 * 312.5 \frac{N}{m} * 3.68^4 m^4}{24 * 200 * 10^9 \frac{N}{m^2} * 0.0000138463262 m^4} = -0.0025869 m \approx -2.59 mm$$

c)  $\frac{dy}{dx} @ x = 0$ ; Serbest uçtaki eğim;

$$\theta_A = -\frac{wL^3}{6EI} = -\frac{312.5 \frac{N}{m} * 3.68^3 m^3}{6 * 200 * 10^9 \frac{N}{m^2} * 0.0000138463262 m^4} = -0.0009373 rad = -0.054^\circ$$

Kirişin serbest ucundaki toplam deformasyonun bir kısmı normal gerilmelerden, kalan kısmı da kesme gerilmelerinden oluşmaktadır. Euler-Bernoulli normal gerilmeleri hesaba katar. Timoshenko kiriş teorisi ise hem normal hem de kesme gerilmelerini hesaba dahil ettiğinden gerçeğe daha yakın deformasyon sonuçları elde edilmesini sağlar. Fakat kirişte  $(h/L)^2 < 0,2$

ise Timoshenko'nun etkileri ihmal edilebilmektedir. Bu etkiler kayda değer değildir. Nitekim aşağıdaki hesap bu savı doğrulamaktadır. Bir kenarı sabitlenen ve homojen olarak yüklenen kirişte kesme yükünün oluşturduğu eğilme miktarı hesaplanırsa;

$$\left(\frac{h}{L}\right)^2 = \left(\frac{150}{3680}\right)^2 \approx 0,001 < 0,2$$

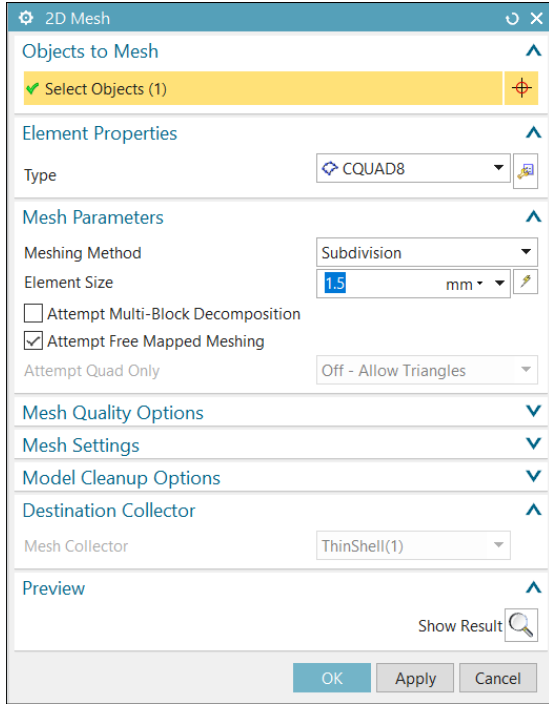
$$y_s = -\frac{7wL^2}{64GA} = -\frac{7 * 312,5 \frac{N}{m} * 3,68^2 m^2}{64 * 80 * 10^9 \frac{N}{m^2} * 0,00405836 m^2} = -1,52073 * 10^{-6} \approx 0,001521 mm$$

Bu durumda toplam eğilme miktarı aşağıdaki gibi bulunur.

$$y_{toplam} = y_A + y_s \approx 2,5915 mm$$

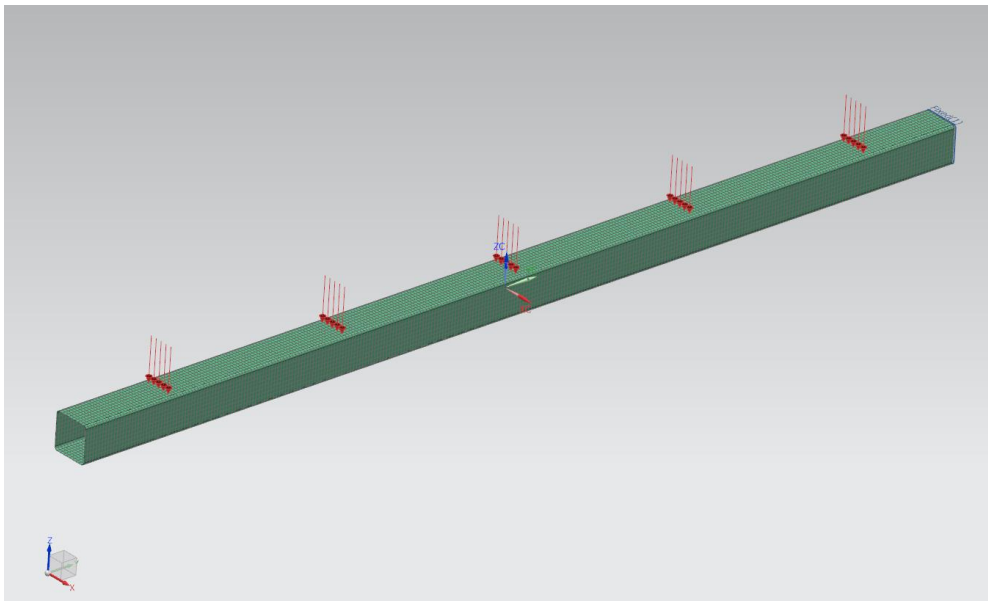
### 6.3.2. Sabit montaj fikstürünün yapısal analizi için sonlu elemanlar metodu

Sabit fikstür kirişinin sonlu elemanlar analizi için Siemens NX yazılımı Pre-post modülü kullanıldı. Analizin yapılması için sırasıyla Siemens NX yazılımında fikstür kirişlerinin uygun ölçülerde modellenmesi yapıldı. Üç boyutlu modelin orta yüzeyi çıkarılarak kiriş modeli iki boyuta indirildi. İki boyuta indirilmeyen modellerde analiz zorlaşmakta ve atılan mesh tipi üçgensel ile sınırlı olmaktadır. Düz plakalar ile yapılan analizlerde üçgensel meshin karesel mesh kadar sağlıklı sonuçlar vermediği doğrulanmıştır. Çelik malzemenin mekanik özellikleri iki boyutlu kabuk modele atandı. Malzeme atamadan sonra modele Şekil 6.10.'da gösterildiği gibi mesh tipi CQUAD8 ve mesh boyutu 1,5 mm olacak şekilde mesh atandı.



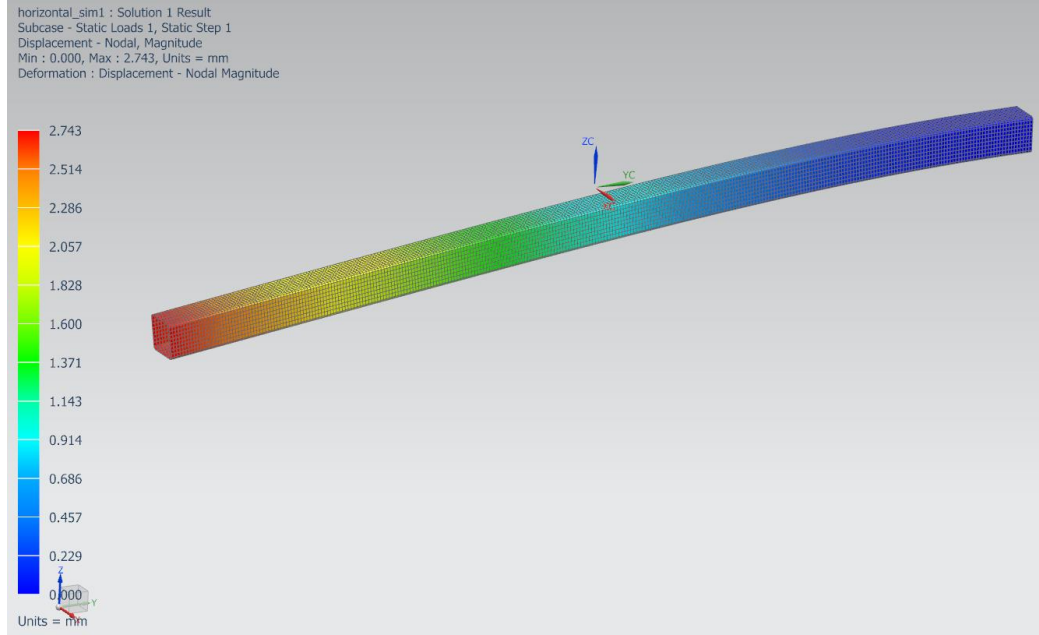
Şekil 6.10. İki boyutlu mesh tipi

Mesh atamasından sonra sınır şartları oluşturuldu ve tanımlandı. Modelin bir kenarı üç dönme ve üç öteleme hareketi kısıtlanacak şekilde sabitlenip eğilme yapacak diğer kenar serbest bırakıldı. Modüler fiktürün montajı yapılırken kirişin kendi ağırlığından kaynaklanan ve kritik yük olan 312,5 N/m yayılı yük Şekil 6.11.'deki gibi yüzey boyunca – z yönünde modele tanımlandı.

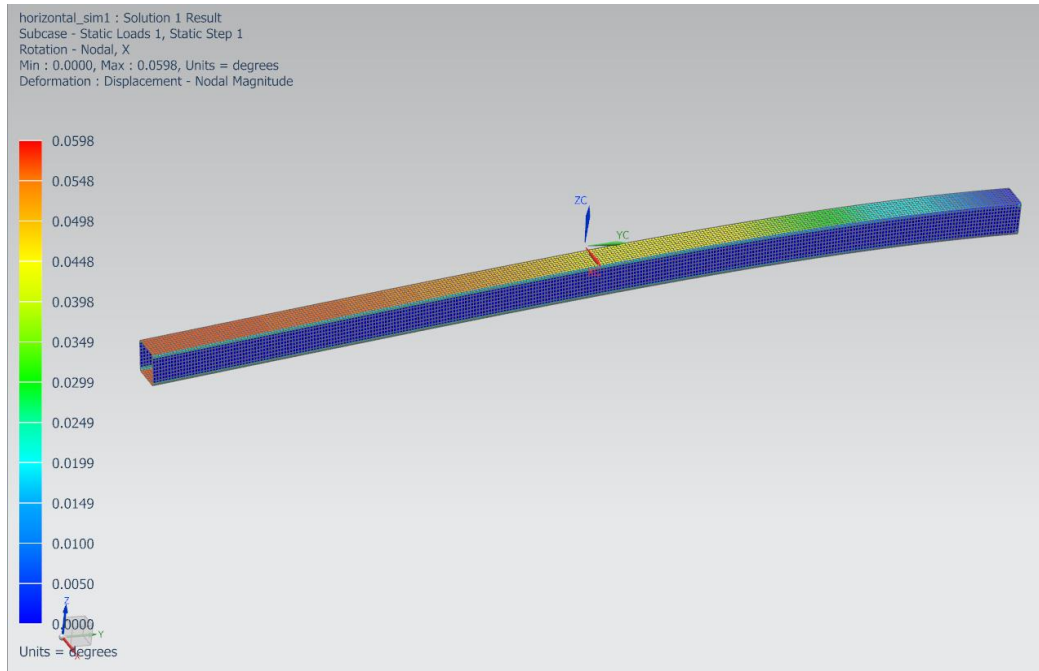


Şekil 6.11. Mesh, sınır şartları ve kritik yayılı yük

Sonlu elemanlar analizinde iki boyutlu yüzey model, malzeme, mesh, sınır şartları ve yük tanımlamaları yapıldıktan sonra model NX Nastran çözücüsü ile çözüldü. Eğilme miktarı Şekil 6.12.'deki gibi 2,743 mm ve eğim açısı Şekil 6.13.'teki gibi  $0,0598^\circ$  olarak hesaplandı.



Şekil 6.12. Kirişin eğilme değeri

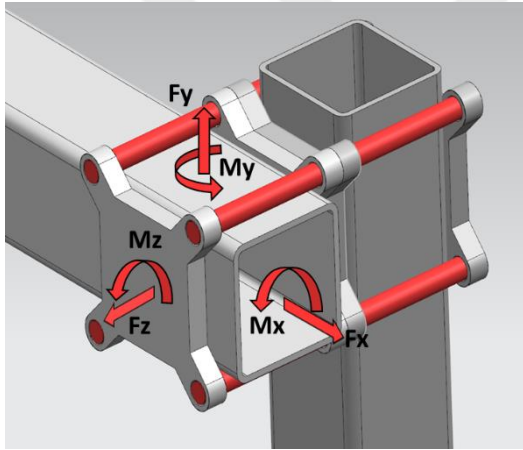


Şekil 6.13. Kirişin eğim değeri

Analitik yöntemler ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak eğilme miktarları %5,58 fark ile hesaplanmıştır.

### 6.3.3. Modüler montaj fikstürünün yapısal analizi için analitik yöntemler

Kutu profil bağlantı bağlantılarının mukavemetini hesaplamak için analitik yöntemler ve sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Kutu profil bağlantı sistemi ile tasarlanan uçak gövde paneli montajı fikstürlerine gelen asal yüklemeler Şekil 6.14.'te gösterilmiştir. Dört adet cıvata tipik olarak, müsaade edilen maksimum cıvata yükünün %70'ine denk gelen  $F_p$  ön yükü ile sıkılmıştır. Yüzeyle ilgili sürtünme katsayısı değeri 0,1-0,3 arasındadır. Test standartlarına göre sürtünme katsayısının 0,15'ten büyük olmaması önerilmektedir [88]. Bu nedenle hesaplamalarda sürtünme katsayısı 0,1 olarak alınmıştır. Güvenlik faktörü ise yapılabilecek manuel hataların mukavemeti azaltabilecek olması nedeniyle en az 2 olarak ele alınmıştır.



Şekil 6.14. Kutu profil bağlantısı için asal yüklemeler

M16 cıvata için maksimum yük  $F_{max}$  değeri, cıvataların maksimum yük değerinin %70'ine eşit olan ön yükleme değeri  $F_p$ , cıvataların maksimum yük değerinin %20'sine eşit olan minimum yük değeri  $F_{min}$ , kutu profil bağlantı plakalarının en ve boy değerleri H ve L, yüzeyler arası sürtünme kuvveti değeri  $\mu$ , Çizelge 6.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Kutu profil bağlantı hesaplamaları için parametre ve değerler tablosu

PARAMETRELER	DEĞERLER
$F_{max}$	150000 N
$F_p$	105000 N
$F_{min}$	30000 N
A	0,15 m
B	0,15 m
$\mu$	0,1

Bu parametreler kullanılarak formüller ile maksimum yük ve moment değerleri hesaplanmıştır. Yük ve moment hesaplama sonuçları Çizelge 6.3. ve Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

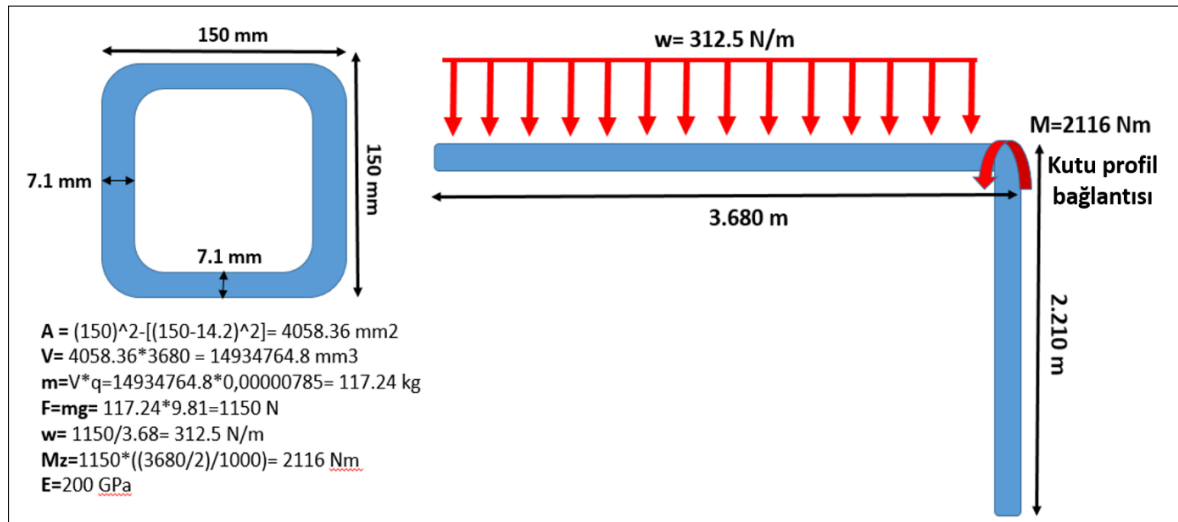
Çizelge 6.3. Maksimum yüklerin hesaplanması

YÜK	KUTU PROFİL FORMÜL	SONUÇ
$F_x$	$F_{xmax} = 4 * F_p * \mu$	42000 N
$F_y$	$F_{ymax} = 4 * F_p * \mu$	42000 N
$F_z$	$F_{zmax} = 4 * (F_p - F_{min})$	300000 N

Çizelge 6.4. Maksimum momentlerin hesaplanması

MOMENT	KUTU PROFİL FORMÜL	SONUÇ
$M_x$	$M_{xmax} = 2 * (F_p - F_{min}) * A$	22500 Nm
$M_y$	$M_{ymax} = 2 * (F_p - F_{min}) * B$	22500 Nm
$M_z$	$M_{zmax} = F_p * \mu * \sqrt{A^2 + B^2}$	2227 Nm

Modüler alt panel fikstürünün montajı yapılırken kirişlerin kendi ağırlığından dolayı kutu profil bağlantısında oluşturduğu kritik  $M_z$  momentini Şekil 6.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Kutu profil bağlantısında ağırlığın oluşturduğu kritik  $M_z$  momentini

Modüler kutu profil bağlantı montaj fikstüründe, manuel ya da robotik montaj operasyonlarındaki  $F_x$ ,  $F_y$  ve bu kuvvetlerin oluşturduğu,  $M_x$  ve  $M_y$  momentleri kiriş mukavemetinden dolayı kritik yükler değildir. Sistemde z yönündeki momentini plakalar arası sürtünme ve yüzey ile boylu boyunca temas halinde olan civatalar taşımaktadır. Sistemin

montaj operasyonlarında uçak gövde panellerini sabitleyebilmesi için kutu profil bağlantı mukavemetinin  $M_z$  momentinden daha yüksek olması gerekmektedir. Kritik yük sadece kutu profil bağlantı sisteminin karşıladığı  $F_z$  kuvvetinin oluşturduğu  $M_z$  momentidir. Bu nedenle  $M_z$  momenti kritiktir ve hesaplamalarda bu moment baz alınmıştır. Hem Airbus makalesinden [88] uyarlanan Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4.'teki formüller ile hem de Şekil 6.15'teki mukavemet hesaplamaları kullanılarak yapılan analitik hesaplamalar karşılaştırıldığında kutu profil bağlantısına fikstür için kritik olan  $M_z$  yönünde etki eden maksimum moment %5 fark ile hesaplanmıştır.

#### 6.4.4. Modüler montaj fikstürünün yapısal analizi için sonlu elemanlar metodu

Tez kapsamında tasarlanan ve analizi yapılan modüler fikstürün sabit fikstüre göre deformasyon açısından dezavantajlı olması beklenmektedir. Modüler fikstür yapısı parça parça eklenerek oluşturulurken bütün komponentlerin montajı aynı anda yapılamayacağından, fikstürün ara montaj proseslerindeki yapısı, son montajdaki fikstür yapısına nazaran daha zayıf olması muhtemeldir. Bunun yanında kutu profil bağlantı yapısı kaynaklı birleşim bölgelerine sahip olmadığı için sürtünmeli yüzeylere bağlı olarak birbiri üzerinde hareket edebilmektedir. Fakat sabit fikstürlerde yapı kaynaklı olduğu için böyle bir hareket söz konusu değildir.

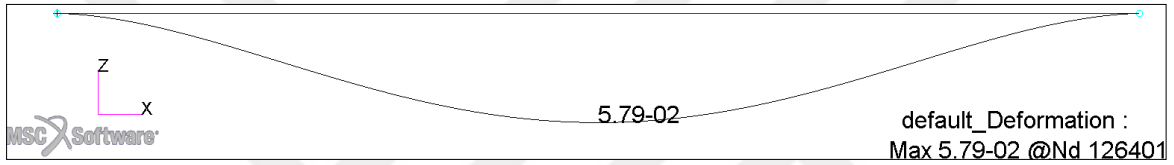
Modüler ve sabit fikstürlerde yapı ihtiyacın çok ötesinde mukavim tasarlanmıştır. Bunun sebebi fikstür tasarımında yapıda oluşacak sehim miktarının montaj proseslerinin doğruluğu için belirli bir seviyenin altında kalması gerekliliğidir. Sabit fikstürler bu ihtiyacı karşılamaktadır. Modüler fikstürün yapı olarak sehim bakımından bu ihtiyaçları karşılayıp karşılayamadığının mukayese edilebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

Bu bağlamda modüler fikstür kirişinin sonlu elemanlar analizinde modelleme ve sonuçların okunması için Patran, çözücü olarak Nastran programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

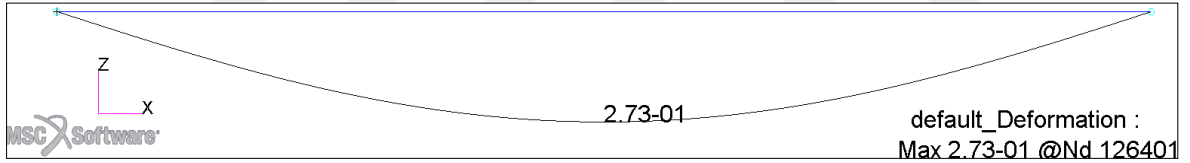
- 1) CBEAM bir boyutlu (1D) elemanlar kullanılarak yapılan analiz
- 2) CBEAM (1D) ve CQUAD (2D) elemanlar kullanılarak yapılan analiz

*CBEAM bir boyutlu (1D) elemanlar kullanılarak yapılan analiz;*

- Sabit fikstür için kirişin yayılı yükü altında, kirişlerin kaynaklı yapısını modellemek amacıyla iki uçta da ankastre (tüm serbestlik dereceleri 1,2,3,4,5,6 sabit) sınır koşullarıyla maksimum sehimi Şekil 6.16.'daki gibi 0,058 mm bulunmuştur. Burada maksimum dönme rijitliği,  $\mu=\infty$  değerine sahiptir.
- Modüler fikstür için aynı yayılı yük altında, sabit fikstürden farklı olarak sınır koşulları ankastre değil basit mesnetleştirilmiş (iki ucu 1,2,3 sabit, dönme serbest) sınır koşullarıyla maksimum değeri Şekil 6.17.'deki gibi 0,273 mm bulunmuştur. Burada minimum dönme rijitliği,  $\mu=0$  değerine sahiptir.



Şekil 6.16. Sabit fikstür 1D modelleme ve maksimum sehimi

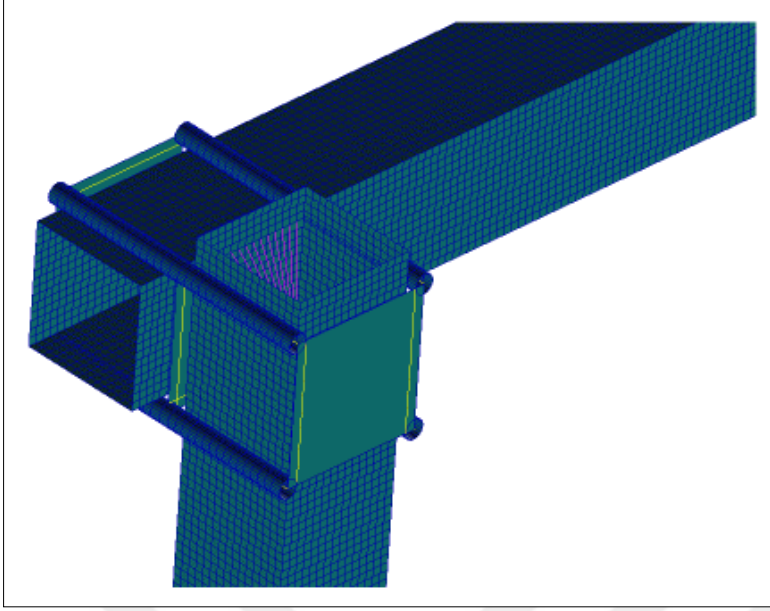


Şekil 6.17. Modüler fikstür 1D modelleme ve maksimum sehimi

Şekil 6.16. ve Şekil 6.17.'de gösterilen sonuçlara istinaden modüler fikstür kutu profil bağlantı yapısına bağlı olarak değişen sehimin maksimum ve minimum değerler olan bu iki değer arasında gerçekleşmesi beklenmektedir.

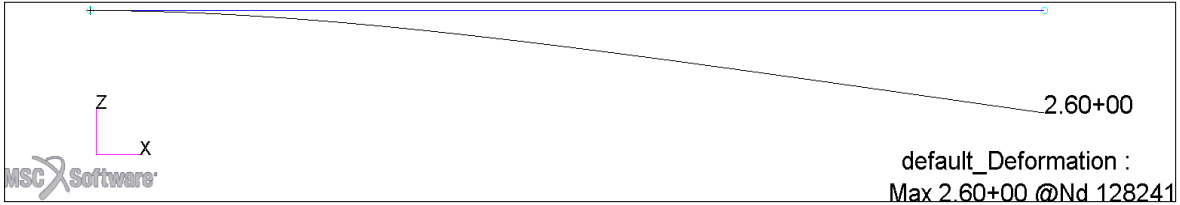
*CBEAM (1D) ve CQUAD (2D) elemanlar kullanılarak yapılan analiz;*

Yapısal analizde modüler fikstür için aynı yayılı yük ve profil geometrisi kullanılarak maksimum sehimi değerleri hesaplanmıştır. CBEAM (1D) ve CQUAD (2D) elemanlar kullanılarak oluşturulan Şekil 6.18.'de gösterilen ikinci bir modelde kutu profil bağlantı yapısından da kaynaklanması öngörülen ek deformasyon hesaplanmıştır.



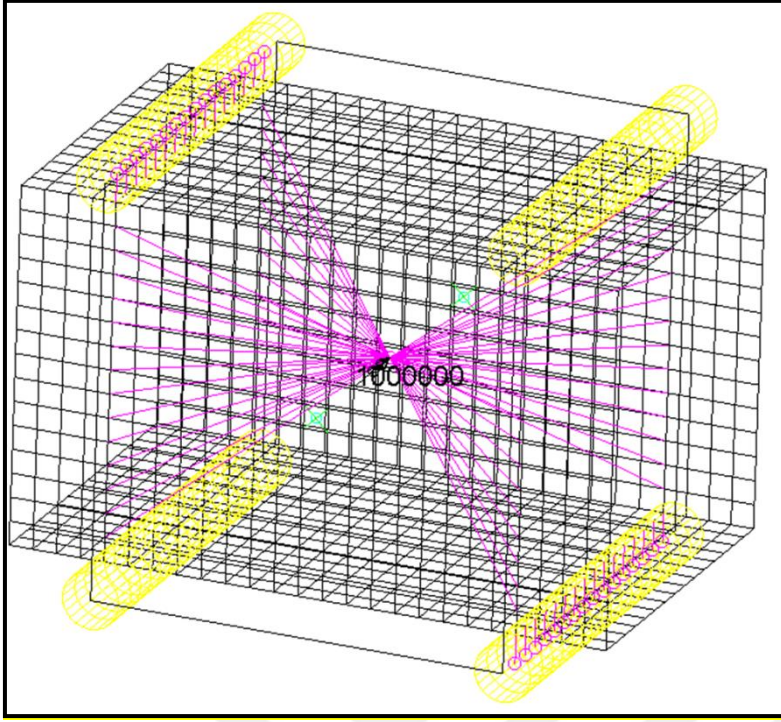
Şekil 6.18. Modüler fikstür kutu profil bağlantısı sonlu elemanlar modeli

Modüler fikstürün montaj prosesi aşamalarında muhtemelen karşılaşılabilecek durumda kirişlerin bir ucu kutu profil bağlantı yapısına bağlı iken diğer ucu serbest şekilde kalacaktır. Burada iki çeşit deformasyon oluşacaktır. İlk olarak kirişin kendi ağırlığından dolayı gerçekleşecek olan sehim Şekil 6.19.'da 2.60 mm olarak hesaplanmıştır.



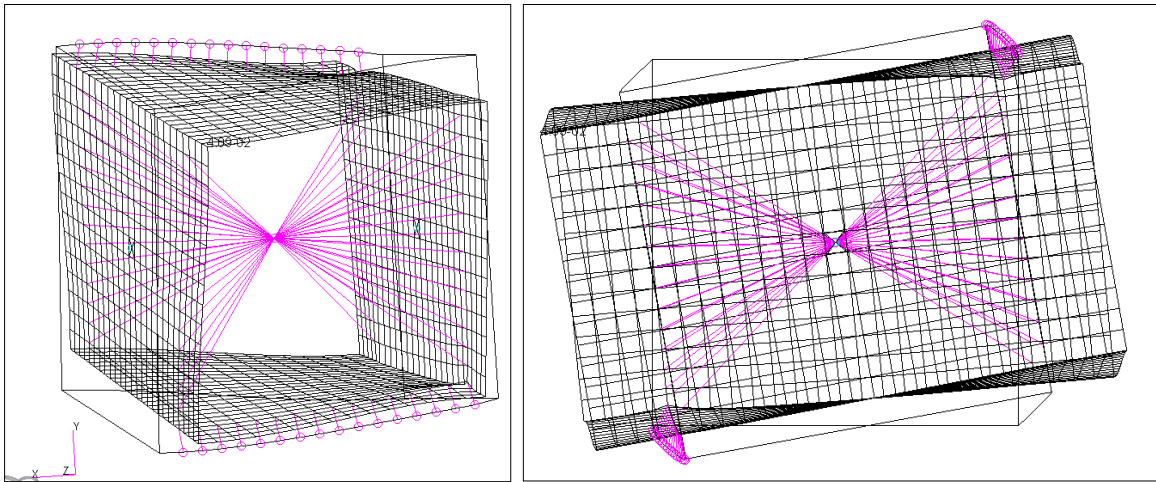
Şekil 6.19. Modüler fikstürde bir ucu serbest maksimum sehim

İkinci olarak da kutu profil bağlantı yapısında profillerin birbirlerine kaynaklı olmamasından dolayı maksimum momentin dönme esnasında köşegenlerdeki civatalar vasıtasıyla temas yüzeylerinden aktarıldığı deformasyon öncesi durumun hesaplanması için kutu profil bağlantı Şekil 6.20.'deki gibi modellenmiştir. Kutu profil bağlantısındaki dönme de kirişin kendi ağırlığına ek olarak bir sehim oluşturacaktır.

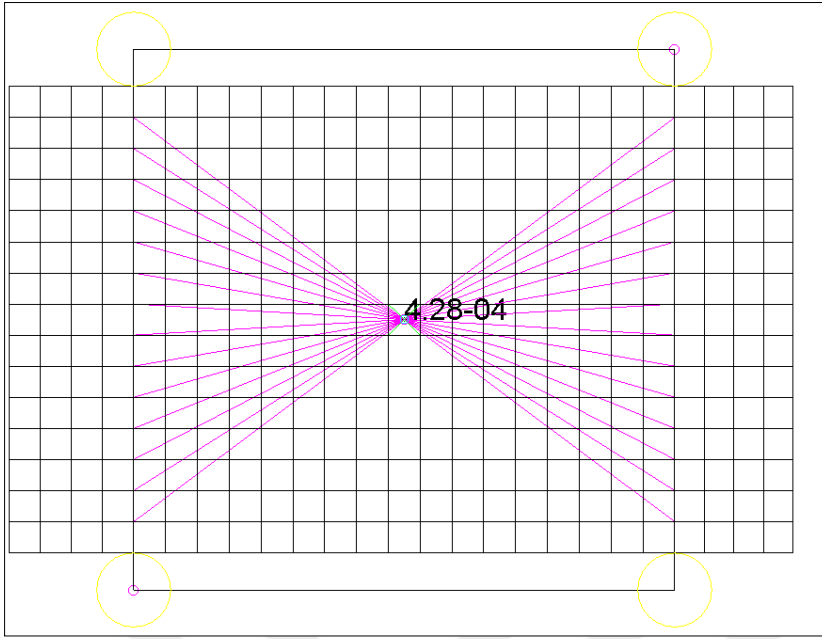


Şekil 6.20. Kutu profil bağlantı yapısında civalatarın temas yüzeyleri modeli

Kutu profil bağlantı yapısının detaylı modellenmesi ve bu yapıdaki dört civatanın geometrik olarak merkezindeki eksene maksimum moment olan 2116 Nm uygulanmasından sonra oluşan açısız deformasyon Şekil 6.21.'deki gibi oluşmuş ve Şekil 6.22.'deki gibi sonuç  $4,28 \cdot 10^{-4}$  radyan veya  $0,0245^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Rotational spring stiffness 86,3 KNm/deg, açısız deformasyon sonucu oluşan sehim ise 1,575 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.21. Kutu profil bağlantı bölgesi deformasyonu



Şekil 6.22. Kutu profil bağlantı bölgesi açısal deformasyon sonucu

#### 6.4.5. Montaj Fikstürlerinin Tasarımı ve Analizinin Sonuçları

Aksiyomatik tasarım prensipleri ile oluşturulan dört farklı uçak gövde paneli montaj sistemi alternatifinin de panel boyutu, bağlayıcı adetinin fazla olması gibi nedenlerle alt panel daha az sayıda üretilmektedir. Değişken taleplere istinaden panel üretim sayısının dengelenmesi için modüler fikstür sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Havacılık literatüründe modüler uçak gövde panelleri fikstürleri ile ilgili yapılan çalışma sayısı yok denecek kadar azdır. Fikstür çalışmaları genellikle uçak kanadı, pilon, yakıt tankı ve detay parçalar üzerine yapılmıştır. Modüler fikstürün dünya havacılığındaki farklı uçak yapıları için örnekleri, uçak gövde panelleri montajı için de kullanılacak modüler fikstür tasarım fikrini ortaya çıkarmıştır. Yapılan çalışma ile CATIA programı kullanılarak kutu profil bağlantı sistemi ile modüler fikstürler tasarlanmış, üst, üst sol, üst sağ, alt sol, alt sağ panel fikstürleri alt panel fikstürüne dönüştürülmüştür.

Tasarım sonrasında sabit ve modüler montaj fikstürlerinin analitik yöntemler ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapısal analizleri yapılmıştır. Sabit fikstür kirişinin yapısal analizi için Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileri kullanılmıştır. Fikstürde  $(h/L)^2 < 0,2$  olduğundan Timoshenko'nun etkilerinin ihmal edilebilecek derecede olduğu anlaşılmıştır. Kullanılan kiriş teorileri ile fikstürün montajı esnasında meydana gelen maksimum yük altındaki koşulda analitik hesaplamalar yapılarak serbest uçtaki eğilme

değeri 2,59 mm, serbest uçtaki eğim değeri ise  $0.054^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Sabit fikstürde kiriş teorileriyle elde edilen sonuçların doğrulanması için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Siemens NX programı Pre-post modülü kullanılarak sonlu elemanlar analiziyle kiriş eğilme (sehim) değeri 2,74 mm ve eğim açısı  $0,059^\circ$  olarak hesaplanarak analitik hesaplama sonuçları sırasıyla %5,98 ve %8,47 fark ile doğrulanmıştır.

Modüler fikstürde ise öncelikle kutu profil bağlantı yapısının davranışı incelenmiş, Airbus makalesinde [88] uçak kanadı montajı için kullanılan kutu profil bağlantı hesaplamaları gövde panelleri montajına uyarlanarak kritik moment olan  $M_z$  2227 Nm olarak hesaplanmıştır. Daha sonra modüler fikstürün montajı esnasında kirişlerin kendi ağırlığı nedeniyle oluşturduğu momentin  $M_z$  2116 Nm olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla %4,98 fark ile en kritik momentin montaj operasyonları sırasında değil, modüler fikstürün montajı esnasında kirişlerin kendi ağırlığı nedeniyle oluştuğu tespit edilmiştir. Bu tespit sonrasında modüler fikstürde kirişin kendi ağırlığından kaynaklanan sehim ve kutu profil bağlantı yapısından kaynaklanan sehim olmak üzere iki çeşit deformasyon oluşacağı belirlenmiştir. Modüler fikstürün yapı olarak sehim bakımından sabit fikstüre göre bu ihtiyaçları karşılayıp karşılayamadığının mukayese edilebilmesi için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Bu bağlamda sonlu elemanlar analizinde modelleme ve sonuçların okunması için Patran, çözücü olarak Nastran programı kullanılmıştır. CBEAM (1D) ve CQUAD (2D) elemanlar kullanılarak yapılan analizlerde modüler fikstür için aynı yayılı yük ve profil geometrisi kullanılarak kirişin kendi ağırlığından dolayı gerçekleşen maksimum sehim değeri 2.60 mm olarak hesaplanmıştır. Kutu profil bağlantı yapısında profillerin birbirlerine kaynaklı olmamasından dolayı maksimum momentin dönme esnasında köşegenlerdeki civatalar vasıtasıyla temas yüzeylerinden aktarıldığı deformasyon öncesi durumun hesaplanması için kutu profil bağlantısı modellenmiştir. Kutu profil bağlantısına maksimum moment olan 2116 Nm uygulanmasından sonra oluşan açısız deformasyon  $4,28 \cdot 10^{-4}$  radyan olarak hesaplanmış, açısız deformasyon değeri kirişin serbest ucundaki sehim değerine 1,575 mm olarak dönüştürülerek, modüler kirişteki toplam maksimum sehim 4,175 mm olarak hesaplanmıştır. Analitik hesaplamalar ve sonlu elemanlar metodu ile elde edilen analiz sonuçlarının tutarlılığı tasarlanan modüler fikstürlerin havacılık endüstrisinde kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Modüler fikstürlerin tasarımı ve analizi sonucunda üretim optimizasyon verileri ve yüzdelik üretim artışı Çizelge 6.5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. Modüler fikstürler ile üretim optimizasyonu

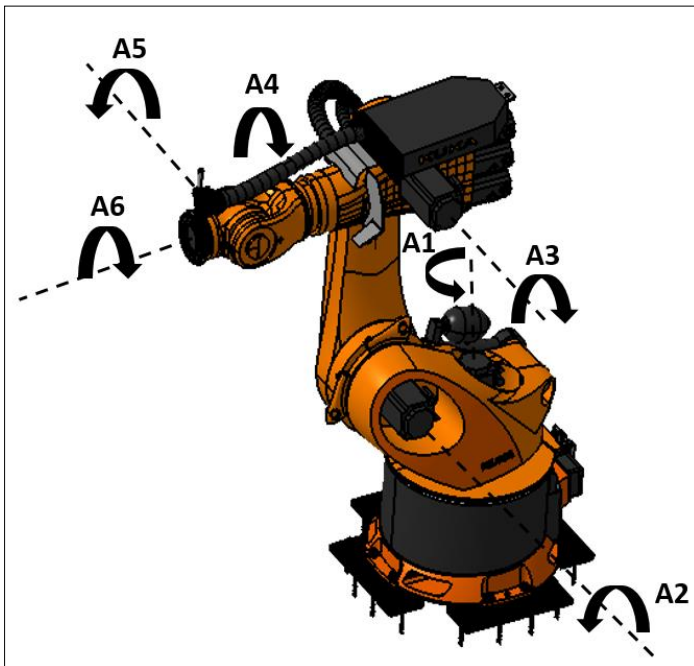
Üretim Miktarları (ay) – Modüler Fikstür Tasarımı ve Analizi Sonrası				
Paneller (Panel/ay)	Uçak Gövde Paneli Montaj Sistemi Alternatifleri			
	Birinci	İkinci	Üçüncü	Dördüncü
ÜST	12	24	28	58
ÜST SOL	12	24	27	45
ÜST SAĞ	12	23	27	44
ALT	10	21	22	35
ALT SOL	11	23	24	52
ALT SAĞ	11	23	25	54
TOPLAM PANEL/AY:	68	138	153	288
TOPLAM SET/AY:	10	21	22	35
OPTİMİZASYON SONRASI SET/AY:	11	23	25	48
ÜRETİM ARTIŞI %:	10	9,52	13,63	37,14



## 7. ENDÜSTRİYEL ROBOTLARIN SEÇİMİ

Endüstriyel robotlar uygulama alanlarına ve gereksinimlere göre farklı kabiliyetlere ve spesifikasyonlara sahiptir. Havacılık endüstrisi gibi oldukça spesifik proseslerin bulunduğu uçak üretim alanlarında uygun, efektif ve gereksinimleri karşılayan bir robot seçimi yapmak zorludur. Bu seçimi doğru yapabilmek için sayısız robot seçimi metodu mevcuttur [89]. Bu bölümde hesaplamalarının nispeten kolay, hesaplama zamanlarının kısa ve güvenilirliğin yüksek olması gibi avantajları nedeniyle metot olarak MOORA yöntemi tercih edilmiştir.

Havacılık projelerinde delme, perçinleme, taşıma, parça pozisyonlama, ölçümleme gibi üretim proseslerinde sıklıkla Şekil 7.1.'de gösterilen altı eksenli endüstriyel KUKA robotları kullanılmaktadır. Literatürde dünya havacılığında KUKA robotlarının hangi uçak üretim proseslerinde ve uçak komponentlerinde kullanıldığı bilgileri Çizelge 7.1.'de gösterilmiştir. Tez çalışmasında ise hiyerarşik ürün sistem ağaçları oluşturularak genel ürün sistem ağacından teknik olarak uygulanabilir olan üçüncü alternatifte kullanılan ve FR-DP'leri oluşturulan destek çitası yerleştirme robotları, kaburga toka robotları, delme ve perçinleme robotlarından montaj ve komponent yerleştirme proseslerinde DP<sub>1721</sub> ve DP<sub>122</sub> için en uygun robotların seçim çalışması yapılacaktır.



Şekil 7.1. Altı eksenli endüstriyel KUKA robotu

Çizelge 7.1. Uçak üretiminde robot uygulamaları literatürü

	YAZAR	YAYIN YILI	FİRMA	ROBOT TİPİ	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	UÇAK KOMPONENTİ
1	Gray ve diğerleri [76]	2013	Electroimpact Inc.	KUKA KR 500-L340	Montaj ve Ölçüm (Delme, Perçinleme)	Kanat, Kanatçıklar, Gövde
2	Cibiel ve Prat [43]	2006	Airbus UK Alema Automation	KUKA KR 240-L150	Montaj (Delme, Perçinleme)	Kanat
3	Mehlenhoff ve Vogl [45]	2009	Broetje Automation GmbH Eurocopter Deutschland	KUKA KR 360	Montaj ve Ölçüm (Delme, Perçinleme, Sızdırmazlık)	Kargo Kapağı
4	Cano ve diğerleri [90]	2016	Fada Catec Aernnova Aerospace	KUKA KR60-L30HA	Montaj (Delme)	Alt Montaj Detay Parçalar
5	Rathjen ve Richardson [41]	2013	Electroimpact Spirit AeroSystems Inc.	KUKA KR 500-L480-2 KUKA KR 1000-L750 TITAN	Üretim (Kompozit Serim)	Motor Kapağı
6	Vandaele ve diğerleri [91]	2016	Lisi Aerospace KUKA Systems Aerospace	KUKA KR210-R3300K	Montaj ve Ölçüm (Ön montaj, Delme, Perçinleme, Sızdırmazlık)	Kanat, Gövde
7	Muys ve Bloem [92]	2005	Stork Fokker Aerospace	KUKA 150	Montaj (Delme)	Kuyruk Dümeneği, İrtifa Dümeneği, Kanatçık
8	Schwake ve Wulfsberg [93]	2014	Helmut-Schmidt-Universität	KUKA KR125-2	Malzeme Taşıma ve Parça Yerleştirme	Kanat ve Gövde Detay Parçaları
9	Landau [38]	2016	Electroimpact Inc.	KUKA KR 360	Malzeme Taşıma ve Parça Yerleştirme	Kuyruk Takımı Panelleri
10	Atkinson ve diğerleri [37]	2007	Electroimpact Inc. The Boeing Company	KUKA KR 360-2	Üretim ve Montaj (Delme, Kesme, Çapak Alma)	Kanatçıklar
11	Kingston [94]	2014	Manufacturing Technology Centre	KUKA KR 240 Quantec	Ölçüm (Muayene)	Alt Montaj Detay Parçalar

## 7.1. MOORA Yöntemi

MOORA (Multi-Objective Optimization By Ratio Analysis) metodu birbirinden bağımsız alternatiflerle çok amaçlı optimizasyon için önerilen çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem çeşitli amaçlarla ilgili farklı alternatiflerin performanslarının sayısal parametreler ile karşılaştırılmasını sağlar. Diğer çok kriterli karar verme yöntemlerine göre daha yeni sayılan MOORA yöntemi son yıllarda birçok endüstriyel problemin çözümünde başarıyla uygulanmıştır. Ancak literatürde havacılık ve havacılıktaki uygulamalar ile ilgili bir MOORA çalışması bulunmamaktadır. MOORA yönteminin avantajlarının benzer yöntemler ile karşılaştırılması Çizelge 7.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. MOORA yönteminin benzer yöntemler ile karşılaştırılması [95]

Yöntemler	Hesaplama Zamanı	Basitlik	Matematiksel Hesaplamalar	Güvenilirlik
MOORA	Çok düşük	Çok basit	Minimum	İyi
AHP	Çok yüksek	Çok kritik	Maksimum	Zayıf
TOPSIS	Orta	Normal	Makul	Orta
VIKOR	Düşük	Basit	Makul	Orta
ELECTRE	Yüksek	Normal	Makul	Orta
PROMETHEE	Yüksek	Normal	Makul	Orta

Literatürde oran metodu, referans noktası yaklaşımı, önem katsayısı yaklaşımı, tam çarpım formu gibi çeşit MOORA yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada en sık kullanılan yöntemlerden biri olan ve kriterlerin önem derecelerinin sayısal olarak ağırlıklandırıldığı önem katsayısı yaklaşımı kullanılmıştır.

### 7.1.1. MOORA-Önem katsayısı yaklaşımı

MOORA yönteminin birinci adımında karar problemine ait amaçlar ve bu amaçlara göre farklı alternatiflerin performans değerleri sayısal olarak belirlenir. Belirlenen değerlere göre Eşitlik 7.1'de gösterilen  $m \times n$  boyutlu bir karar matrisi oluşturulur. [96]. Matris sütunları seçim kriterlerini, matris satırları ise alternatifleri göstermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Karar matrisi oluşturulduktan sonra  $i=1,2,\dots,m$  farklı alternatiflerin sayısı,  $j=1,2,\dots,n$  seçim kriterleri olmak üzere Eşitlik 7.2 kullanılarak, MOORA yönteminin uygulanması için matris normalize edilir. Normalizasyon işleminin amacı farklı birimlere sahip seçim kriterlerinin birimlerden bağımsız yazılarak birbirleriyle karşılaştırılmasının sağlanmasıdır.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}}, \quad x_{ij}^* \in [0,1] \quad (7.2)$$

Normalizasyon işlemi sonrasında seçim kriterlerinin maksimum ve minimumları belirlenir. Maksimumlar sistemde artırıldığı zaman problemin çözümüne fayda sağlayacak kriterler, minimumlar ise sistemde azaltıldığı zaman problemin çözümüne fayda sağlayacak kriterlerdir. Maksimum ve minimumların belirlenmesi sonrasında tüm alternatifler için referans noktaları ve tüm seçim kriterlerinin ağırlık değerleri hesaplanır. Kriterlerin ağırlık değerlerinin toplamı Eşitlik 7.3'te gösterildiği üzere 1'e eşittir.

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (7.3)$$

Her bir seçim kriterinin ağırlık değerleri de hesaba katılarak alternatiflerin performans değerleri Eşitlik 7.4'teki formül kullanılarak hesaplanır. [97]

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g w_j x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n w_j x_{ij}^* \quad (7.4)$$

Alternatiflerin performans değerleri de hesaplandıktan sonra Eşitlik 7.5 kullanılarak hesaplanan değerlere Tchebycheff Min-Maks Metris işlemi uygulanır ve değerler küçükten büyüğe doğru sıralanır. Birinci sıradaki seçenek en uygun seçenek olarak belirlenir.

$$\min_{(j)} \{ \max_{(i)} |r_i - x_{ij}| \} \quad (7.5)$$

## 7.2. Uçak Gövdesi Üretiminde Örnek MOORA Çalışması

Havacılıkta montaj proseslerinde kullanılacak endüstriyel robotların seçimi için seçim kriterlerine ağırlık katsayılarının tanımlandığı MOORA önem katsayısı yaklaşımı kullanılmıştır. Endüstriyel robotların teknik verileri KUKA firmasından temin edilmiştir.

Yapılan çalışmada uçak gövdesi üretimindeki montaj ve komponent yerleştirme proseslerinde kullanılan endüstriyel robotlar için robot seçim [98] makalesi incelenerek birbirinden bağımsız olan toplam 6 seçim kriteri belirlenmiştir. Kriterler ve ağırlıkları belirlenirken montaj alanında çalışan alanında 5 uzman mühendisin tecrübelerinden yararlanılmıştır. Uzman mühendislerin kriterlere verdikleri puanların aritmetik ortalaması alınarak ortalamaların toplam içindeki ağırlığına göre kriter ağırlıkları belirlenmiştir.

### 7.2.1. Montaj prosesleri için endüstriyel robot seçimi

Havacılıkta montaj prosesleri için endüstriyel robot seçimi probleminin çözümüne ilişkin MOORA yönteminin ilk adımı olan karar matrisi Çizelge 7.3.'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Karar matrisi-1

NO	FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	A TAŞIMA KAPASİTESİ (kg)	B ERİŞİM MEŞAFESİ (mm)	A1 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A3 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A5 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A6 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)
1	KUKA	KR 240-R3330	MONTAJ	240	3326	100	90	110	160
2	KUKA	KR 280-R3080	MONTAJ	280	3076	100	90	110	160
3	KUKA	KR 340-R3330	MONTAJ	340	3326	90	75	83	130
4	KUKA	KR 360-R2830	MONTAJ	360	2826	100	90	110	160
5	KUKA	KR 420-R3080	MONTAJ	420	3076	90	75	83	130
6	KUKA	KR 480-R3330	MONTAJ	480	3326	45	45	83	130
7	KUKA	KR 500-R2830	MONTAJ	500	2826	90	75	83	130
8	KUKA	KR 500-R2830 MT	MONTAJ	500	2826	45	45	83	130
9	KUKA	KR 510-R3080	MONTAJ	510	3076	80	70	70	110

Karar matrisinin hazırlanmasından sonra MOORA yöntemi ile karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Çizelge 7.4.'te, Eşitlik 7.2 kullanılarak karar matrisi normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi sonrasında referans noktası değerleri hesaplanmış ve seçim kriterleri fayda durumlarına göre maksimum ya da minimum değerleri olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 7.4. Normalize edilmiş karar matrisi-1

NO	FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	A TAŞIMA KAPASİTESİ (kg)	B ERİŞİM MESAİFESİ (mm)	A1 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A3 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A5 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A6 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)
		MAX / MIN		MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
1	KUKA	KR 240-R3330	MONTAJ	0,19289	0,35632	0,39825	0,40493	0,40531	0,38966
2	KUKA	KR 280-R3080	MONTAJ	0,22504	0,32953	0,39825	0,40493	0,40531	0,38966
3	KUKA	KR 340-R3330	MONTAJ	0,27326	0,35632	0,35843	0,33744	0,30583	0,31660
4	KUKA	KR 360-R2830	MONTAJ	0,28934	0,30275	0,39825	0,40493	0,40531	0,38966
5	KUKA	KR 420-R3080	MONTAJ	0,33756	0,35632	0,31860	0,31494	0,25793	0,26789
6	KUKA	KR 480-R3330	MONTAJ	0,38578	0,35632	0,17921	0,20246	0,30583	0,31660
7	KUKA	KR 500-R2830	MONTAJ	0,40186	0,30275	0,35843	0,33744	0,30583	0,31660
8	KUKA	KR 500-R2830 MT	MONTAJ	0,40186	0,30275	0,17921	0,20246	0,30583	0,31660
9	KUKA	KR 510-R3080	MONTAJ	0,40989	0,32953	0,31860	0,31494	0,25793	0,26789
		REFERANS NOKTASI		0,40989	0,35632	0,39825	0,40493	0,40531	0,38966

Belirlenen referans noktaları ve ağırlık kriterlerinin de Eşitlik 7.4 kullanılarak hesaba katılması ile hazırlanan ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi Çizelge 7.5.'te gösterilmiştir. Bu çizelgeye sıralamayı etkileyen kriter ağırlıkları hassasiyeti de eklenmiştir.

Çizelge 7.5. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi-1

NO	FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	A TAŞIMA KAPASİTESİ (kg)	B ERİŞİM MEŞAFESİ (mm)	A1 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A3 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A5 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A6 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)
KRİTER AĞIRLIKLARI									
KRİTER AĞIRLIKLARI HASSASİYETİ									
1	KUKA	KR 240-R3330	MONTAJ	0,07595	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	KUKA	KR 280-R3080	MONTAJ	0,06470	0,00670	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3	KUKA	KR 340-R3330	MONTAJ	0,04782	0,00000	0,00398	0,00675	0,00995	0,00731
4	KUKA	KR 360-R2830	MONTAJ	0,04219	0,01339	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
5	KUKA	KR 420-R3080	MONTAJ	0,02532	0,00000	0,00797	0,00900	0,01474	0,01218
6	KUKA	KR 480-R3330	MONTAJ	0,00844	0,00000	0,02190	0,02025	0,00995	0,00731
7	KUKA	KR 500-R2830	MONTAJ	0,00281	0,01339	0,00398	0,00675	0,00995	0,00731
8	KUKA	KR 500-R2830 MT	MONTAJ	0,00281	0,01339	0,02190	0,02025	0,00995	0,00731
9	KUKA	KR 510-R3080	MONTAJ	0,00000	0,00670	0,00797	0,00900	0,01474	0,01218

Ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisinin oluşturulmasından sonra her bir endüstriyel robot alternatifi için Eşitlik 7.5 kullanılarak değerler hesaplanmış ve Çizelge 7.6.'daki gibi sıralama yapılmıştır.

Çizelge 7.6. Montaj prosesleri için MOORA robot sıralaması

FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	AĞIRLIK (kg)	FİYAT (€)	MAKSİMUM DEĞERLER	SIRALAMA
KUKA	KR 240-R3330	MONTAJ	2421	82170	0,07595	9
KUKA	KR 280-R3080	MONTAJ	2415	81150	0,06470	8
KUKA	KR 340-R3330	MONTAJ	2421	93310	0,04782	7
KUKA	KR 360-R2830	MONTAJ	2385	79560	0,04219	6
KUKA	KR 420-R3080	MONTAJ	2415	91730	0,02532	5
KUKA	KR 480-R3330	MONTAJ	2475	104030	0,02190	4
KUKA	KR 500-R2830	MONTAJ	2385	89880	0,01339	1
KUKA	KR 500-R2830 MT	MONTAJ	2440	102180	0,02190	3
KUKA	KR 510-R3080	MONTAJ	2680	102100	0,01474	2

### 7.2.2. Komponent yerleştirme prosesleri için endüstriyel robot seçimi

Havacılıkta montaj prosesleri için endüstriyel robot seçimine benzer şekilde komponent yerleştirme prosesleri için de MOORA yöntemi kullanılarak ilk olarak Çizelge 7.7.'de gösterilen karar matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 7.7. Karar matrisi-2

NO	FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	A TAŞIMA KAPASİTESİ (kg)	B ERİŞİM MEŞAFESİ (mm)	A1 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A3 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A5 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A6 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)
1	KUKA	KR 240-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	240	3326	100	90	110	160
2	KUKA	KR 280-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	280	3076	100	90	110	160
3	KUKA	KR 340-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	340	3326	90	75	83	130
4	KUKA	KR 360-R2830	KOMPONENT YERLEŞTİRME	360	2826	100	90	110	160
5	KUKA	KR 420-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	420	3076	90	75	83	130
6	KUKA	KR 480-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	480	3326	45	45	83	130

Benzer şekilde karar matrisinin hazırlanmasından sonra MOORA yöntemi ile karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Çizelge 7.8.'de, Eşitlik 7.2. kullanılarak karar matrisi normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi sonrasında komponent yerleştirme proseslerinde uygun robot seçimi için referans noktası değerleri hesaplanmış ve seçim kriterleri fayda durumlarına göre maksimum ya da minimum değerleri olarak sınıflandırılmıştır. Taşıma kapasitesi kriteri komponent yerleştirme prosesinde minimum olarak belirlenmiştir. Nedeni ise destek çitası adı verilen uçak gövdesi parçalarının ağırlığının (<1~3 kg) az olması ve taşıma kapasitesi yüksek olan robotlara bu proseste ihtiyaç duyulmamasıdır.



Çizelge 7.8. Normalize edilmiş karar matrisi-2

NO	FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	A TAŞIMA KAPASİTESİ (kg)	B ERİŞİM MESAFESİ (mm)	A1 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A3 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A5 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A6 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)
MAX / MIN				MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
1	KUKA	KR 240-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,27036	0,42344	0,46361	0,46884	0,46914	0,45677
2	KUKA	KR 280-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,31542	0,39161	0,46361	0,46884	0,46914	0,45677
3	KUKA	KR 340-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,38302	0,42344	0,41725	0,39070	0,35398	0,37113
4	KUKA	KR 360-R2830	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,40555	0,35978	0,46361	0,46884	0,46914	0,45677
5	KUKA	KR 420-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,47314	0,42344	0,37089	0,36465	0,29854	0,31403
6	KUKA	KR 480-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,54073	0,42344	0,20863	0,23442	0,35398	0,37113
REFERANS NOKTASI				0,27036	0,42344	0,46361	0,46884	0,46914	0,45677

Belirlenen referans noktaları ve ağırlık kriterlerinin de Eşitlik 7.4. kullanılarak hesaba katılması ile hazırlanan ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi Çizelge 7.9.'da gösterilmiştir. Bu çizelgeye sıralamayı etkileyen kriter ağırlıkları hassasiyeti de eklenmiştir.



Çizelge 7.9. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi-2

NO	FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	A TAŞIMA KAPASİTESİ (kg)	B ERİŞİM MEŞAFESİ (mm)	A1 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A3 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A5 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)	A6 EKSEN HAREKET HIZI (°/s)
KRİTER AĞIRLIKLARI									
KRİTER AĞIRLIKLARI HASSASİYETİ									
1	KUKA	KR 240-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,1-0,13	0,4	0,125	0,125-0,25	0,125	0,125-0,18
2	KUKA	KR 280-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3	KUKA	KR 340-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,00451	0,01273	0,00000	0,00000	0,01439	0,01071
4	KUKA	KR 360-R2830	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,01127	0,00000	0,00580	0,00977	0,00000	0,00000
5	KUKA	KR 420-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,01352	0,02546	0,00000	0,00000	0,02132	0,01784
6	KUKA	KR 480-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	0,02028	0,00000	0,01159	0,01302	0,01439	0,01071
				0,02704	0,00000	0,03187	0,02930	0,01439	0,01071

Ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisinin oluşturulmasından sonra her bir endüstriyel robot alternatifi için Eşitlik 7.5 kullanılarak değerler hesaplanmış ve Çizelge 7.10.'daki gibi sıralama yapılmıştır.

Çizelge 7.10. Komponent yerleştirme prosesleri için MOORA robot sıralaması

FİRMA	MODEL	UÇAK ÜRETİM PROSESİ	AĞIRLIK (kg)	FİYAT (€)	MAKSİMUM DEĞERLER	SIRALAMA
KUKA	KR 240-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	2421	82170	0,00117	1
KUKA	KR 280-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	2415	81150	0,00637	2
KUKA	KR 340-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	2421	93310	0,01439	4
KUKA	KR 360-R2830	KOMPONENT YERLEŞTİRME	2385	79560	0,01352	3
KUKA	KR 420-R3080	KOMPONENT YERLEŞTİRME	2415	91730	0,02132	5
KUKA	KR 480-R3330	KOMPONENT YERLEŞTİRME	2475	104030	0,03187	6

Uçak gövde yapılarının montajı için montaj sistemine entegre edilecek olan robotların parametrik seçim çalışmaları yapılırken MOORA yöntemi kullanıldığında montaj robotları ve komponent yerleştirme robotları arasındaki en temel farkın ve robotları birbirinden ayıran özelliğin taşıma kapasiteleri olduğu tespit edilmiştir. Montaj robotlarında yüksek teknolojiye sahip uç işlevci nedeniyle robotun taşıma kapasitesinin yüksek olması yapılacak montaj proseslerinin hassasiyetini artıracaktır. Diğer yandan komponent yerleştirme robotlarında tutucular ve ölçüm problemleri hafif olduğu için yüksek taşıma kapasiteli bir robota ihtiyaç yoktur. Bu nedenlerle MOORA yönteminde de taşıma kapasitesi parametresi montaj robotlarında maksimum değer alınırken, komponent yerleştirme robotlarında da minimum alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Montaj robotlarında en uygun robot KUKA KR 500-R2830 ve komponent yerleştirme prosesleri için en uygun robot KUKA KR 240-R3330 olarak belirlenmiştir.



## SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak bu tezde havacılık endüstrisi için ilk kez aksiyomatik tasarım prensipleri kullanılarak yolcu uçağı gövde yapıları montajı için yeni bir montaj sistemi tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. A320 yolcu uçağı Kısım 19 gövde panellerinin montajı için yapılan örnek çalışmada metodoloji ile genel bir tasarım hiyerarşi sistem ağacı oluşturulmuş ve teknik olarak uygulanabilir dört alternatif tasarım çözümü belirlenmiştir. Alternatiflerin detaylı simülasyon modelleri oluşturularak prosesler analiz ve optimize edilmiştir.

Manuel proseslere odaklı birinci alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalama %70'in üzerindedir. Toplamda 68 adet panel üretimine imkân vermektedir. Optimizasyon yapıldığında bir gövde 6 panelden oluştuğu için yaklaşık 11 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

Otomatik proseslere odaklı ikinci alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalama %80'in üzerindedir. Panel bekleme süresi, malzeme taşıma için otonom mobil robotlar kullanılarak birinci alternatife göre %7 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, yarı otomatik perçin tezgâhları yerine tam otomatik perçin tezgâhları kullanılarak tezgâh ayar ve arıza süreleri %0,27 oranında azaltılmıştır. Toplamda 138 adet panel üretimine imkân vermektedir. Bir gövde 6 panelden oluştuğu için yaklaşık 23 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

Robotik proseslere dayalı üçüncü alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalama %85'in üzerindedir. Havadan taşıma ve robotik montaj otomasyon prosesleri ile geliştirilen üçüncü alternatifin, yerden taşıma ve otomatik perçin tezgâhları ile geliştirilen ikinci alternatife ve manuel prosesler ile geliştirilen birinci alternatife göre daha verimli olduğu belirlenmiştir. Üçüncü alternatifte kullanılan havadan taşıma prosesleri havacılık için yerden taşımaya göre daha yaygın ve teknik olarak daha uygundur. Robotik montaj prosesleri montaj işlemlerinde, otomatik perçin tezgâhı gibi ileri teknolojik tezgâhlardan daha hızlıdır. Bu nedenle üçüncü alternatif ikinci alternatife göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Manuel proseslerin azaltılmasından dolayı, ikinci ve üçüncü alternatifte üretim adetleri de birinci alternatifte hesaplanan üretim adetlerinin iki katına çıkmıştır. Panel bekleme süresi, malzeme taşıma için modüler vinç sistemleri kullanılarak ikinci alternatife göre %4,65 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, tam otomatik perçin tezgâhları yerine mobil delik delme ve perçinleme robotları kullanılarak tezgâh ayar ve arıza süreleri sırasıyla %0,28 ve %0,32 oranında azaltılmıştır.

Toplamda 153 adet panel üretimine imkân vermektedir. Bir gövde 6 panelden oluştuğu için yaklaşık 25 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

Robotik proseslere dayalı dördüncü alternatifte sistemin çalışma yüzdesi ortalamada %90'ın üzerindedir. Dördüncü alternatif de üçüncü alternatif gibi robot konseptli olmasına rağmen robotlar yöntem ve proses bakımından üçüncü alternatiften farklıdır. Gövde kaburgası montaj robotları ve perçinleme robotlarının yerini dönel sürtünmeli noktasal birleştirme robotları almıştır. Dördüncü alternatif için elde edilen simülasyon sonuçlarında, perçinsiz birleştirme prosesleri, robotik perçinleme proseslerinden malzeme kullanılmadığından daha hızlıdır. Dolayısıyla üretim miktarı artmıştır. Panel bekleme süresi, malzeme taşıma için modüler vinç sistemleri kullanılarak üçüncü alternatife göre %5,19 oranında azaltılmıştır. Bu alternatifte tezgâh ayar ve arıza süreleri ise sırasıyla %0,03 ve %0,28 oranında azaltılmıştır. 288 adet panel üretimine imkân vermektedir. Bir gövde 6 panelden oluştuğu için bu da yaklaşık 48 set uçak gövdesine eşdeğerdir.

Montaj sistemlerinin simülasyon sonuçlarına göre fikstürlerin havacılık montaj operasyonları için kritik olduğu tespit edilmiş ve uçak üretim oranını artırmak için montaj fikstürlerinin konseptinin revize edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

İlk kez modüler montaj fikstürleri kutu profil bağlantı yapıları kullanılarak uçak gövde panelleri için CATIA programı ile yeniden tasarlanmıştır.

Yapısal analiz için kullanılan Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileri ile sabit fikstürün montajı esnasında meydana gelen maksimum yük altındaki koşulda analitik hesaplamalar yapılarak serbest uçtaki eğilme değeri 2,59 mm, serbest uçtaki eğim değeri ise  $0,054^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Siemens NX programı Pre-post modülü kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analiziyle kiriş sehim değeri 2,74 mm ve eğim açısı  $0,059^\circ$  olarak hesaplanarak analitik hesaplama sonuçları sırasıyla %5,98 ve %8,47 fark ile doğrulanmıştır.

Uçak kanadı montajı için kullanılan kutu profil bağlantı yapıları hesaplamaları gövde panelleri montajına uyarlanarak kritik moment olan  $M_z$  2227 Nm olarak hesaplanmıştır. Daha sonra modüler fikstürün montajı esnasında kirişlerin kendi ağırlığı nedeniyle oluşturduğu momentin  $M_z$  2116 Nm olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla %4,98 fark ile en

kritik momentin montaj operasyonları sırasında değil modüler fikstürün montajı esnasında kirişlerin kendi ağırlığı nedeniyle oluştuğu tespit edilmiştir.

Modüler fikstürde kirişin kendi ağırlığından kaynaklanan sehim ve kutu profil bağlantı yapısından kaynaklanan sehim olmak üzere iki çeşit deformasyon oluşacağı öngörülmüştür. Analizlerde modüler fikstür için aynı yayılı yük ve profil geometrisi kullanılarak kirişin kendi ağırlığından dolayı gerçekleşen maksimum sehim değeri 2,60 mm olarak hesaplanmıştır. Kutu profil bağlantı yapısına maksimum moment olan 2116 Nm uygulanmasından sonra oluşan açısız deformasyon  $4,28 \cdot 10^{-4}$  radyan olarak hesaplanmış, açısız deformasyon değeri kirişin serbest ucundaki 1,575 mm sehim değerine dönüştürülerek modüler kirişteki toplam maksimum sehim 4,175 mm olarak hesaplanmıştır.

Modüler fikstürlerin tasarlanması ve analizi sonucunda üretim optimizasyonu yapılmış ve aylık uçak gövde paneli montajında birinci alternatifte %10, ikinci alternatifte %9,52, üçüncü alternatifte %13,63 ve dördüncü alternatifte %37,14'lik bir üretim artışı sağlanmıştır.

Havacılık endüstrisinde ilk kez uçak gövde yapıları montaj sistemine entegre edilecek olan robotların parametrik seçim çalışmaları için MOORA yöntemi kullanılmıştır. Montaj prosesleri için 9 adet, komponent yerleştirme prosesleri için 6 adet farklı KUKA endüstriyel robotu birbirinden tamamen bağımsız 6 robot kriterine göre değerlendirilmiştir.

Referans noktaları ve belirlenen kriterlerin ağırlık değerlerinin de hesaba katılması ile montaj prosesleri için en uygun robot KUKA KR 500-R2830 ve komponent yerleştirme prosesleri için en uygun robot KUKA KR 240-R3330 olarak belirlenmiştir.

Öneriler kapsamında aksiyomatik tasarım metotlarının yanı sıra tasarım yapı matrisi, kalite fonksiyon yayılımı, ürün-süreç-sistem metotları, keşifsel yaklaşımlar, Taguchi metodu, X için tasarım metodu, Triz gibi farklı metotlar kullanılarak uçaklardaki farklı gövde kısımları, kanatlar, kuyruk takımları, iniş takımları gibi temel uçak yapılarının üretim ve montaj sistemleri tasarlanabilir.

Üretim ve montaj hatları için görsel ara yüzü ve algoritmaları daha gelişmiş simülasyon programları yardımıyla hatlar üç boyutlu olarak tasarlanabilir ve gerçek üretim verileri ile

sanal üretim verileri birbirleriyle eşleştirilerek anlık veri takibi yapılabilir. Teknik açıdan en uygun ve en verimli senaryolar simülasyonlar kullanılarak en az maliyetle belirlenebilir.

Uçak gövde, kanat, kuyruk gibi yapıların montajı için modüler montaj fikstürleri tasarlanırken kutu profil bağlantıları yerine hızlı değiştirilebilir bağlantı düzenekleri, iç içe geçmeli modüler kitler, uyarlanabilir bağlantı elemanları ve programlanabilir robot destek tutucuları kullanılarak daha gelişmiş fikstürler montaj sistemine entegre edilebilir.

Üretim ve montaj hatlarını kurarken karar verme problemlerinin çözümünde MOORA yöntemi haricinde AHP, Topsis, Vikor, Electre ve Promethee yöntemleri de kullanılabilir.



## KAYNAKLAR

1. The Boeing Company, (2019). Commercial market outlook report, *USA*, 8-96.
2. Airbus, (2019). Global market forecast report, *France*, 6-86.
3. Earl, S. (2014, September). *Future of composites in commercial aviation*. Paper presented at Society of Aeronautical Engineers Aerospace Manufacturing, Automated Fastening Conference and Exhibition, Utah, USA.
4. Bullen, N. (2013, September). *Innovations in aerospace assembly*. Paper presented at Society of Aeronautical Engineers Aerotech Congress and Exhibition, Montreal, Canada.
5. Dashchenko, I. (Eds). (2006). *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer, pp. 30-45.
6. Groover, M. P. (2016). *Principles of Modern Manufacturing* (Fourth edition). New Jersey: Prentice Hall Press, 879-880.
7. Barton, E., and Wolf, R. (2017). Drivmatic® Automatic Fastening System with Single Robot Positioner. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 76-79.
8. Everhart, T. (2017). Neighboring Mobile Robot Cell with Drilling and Fastening. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-2.
9. Jackson, T. (2017). High-Accuracy Articulated Mobile Robots. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-6.
10. Kyle, A. (2013). Enhanced Robotic Automated Fiber Placement with Accurate Robot Technology and Modular Fiber Placement Head. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-6.
11. Muijs, L., and Snijders, M. (2017). Collaborative Robot Applications at GKN Aerospace's Fokker Business. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-5.
12. Logemann, T. (2016). Mobile Robot Assembly Cell (RACe) for Drilling and Fastening. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-6.
13. Jayaweera, N., Subasinghe, L., and Gajanayaka, H. (2015). Design and Development of a Novel Re-Configurable Fixturing System. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-8.
14. Bullen, N. (2013). *Automated, Mechanized Drilling and Countersinking of Airframes* (Second edition). Warrendale: Society of Automotive Engineers International, 45-46.
15. Groover, M. P. (2016). *Principles of Modern Manufacturing* (Fourth edition). New Jersey: Prentice Hall Press, 925-926.
16. Wörn, H., Frey, D., and Keitel, J. (2000). Digital Factory-Planning and running enterprises of the future. *Institute for Process Control and Robotics*, 1-6.

17. Thomson, J., (2008). Images of efficiency: integrative applications of transaction costs and e-procurement delivery, *19th International Business Research*, 1-15.
18. Jefferson, T., Benardos, P., and Ratchev, S. (2015). Reconfigurable Assembly System Design Methodology: A Wing Assembly Case Study. *Society of Aeronautical Engineers International Journal of Materials and Manufacturing*, 9(1), 1-18.
19. Suh N. P. The Principles of Design. Oxford University Press, 1990. URL: <http://books.google.co.uk/books?id=Z5fF5qQPQ9sC>, Son Erişim Tarihi: 14.12.2020
20. Suh, N. (1997). Design of systems. *Annals of the International Academy For Production Engineering*, 46(1), 75–80.
21. Suh, N., Cochran, S., and Paulo, C. (1998). Manufacturing system design. *Annals of the International Academy For Production Engineering*, 47(2), 627–639.
22. Reynal, V. A., and Cochran, S. (1996). Understanding Lean Manufacturing According to Axiomatic Design Principles, *Lean Aircraft Initiative Center for Technology*, 26-27.
23. Reichenbach, M., (2010). Entwicklung einer Planungsumgebung für Montageaufgaben in der wandlungsfähigen Fabrik, *dargestellt am Beispiel des impedanzgeregelten Leichtbauroboters*, 1–10.
24. Förster, P., and Bauernhansl T. (2015). Changeable and reconfigurable assembly systems: A structure planning approach in automotive manufacturing, in: M. Bargende, H.-C. Reuss, J. Wiedemann, *15. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*, 375-394.
25. Kulak, O., Durmusoglu M.B., and Tufekci S. (2005). A complete cellular manufacturing system design methodology based on axiomatic design principles, *Science Direct Computers and Industrial Engineering*, 765–787.
26. Caggiano A., Marzano A., and Teti R. (2016). Resource efficient configuration of an aircraft assembly line. *48th International Academy For Production Engineering Conference on Manufacturing Systems*, 236-241.
27. Diaz I., C., Jin Y., and Ares E. (2017). Cycle time study of wing spar assembly on aircraft factory. *Manufacturing Engineering Society International Conference*, 1019-1025.
28. Bakker O., Popov A., and Ratchev S. (2017). Variation analysis of automated wing box assembly. *The 50th International Academy For Production Engineering Conference Paper on Manufacturing Systems*, 406-411.
29. Pagone E., Efthymiou K., Mahoney B., and Salonitis K. (2019). The effect of operational policies on production systems robustness: an aerospace case study. *52nd International Academy For Production Engineering Conference Paper on Manufacturing Systems*, 1337-1341.

30. Caggiano A., Caiazzo F., and Teti R. (2015). Digital factory approach for flexible and efficient manufacturing systems in the aerospace industry. *Understanding the life cycle implications of manufacturing*, 122-127.
31. Millar, A., and Kihlman, H. (2009). Reconfigurable Flexible Tooling for Aerospace Wing Assembly, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-10.
32. Helgosson, P., Ossbahr, G., and Tomlinson, D. (2010). Modular and Configurable Steel Structure for Assembly Fixtures, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-11.
33. Jayaweera, N., Subasinghe, L., and Gajanayaka, H. (2015). Design and Development of a Novel Re-Configurable Fixturing System, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-8.
34. Zhang, H., Zheng, L., Chen, X., and Huang, H. (2016). A Novel Reconfigurable Assembly Jig Based on Stable Agile Joints and Adaptive Positioning-Clamping Bolts, *6th International Academy For Production Engineering Conference Paper on Assembly Technologies and Systems*, 316-321.
35. Mueller, R., and Vette, M. (2013). Handling of Large Components for Aircraft Assembly Using an Adaptable Network of Different Kinematic Units, *Society of Aeronautical Engineers International Journal of Aerospace*, 6(1), 342-349.
36. Kihlman, H., and Engstrom, M. (2010). Flexapods – Flexible Tooling at SAAB for Building the NEURON Aircraft, *Society of Aeronautical Engineers International*, 1-15.
37. Atkinson, A., Hartmann, J., Jones, S., and Gleeson, P. (2007). Robotic Drilling System for 737 Aileron, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-8.
38. Landau, C. (2016). High Accuracy Assembly of Large Aircraft Components Using Coordinated Arm Robots, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-5.
39. DeVlieg, R. (2009). Robotic Trailing Edge Flap Drilling System, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-6.
40. Mir, R., and DeVlieg, R. (2017). 777X Control Surface Assembly Using Advanced Robotic Automation, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-7.
41. Rathjen, S., and Richardson, C. (2013). High Path Accuracy, High Process Force Articulated Robot, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-6.
42. Everhart, T. (2017). Neighboring Mobile Robot Cell with Drilling and Fastening, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 2-3.
43. Cibiel, C., and Prat, P. (2006). Automation for the Assembly of the Bottom Wing Panels on Stringers for the A320, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-5.

44. Mehlenhoff, T., and Bloedorn, C. (2010). Solution for Automated Drilling in Composite Structures with a Standard Articulating Robot System, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–7.
45. Mehlenhoff, T., and Vogl, S. (2009). Automated Fastening of Aircraft Cargo Door Structures with a Standard Articulating Robot System, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–6.
46. Rauch, E., Matt, D., and Dallasega, P. (2016). Application of Axiomatic Design in manufacturing system design: a literature review, *The 10th International Conference Paper on Axiomatic Design*, 1–7.
47. Suh, N. P. *Axiomatic Design: Advances and Applications*. Oxford University Press, 2001. URL: <http://books.google.co.uk/books?id=JlIngEACAAJ>, Son Erişim Tarihi: 14.12.2020
48. Suh, N. (2009). *Axiomatic design: advances and applications* (Third edition). New York: Oxford University Press, 1,503.
49. Park, G. J. (2007). *Analytic Methods for Design Practice* (First edition). London: Springer, 285-286.
50. Joint Aviation Authorities. (2004). *Air Transport Pilot Licence Training Manual*, Airframes and Systems. Neu-Isenburg, Germany, 41-47.
51. Xi, F., Lin, Yu., and Tu, X. (2013). A Framework on Robotic Percussive Riveting for Aircraft Assembly Automation, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–10.
52. Federal Aviation Administration (2012). *Aviation Maintenance Technician Handbook Airframe*, (First edition) Washington: US Department of Transportation, 179-180.
53. Mueller, R., Vette, M., Geenen, A., and Masiak, T. (2017). Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–7.
54. Leica Geosystems. (2015). *Leica Absolute Tracker User Manual*. Switzerland, Automated Measurement Systems.
55. Yu, L., Bi, Q., Zhang, Y., and Wang, Y. (2017). A Novel Normal Measurement Method for Robotic Drilling and Countersinking, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–5.
56. Jayaweera, N., Kulasekera, A., Maduranga, P., and Kasun, T. (2017). A Novel Fixturing Solution for Handling Complex-Shaped Components, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–6.
57. Landau, C. (2016). High Accuracy Assembly of Large Aircraft Components Using Coordinated Arm Robots, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–5.

58. Monkman G.J., Hesse S., Steinmann R., and Schunk H. (2007). *Robot Grippers* (First edition), 85-110.
59. Demirtas, M. (2012). *Mekanik Araç Park Sistemi Tasarımına Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 49-50.
60. Zieve, P. (2013). Frame-Clip Riveting End Effector, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–4.
61. Janssen, A. and Dillhoefer, T. (2016). FRAC (Frame Riveter Assembly Cell), *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–6.
62. Hiser, T. and Zieve, P. (2019, March). *Frame to shear clip riveting end effector*. Paper presented at Society of Aeronautical Engineers Aerotech Americas, South Carolina, USA.
63. Richardson, R. (2012). Process visualization, *Delta Sigma Company Report*, Kennesaw. 7-20.
64. Groover, M. (2007). *Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing* (Third edition). New Jersey: Prentice Hall Press, 918-921.
65. Rahman, M. (2014). *Omni Directional Control Algorithm for Mecanum Wheel*, Bachelor's Thesis, University of Malaysia, Malaysia.
66. Camoglu, D. (2015). *Bilgisayar Kontrollü Robotik* (Birinci Baskı). Türkiye: Dikey Eksen Yayıncılık, 111-118.
67. Logemann, T. (2016). Mobile Robot Assembly Cell (RACe) for Drilling and Fastening, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–6.
68. Kucuk, A., and Egilmez, H. (2005). *Automatic Riveting Manual*, Turkish Aerospace Industries, Ankara, 48-50.
69. Celek, O. E. (2014). *Farklı yazılım sistemleri kullanarak bir yolcu uçağı panelinin üretimi için otomatik perçin tezgâhı NC kodlarının oluşturulması ve karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 78-79.
70. Dillhöfer, T., and Bankston, B. (2009). MPAC (Multi Panel Assembly Cell), *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–11.
71. Boldsai Khan, E., Fukada, S., Fujimoto, M., and Kamimuki, K. (2016). Refill Friction Stir Spot Joining Rivet Replacement Technology, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–9.
72. Bansow, S. (2010). *Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk* (First edition). Berlin: Springer, 7-17.

73. Landau, C. (2016). High Accuracy Assembly of Large Aircraft Components Using Coordinated Arm Robots, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–5.
74. Dillhoefer, T. (2017). CPAC Bulkhead Riveting System, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–7.
75. Stansbury, E. (2013). E7000 High-Speed CNC Fuselage Riveting Cell, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–8.
76. Gray, T., Orf, D., and Adams, G. (2013). Mobile Automated Robotic Drilling, Inspection and Fastening, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–7.
77. Logemann, T. (2016). Mobile Robot Assembly Cell (RACe) for Drilling and Fastening, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–6.
78. Hameister, H. (2016). An Attempt for an Industry 4.0 Inspired Cloud-Supported Approach for Predictive Maintenance on the Example of Refill Friction Stir Spot Welding, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1–10.
79. Zhang, H., Zheng, L., Chen, X., and Huang, H. (2016). A Novel Reconfigurable Assembly Jig Based on Stable Agile Joints and Adaptive Positioning-Clamping Bolts, *6th International Academy For Production Engineering Conference Paper on Assembly Technologies and Systems*, 316-321.
80. Bi, M., and Zhang, W. (2001). Flexible fixture design and automation: review, issues and future direction. *International Journal of Production Research*, 39(13), 94.
81. Jefferson, T., Crossley, R., Smith, T., and Ratchev, S. (2013). Review of Reconfigurable Assembly Systems Technologies for Cost Effective Wing Structure Assembly, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-13.
82. Simpson T. W., Jiao J. R., Siddique Z., and Hölttä-Otto K. (2014). *Advances in product family and product platform design* (First edition). New York: Springer, 737-739.
83. Kihlman, H. (2005). *Affordable Automation for Airframe Assembly – Development of Key Enabling Technologies* (Doctoral dissertation, Linköping University, 2005). 953, 85299.
84. Jayaweera, N., Subasinghe, L., and Gajanayaka, H. (2015). Design and Development of a Novel Re-configurable Fixturing System, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-8.
85. Engmann, K. (2008). *Technologie des Flugzeuges* (Sixth edition). Würzburg: Vogel Verlag, 110-116.
86. Shirinzadeh, B. (1996). Strategies for planning and implementation of flexible fixturing systems in a computer integrated manufacturing environment, *Computers in Industry*, 175-183.

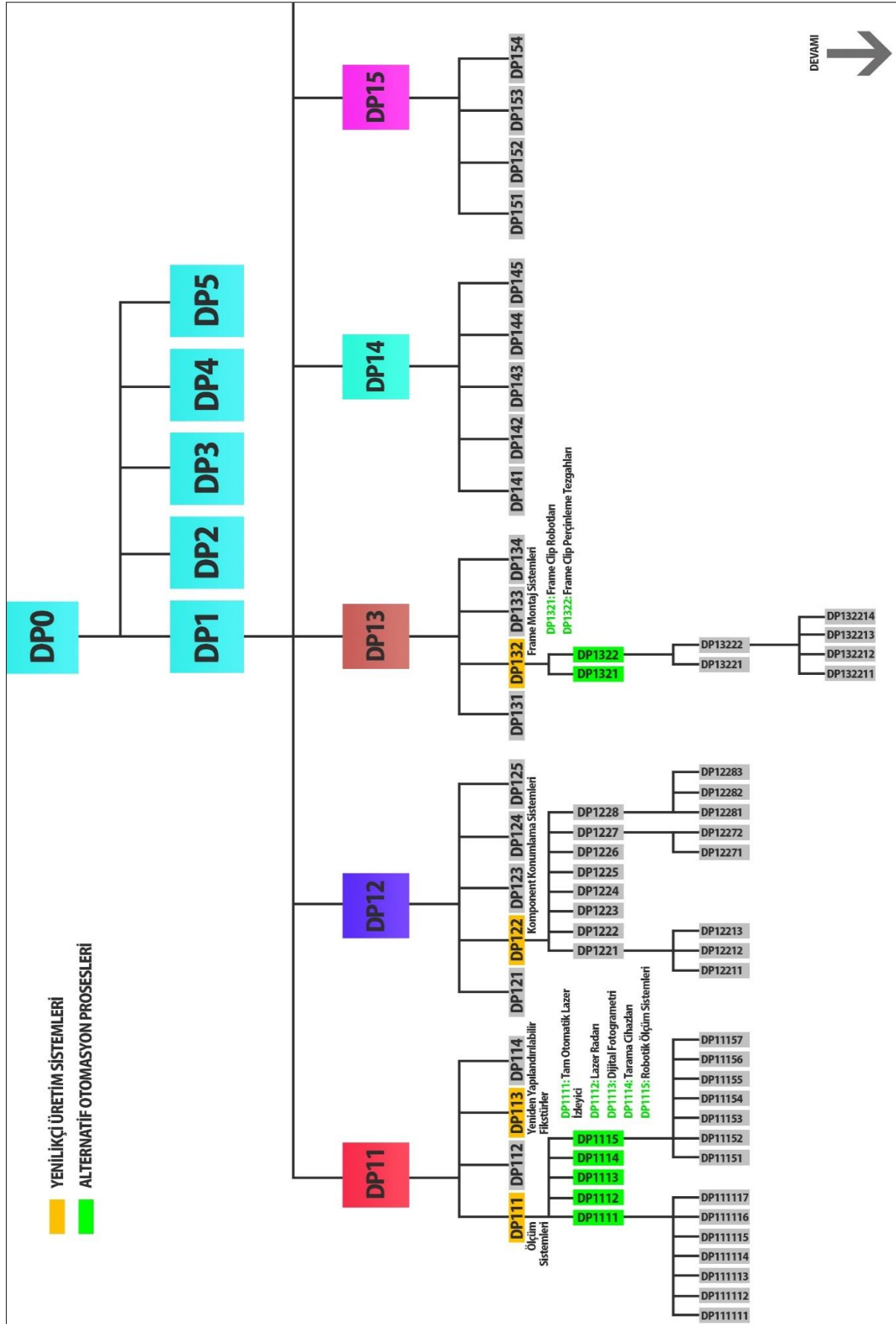
87. Han, S. M., Benaroya H., and Wei T. (1999). Dynamics of Transversely Vibrating Beams Using Four Engineering Theories, *Journal of Sound and Vibration*, 1-10.
88. Helgesson, P., Ossbahr, G., and Tomlinson, D. (2010). Modular and Configurable Steel Structure for Assembly Fixtures, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-11.
89. Asif, A., and Rashid, T. (2020). Best-worst method for robot selection, *Soft Computing*, 1-21.
90. Cano, R., Ibanez de Garayo, O., Castillo, M., and Marin, R. (2016). Flexible and Low-Cost Robotic System for Drilling Material Stacks. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-6.
91. Vandaele, C., Friot, D., Marry, S., and Gueydon, E. (2016). New Technology for Fully Automated One Side Assembly. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-10.
92. Muys, L., and Bloem, J. (2005). Developments in Assembly Technology at Stork Fokker. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-12.
93. Schwake, K., and Wulfsberg J. (2014). Robot-based system for handling of aircraft shell parts. *International Academy For Production Engineering Conference Paper on Assembly Technologies and Systems*, 104-109.
94. Kingston, R. (2014). Metrology Assisted Robotic Automation. *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-5.
95. Chakraborty, S. (2011). Applications Of The MOORA Method For Decision Making In Manufacturing Environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1155-1166.
96. Brauers, M., Ginevicius, R., and Podvezko, V. (2010). Regional development in Lithuania considering multiple objectives by the MOORA method, *Technology and Economy*, 613–640.
97. Brauers, M., and Zavadskas, E. (2006). The MOORA Method And Its Application To Privatization In A Transition Economy, *Control and Cybernetics*, 35(2), 446-448.
98. Tansel, Y., Yurdakul, M., and Dengiz, B. (2013). Development of a decision support system for robot selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 142–157.



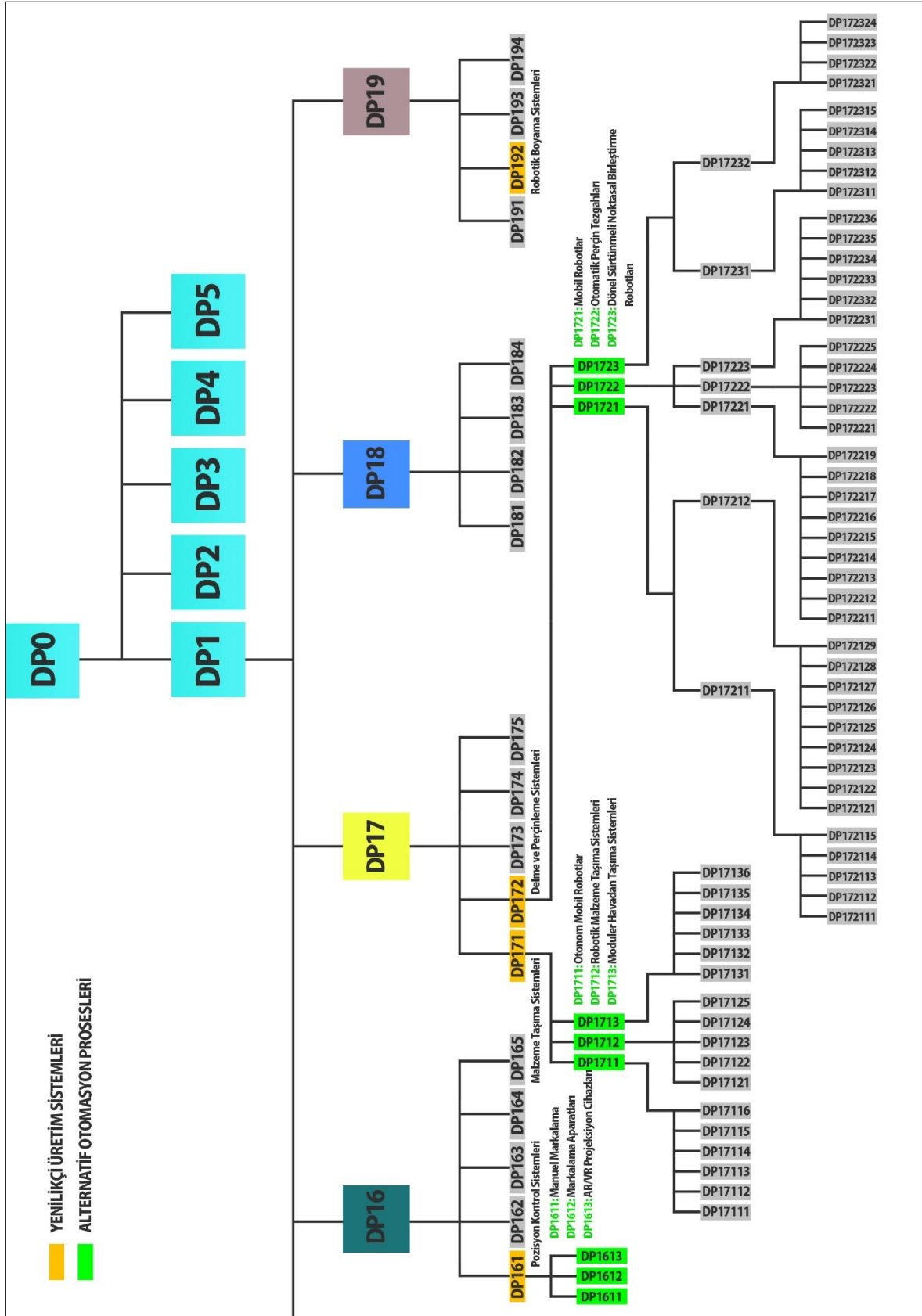


**EKLER**

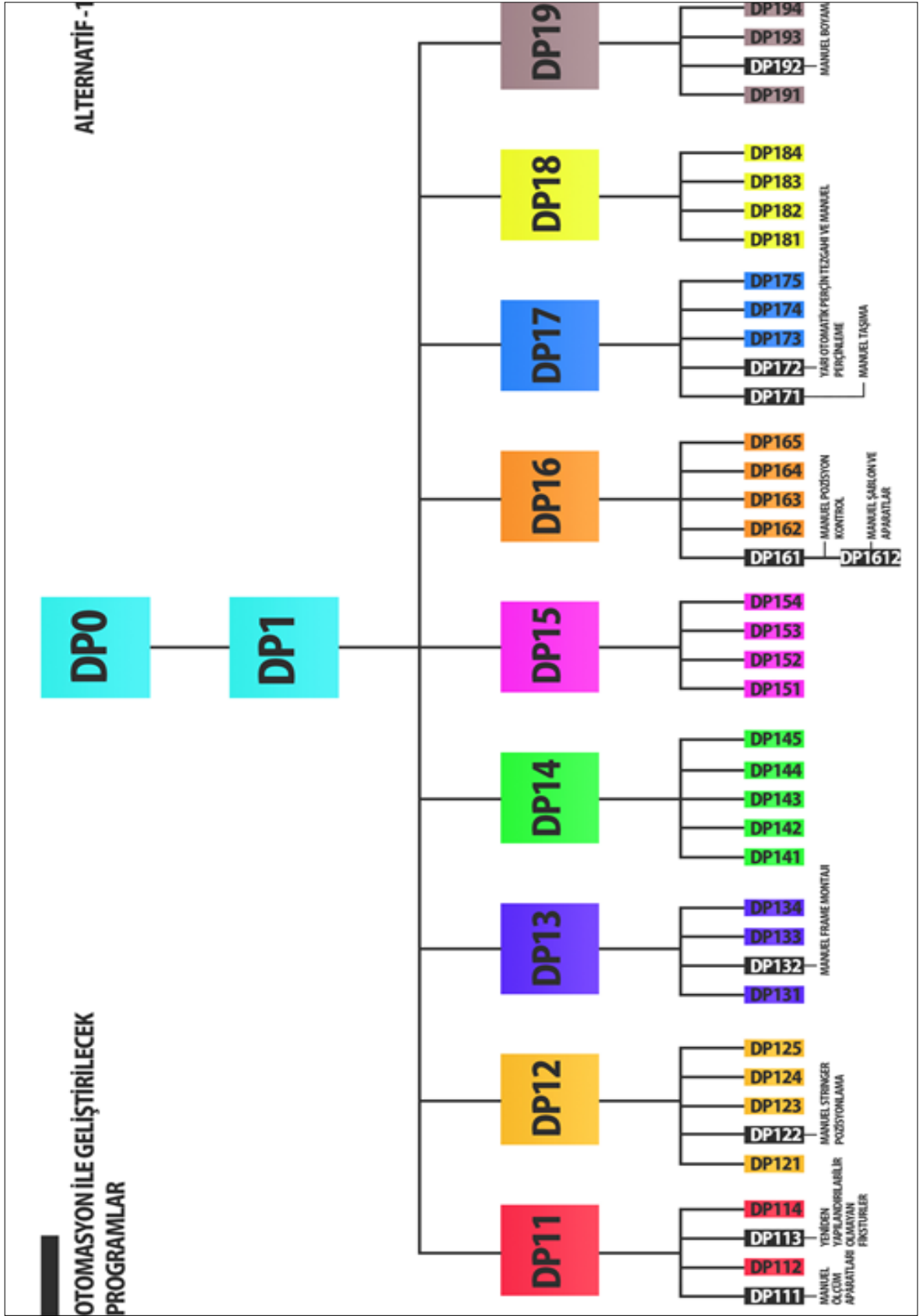
EK-1. Montaj sistemi genel tasarım hiyerarşisi



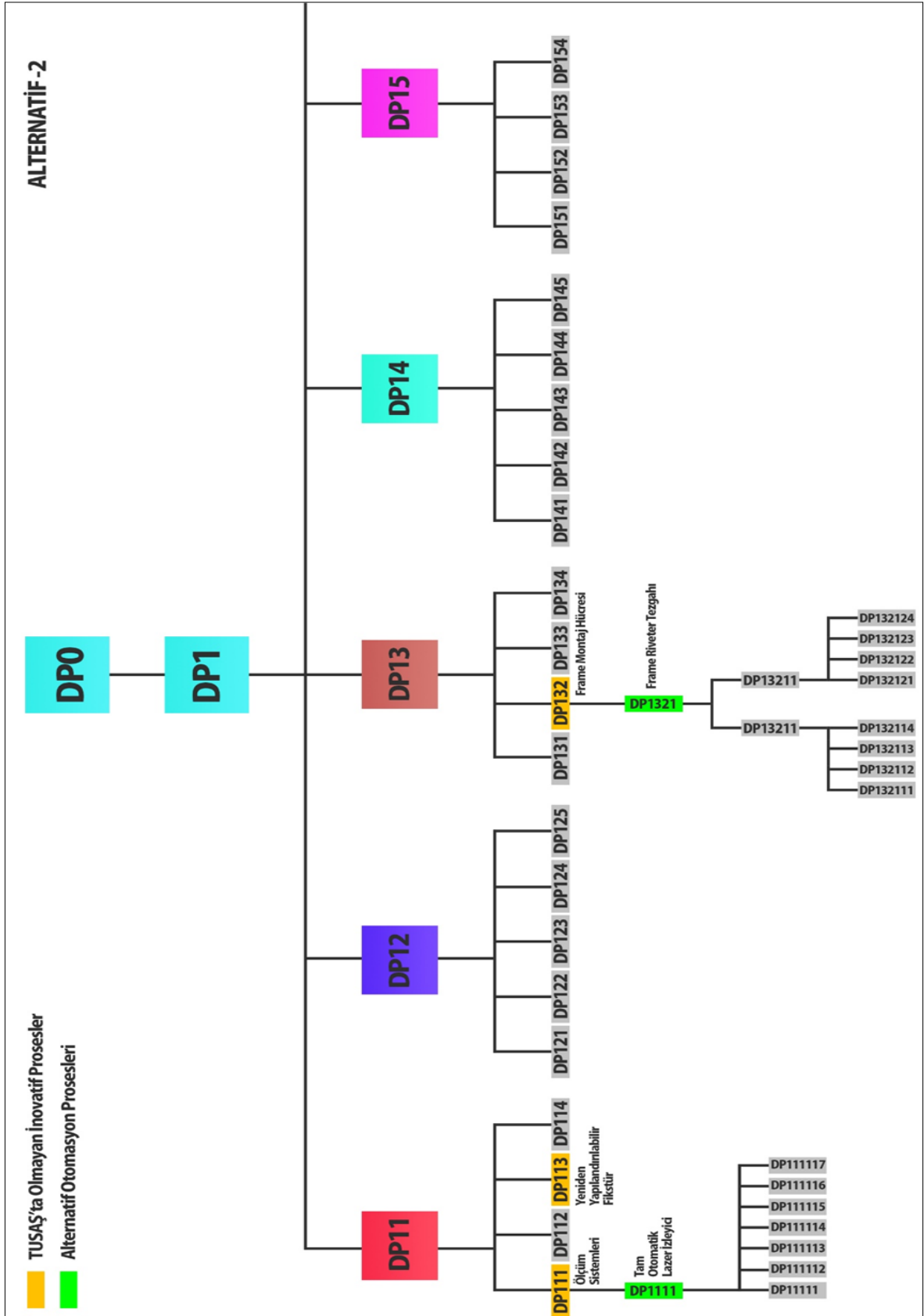
EK-1. (devam) Montaj sistemi genel tasarım hiyerarşisi



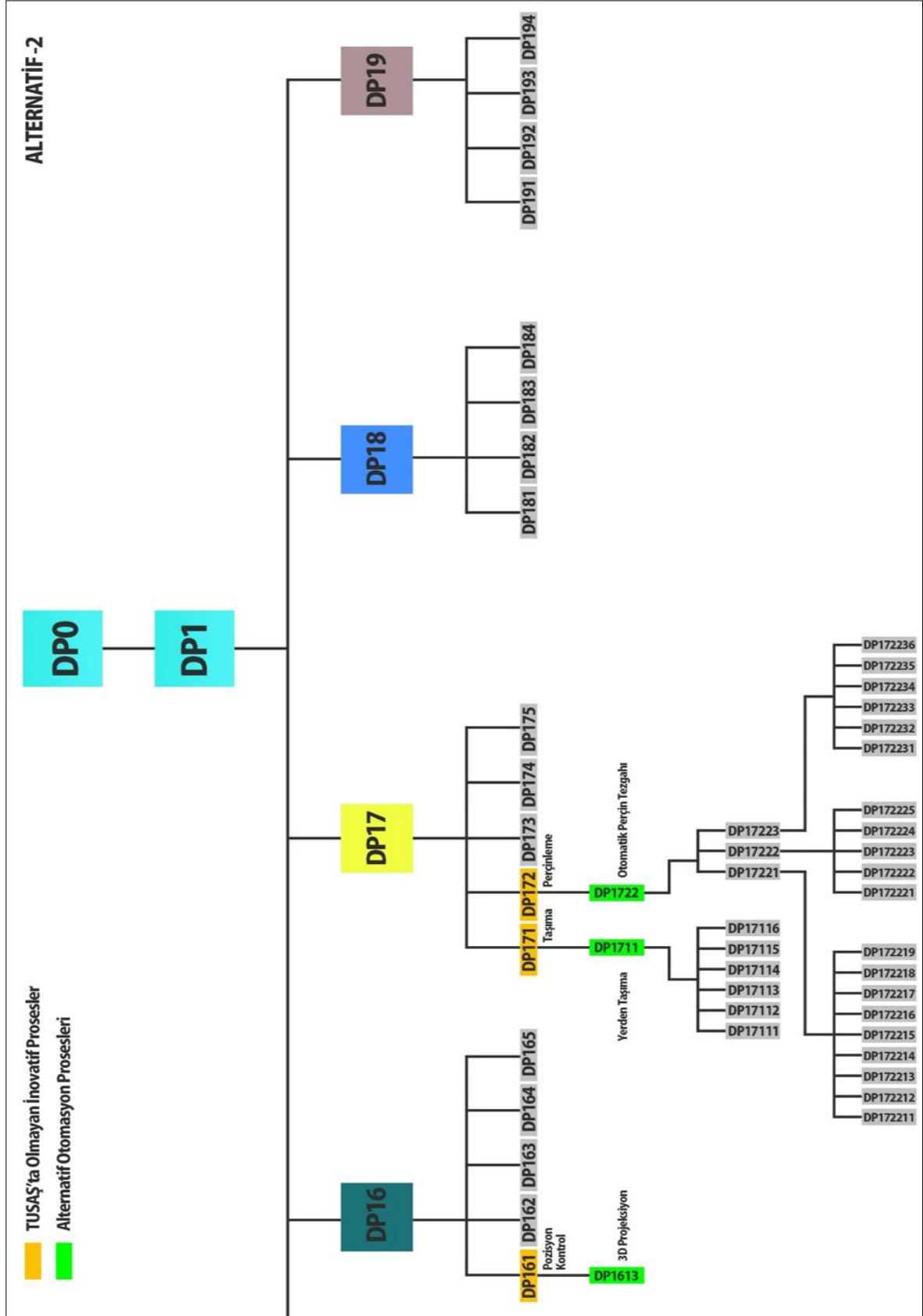
EK-2. Manuel ve yarı otomatik tezgâhlarla montaj tabanlı üretim



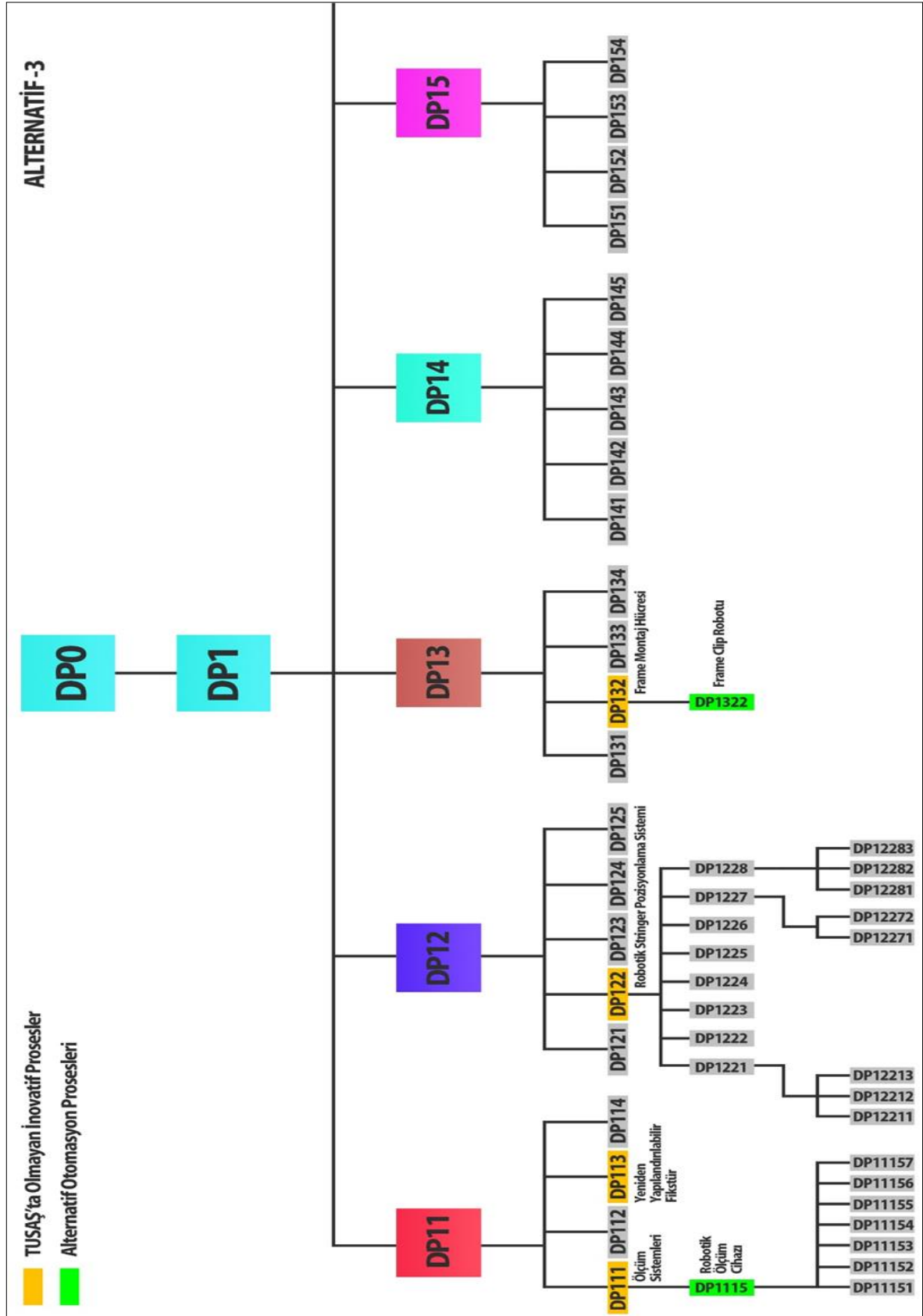
## EK-3. Otomatik perçin tezgâhlarıyla montaj tabanlı üretim



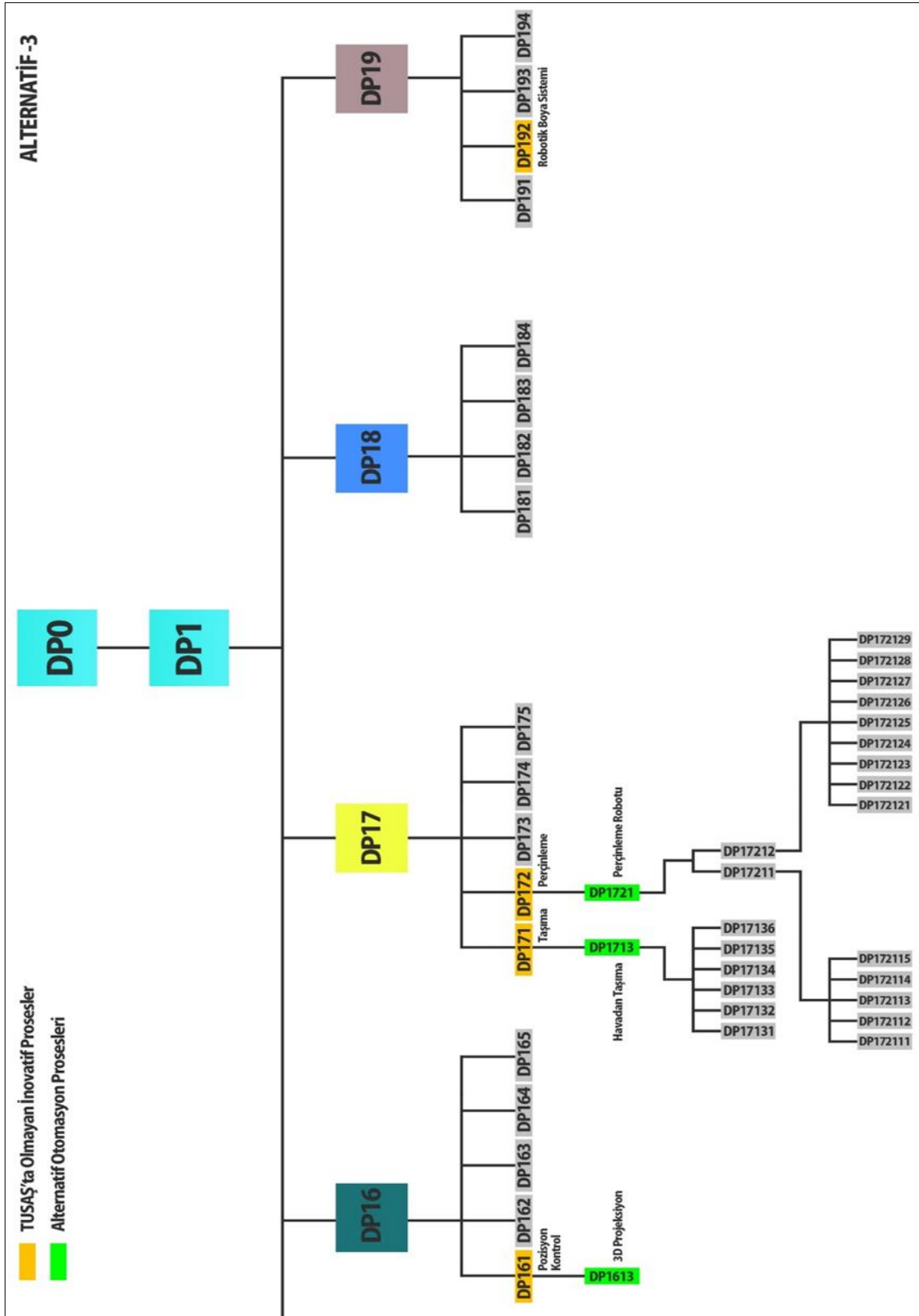
EK-3. (devam) Otomatik perçin tezgâhlarıyla montaj tabanlı üretim



## EK-4. Robot konseptli montaj tabanlı üretim

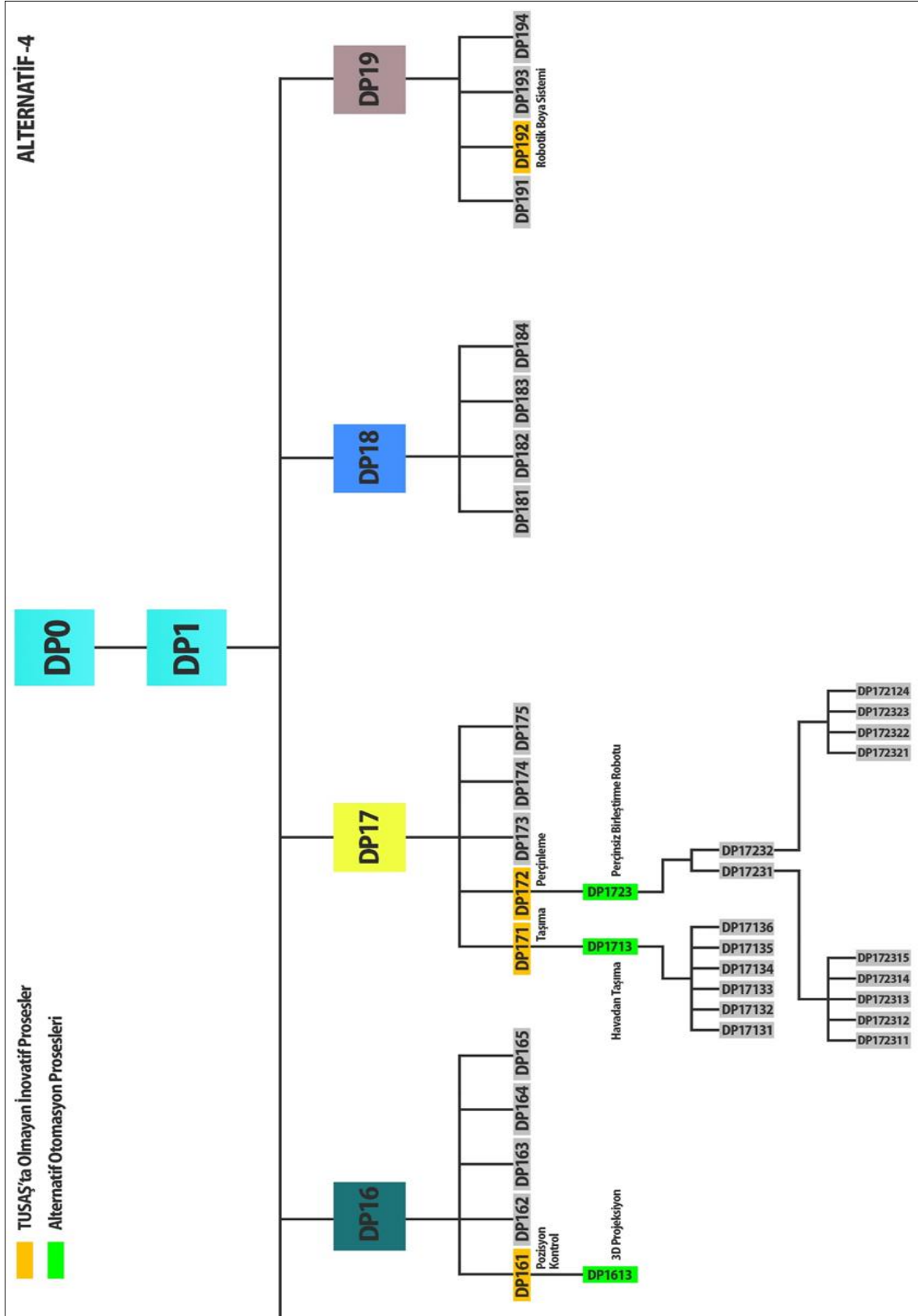


## EK-4. (devam) Robot konseptli montaj tabanlı üretim

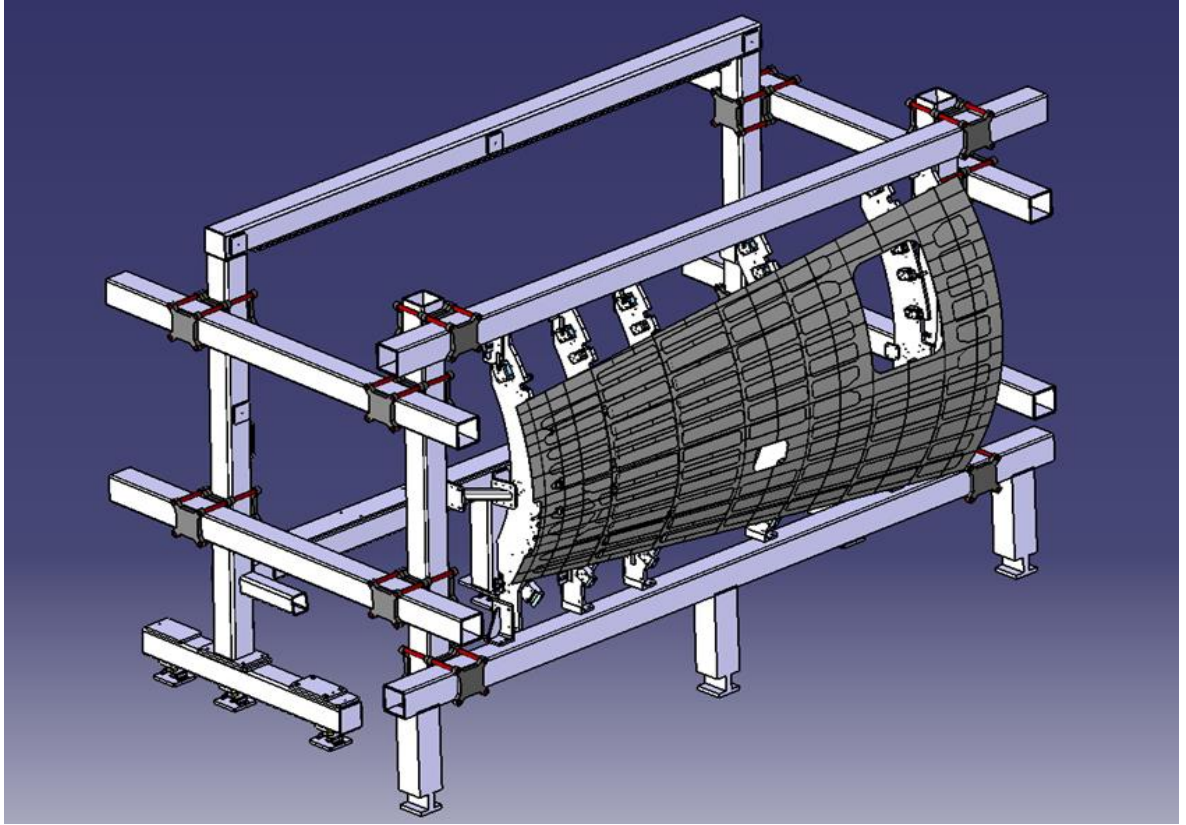
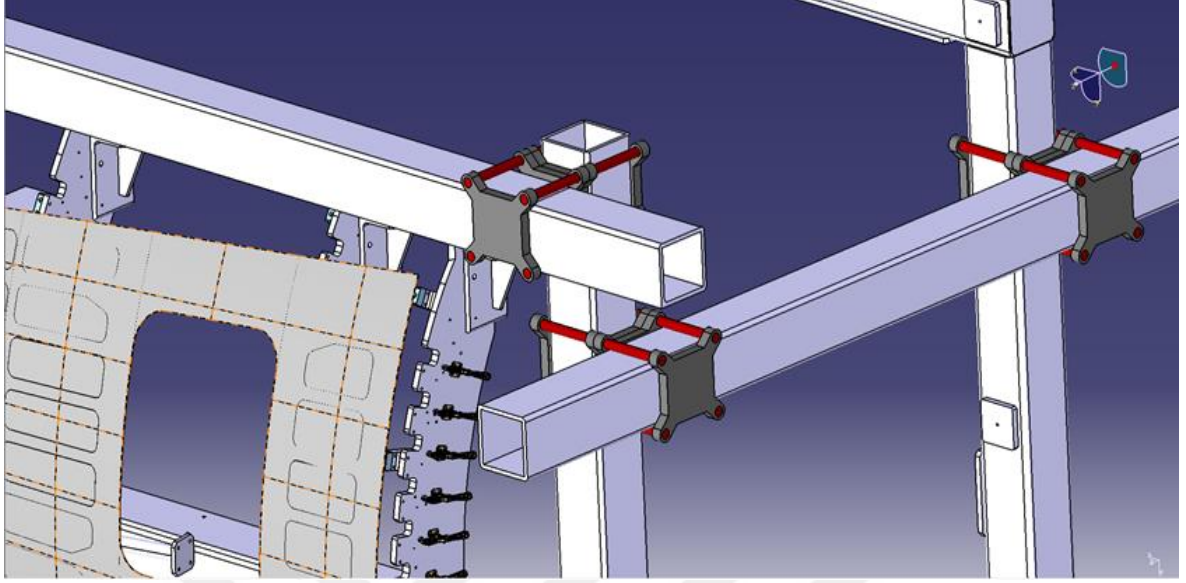




EK-5. (devam) Perçinsiz birleştirme tezgâhlarıyla montaj tabanlı üretim



## EK-6. Modüler montaj fikstürü tasarımı



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇELEK, Osman Emre  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1987, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 E-mail : osmanemrecek@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi / Uçak Mühendisliği	2020
Yüksek lisans	Hacettepe Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2014
Lisans	Uludağ Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2009
Lise	Anadolu Lisesi / Fen Bilimleri	2005

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ)	Şef
2014-2017	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ)	Montaj Uzmanı
2012-2014	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ)	Montaj Mühendisi
2010-2012	Ortadoğu Rulman Sanayii (ORS)	Proses Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce (C2), Almanca (B1)

### Yayınlar

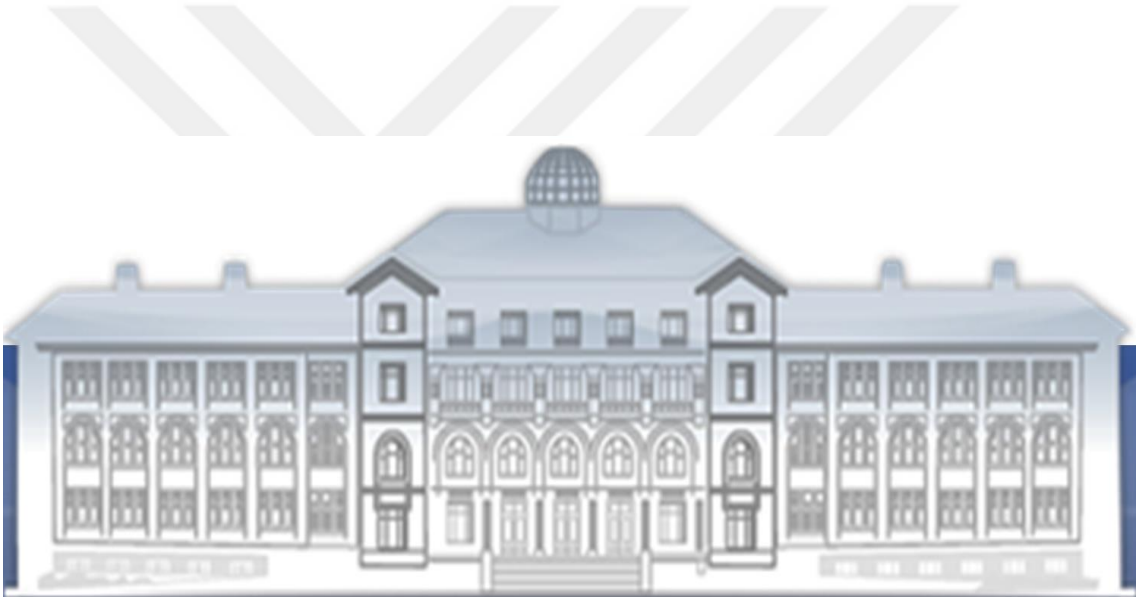
1. Yurdakul, M., İc, Y. T., and Celek, O. E. (2021). Design of the assembly systems for airplane structure, *Massachusetts Institute of Technology (MIT) Design Engineering and Science* (First edition). Cambridge: Springer, 1-23.

2. Celek, O. E., Yurdakul, M., and Ic, Y. T. (2020). Development and comparison of airplane fuselage panel assembly system alternatives using axiomatic design principles and simulation methodology, *Construction Robotics*, 1-16.
3. Celek, O. E., Yurdakul, M., and Ic, Y. T. (2019). Axiomatic design of a reconfigurable assembly for aircraft fuselages, *Society of Aeronautical Engineers Technical Paper*, 1-9.
4. Gunes, S., Yurdakul, M., Tansel, I., and Celek, O. E. (2018). Fully automated production system application, *Mühendis ve Makina*, 46-55.

## **Hobiler**

Uçaklar, Satranç, Bowling, Gitar





*GAZİ GELECEKTİR..*