

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HARP GEMİLERİNİN KAVRAMSAL TASARIM
AŞAMASINDA SEVK VE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ
SEÇİMİNE YÖNELİK BULANIK HİYERARŞİ SÜRECİ
VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE BÜTÜNLEŞİK KARAR
MODELİ GELİŞTİRİLMESİ**

Selçuk CİN

DOKTORA TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HARP GEMİLERİNİN KAVRAMSAL TASARIM
AŞAMASINDA SEVK VE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ
SEÇİMİNE YÖNELİK BULANIK HİYERARŞİ SÜRECİ VE
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE BÜTÜNLEŞİK KARAR MODELİ
GELİŞTİRİLMESİ**

Selçuk CİN tarafından hazırlanan tez çalışması 30 Temmuz 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Aykut SAFA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yalçın DURMUŞOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bekir ŞENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Egemen SULUKAN, Üye
İstanbul Gedik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Harp Gemilerinin Kavramsal Tasarım Aşamasında Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçimine Yönelik Bulanık Hiyerarşi Süreci ve Yapay Sinir Ağları ile Bütünleşik Karar Modeli Geliştirilmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı hâlinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Selçuk CİN



Oğluma

TEŞEKKÜR

Küçücük kalbi ama büyük yüreği ile her daim yanımda olan Rüzgâr'ım, en büyük ve en özel teşekkürüm sana.

Manevi desteği için aileme,

Akademik katkıları ve destekleri için tez danışmanıma,

Tez izleme sürecinde akademik katkıları için tez izleme komitesinin üyelerine,

Sayısı çok fazla olduğundan, isimlerini anmaya başladığımda herhangi birini atlamamak adına tek seferde, bu tez çalışmasına katkı sağlayan tüm insanlara,

Son olarak, “bu çalışmaya destek verme imkânı varken desteklerini esirgeyenlere”,

Teşekkür...

Selçuk CİN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xv
TABLO LİSTESİ	xviii
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxii
1 GİRİŞ	1
1.1 Askerî Gemi Tipleri	2
1.2 Askerî Gemilerin Tasarım Süreci	6
1.3 Tekne Tipi	10
1.4 Görev Profili	14
1.5 Elektrik Güç İhtiyacı	15
1.6 Tezin Akışı, Kabuller ve Sınırlamalar	17
2 GEMİ SEVK VE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ BİLEŞENLERİ	21
2.1 Sevk Sistemi.....	21
2.1.1 Sevk Makinesi	21
2.1.2 İtici (Pervane)	28
2.1.3 Aktarma	30
2.2 Elektrik Güç Sistemi	31
2.2.1 Elektrik Üretici	31
2.2.2 Dağıtım Sistemi ve Çevirici	35
2.2.3 Kullanıcı	35
3 TEKNE-SEVK MAKİNESİ-PERVANE UYUMU	36
4 SEVK VE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ ÇEŞİTLERİ	45
4.1 Jenerik Fırkateynin Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçenekleri.....	55
4.2 Jenerik ADKG'nin Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçenekleri	61
5 ÖLÇÜTLERİN BELİRLENMESİ, İNCELENMESİ VE HESAPLANMASI	65
5.1 Ağırlık	66
5.2 Filoya Benzerlik	68

5.3	Hacim	69
5.4	Hassasiyet (Duyarlılık)	70
5.5	Güvenilirlik, Kullanılabilirlik, İdame Edilebilirlik, Yedeklenebilirlik ve Bakım	74
5.6	İz.....	79
5.6.1	Manyetik iz	80
5.6.2	Akustik (Gürültü) İz	81
5.6.3	Kızıl Altı İz	81
5.7	Karmaşıklık.....	86
5.8	Personel-Mürettebat	87
5.9	Ömür Devri Maliyeti.....	90
5.10	Yakıt Tüketimi-Verim ve CO ₂ Ayak İzi	92
6 SEÇİM İŞLEMİNDE BULANIK HİYERARŞİ SÜRECİ VE YAPAY SİNİR AĞLARININ UYGULANMASINA YÖNELİK ÖNERİLEN MODEL		99
6.1	Analitik (Çözümlemeli) Hiyerarşi Süreci	101
6.2	Bulanık Kümeler Kuramı ve Buckley'in Geometrik Ortalama Yaklaşımını Esas Alan Bulanık AHP (fuzzy AHP-FAHP) Yöntemi.....	105
6.3	Yapay Sinir Ağları	116
6.4	Jenerik Gemilere Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçimi için Önerilen Model	118
7 ÖNERİLEN MODELİN UYGULANMASI SONUCU ELDE EDİLEN BULGULAR		121
7.1	Jenerik Fırkateyn için Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi	121
7.2	Jenerik ADKG için Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi.....	126
7.3	Jenerik Gemiler için Seçim İşleminin Yapılması	129
8 SONUÇ		133
KAYNAKÇA		138
A JENERİK GEMİLERE İLİŞKİN VERİLER		163
B PERVANE HARİTASI İÇİN HESAPLAMA YÖNTEMİ		170
C SEVK MAKİNESİ-PERVANE UYUMLANDIRILMASI İÇİN HESAPLAMA YÖNTEMİ		173
C.1	Dizel Motorun Çalışma Zarfı	174
C.2	Gaz Türbininin Çalışma Zarfı	178
C.3	Sevk Elektrik Motorunun Çalışma Zarfı	179

Ç JENERİK FIRKATEYN İÇİN MATLAB SIMULINK ORTAMINA AKTARILAN YAPAY SİNİR AĞI MİMARİSİ	180
D JENERİK ADKG İÇİN MATLAB SIMULINK ORTAMINA AKTARILAN YAPAY SİNİR AĞI MİMARİSİ	181
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	182



SİMGE LİSTESİ

AD	Activity duration (seyir süresi)
B	Beam (genişlik)
COA	Center of area (alan merkezi)
C_B	Block coefficient (blok katsayısı)
C_E	Özgöl direnç
CF	Carbon factor
CR	Consistency ratio (tutarlılık oranı)
D	Pervane çapı
E	Emission (salım)
EF	Emission factor (salım etkeni)
FC	Fuel consumption (yakıt tüketimi)
Fr	Froude sayısı
J	İlerleme katsayısı
KG	Geminin ağırlık merkezinin (G) omurga hattına (K) olan mesafesini ifade eden simge
k_p	Şaft sayısı
K_Q	İtme katsayısı
K_T	Tork katsayısı
L	Length (uzunluk)
LF	Load factor (yük etkeni-makine yükü)
m_f	Dizel motorda döngü başına püskürtülen yakıt miktarı
M_λ	Siyah cisimden yayılan ışınımın (spektral yayma) gücü (Planck Dağılımı)
n_e	Sevk makinesi devri
n_p	Pervane devri
N_{out}	Azami pervane şaft devri
n_p	Pervane devri
P_B	Fren gücü
P_E	Etkin güç (yedekte çekme gücü)
$P_{GS \text{ instant.}}$	Üreteç seti anlık fren gücü
P_{in}	Sevk makinelerinden devir düşürücüye giren en yüksek güce sahip makinenin azami gücü
$P_{instant.}$	Anlık fren gücü

P_{MCR}	Azami devamlı (MCR) fren gücü
p_{me}	Ortalama etkin basınç
P_B	Fren gücü
P_P	Pervane gücü
$P_{PE \text{ instant.}}$	Sevk makinesi anlık fren gücü
P_{SEM}	SEM'in azami gücü
Q	Tork
Q_{HV}	Alt ısııl değer
R	Gemi direnci
RI	Random consistency index (rassallık göstergesi)
S	Görünen güç
sfc_{GS}	Üreteç seti özgül yakıt tüketimi
sfc_{PE}	Sevk makinesi özgül yakıt tüketimi
T	Su çekimi
t	İtme azalması katsayısı
T_F	İtme kuvveti
T_t	Mutlak sıcaklık
v_A	Pervaneye gelen suyun (eksenel) hızı
v_{ref}	Gemi intikal hızı
V_S	Süpürme hacmi
v_S	Gemi hızı
W	Bir dizeyin en büyük özyöneiy
w	Ağırlık
w_f	Hız hız kademesinde seyir yapılan sürenin toplam yıllık seyir süresine oranı
w_T	Taylor iz katsayısı
Δ	Deplasman tonajı (ağırlığı)
$\eta_{dönüştürücü}$	Dönüştürücü verimi
η_f	Yakıt verimi
η_{SEM}	SEM verimi
θ	Eşik
λ	Dalga boyu
λ_{max}	En büyük öz değer
$\lambda_{R, max}$	En yüksek spektral yayma gücünün gerçekleştiği dalga boyu

ρ	Suyun özgül ağırlığı
∇	Deplasman hacmi



KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternating Current
ACV	Air Cushion Vehicle
ADKG	Açık Deniz Karakol Gemisi
AES	All Electric Ship
AHP	Analytical Hierarchy Process
AIJ	Aggregating Individual Judgments
AIP	Aggregating Individual Priorities
ANAO	Australian National Audit Office
CCG	Cross-Connect Gear
CO ₂	Carbon DiOxide
CODAD	COmbined Diesel And Diesel
CODAG-CC	COmbined Diesel And Gas turbine-Cross-Connected
CODELOD	COmbined Diesel ELelectric Or Diesel
CODLAG	COmbined Diesel Electric And Gas turbine
CODLOG	COmbined Diesel Electric Or Gas turbine
CODOG	COmbined Diesel Or Gas turbine
CODOG-CC	COmbined Diesel Or Gas turbine-Cross-Connected
CPP	Controllable Pitch Propeller
CRP	Controllable, Reversible Pitch
CRS	Congressional Research Service
DC	Direct Current
DFIM	Doubly Fed Induction Machine
DP	Dynamic Positioning
DSH	Denizaltı Savunma Harbi
DWT	Dead Weight Tonnage
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EMC	ElectroMagnetic Compatibility
ELF	Extremely Low Frequency
EPLA	Electric Power Load Analysis

FAHP	Fuzzy AHP
FCPP	Featherable Controllable Pitch Propeller
FPP	Fixed Pitch Propeller
FIR	Far Infra-Red
FMCDM	Fuzzy Multi-Criteria Decision Making
FREMM	FRégate Européenne Multi-Mission (Fransızca) FRegata Europea Multi Missione (İtalyanca)
GAO	Government Accountability Office
HAD	Hesaplamaalı Akışkanlar Dinamiği
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
HBT	Havadan Bağımsız Tahrik
HCI	Human Computer Interface
HFO	Heavy Fuel Oil
HMI	Human Machine Interface
HSH	Hava Savunma Harbi
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
IEP	Integrated Electric Propulsion
IFEP	Integrated Full Electric Propulsion
IPMS	Integrated Platform Management System
IWEEDI	Integral Warship Energy Efficiency Design Index
IPS	Integrated Propulsion System
LCC	Life Cycle Cost
LCS	Littoral Combat Ship
LHD	Landing Helicopter Dock
LLSM	Logarithmic Least Squares Method
LNG	Liquid Natural Gas
LPD	Landing Platform Dock
LSW	Light Ship Weight
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MAUT	Multiple Attribute Utility Theory
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MCR	Maximum Continuous Rating

MEKO	MEhrzweck-KOmbination
MIR	Middle Infra-Red
MOM	Mean Of Maximal
MODM	Multi-Objective Decision Making
MRG	Main Reduction Gear
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
NIR	Near Infra-Red
NO _x	Nitrogen Oxides
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine
OBS	Ortalama Bakım Süresi
OİBS	Ortalama İdari Bekleme Süresi
OLBS	Ortalama Lojistik Bekleme Süresi
QOS	Quality Of Service
OPV	Offshore Patrol Vessel Ocean-going Patrol Vessel
OSD	Ortalama Duruş Süresi
rpm	revolutions per minute
SCIE	Science Citation Index-Expanded
SEM	Sevk Elektrik Motoru
sfc	specific fuel consumption
SM	Sevk Makinesi
SSCI	Social Science Citation Index
SÜH	Su Üstü Harbi
SWATH	Small Waterplane Area Twin Hull
SynRM	Synchronous Reluctance Machine
TBO	Time Between major Overhauls
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
ULF	Ultra-Low Frequency
ÜS	Üreteç Seti
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

WEEDI	Warship Energy Efficiency Design Index
WoS	Web of Science
WRSM	Wound-Rotor Synchronous Machine
xIR	extreme Infra-Red



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Başlıca askerî gemi tipleri.....	2
Şekil 1.2	Harp gemileri için maliyet, tasarım karmaşıklığı ve boyut ilişkisi.....	5
Şekil 1.3	Askerî gemilerin tasarım süreci.....	7
Şekil 1.4	Sevk sistemi seçim çalışmalarına başlanmadan önce sağlanmış olması gereken veriler.....	9
Şekil 1.5	Olası ilave kabiliyetlerin gemiye getireceği büyüme etkisi.....	10
Şekil 1.6	Direncin Fr sayısı ile değişimi.....	11
Şekil 1.7	Jenerik fırkateynin görev profili.....	15
Şekil 1.8	Jenerik ADKG'nin görev profili.....	15
Şekil 1.9	Jenerik fırkateynin genel kullanım ve servis sistemleri ile savaş ve komuta kontrol sistemlerinin elektrik güç ihtiyacı.....	16
Şekil 1.10	Jenerik ADKG'nin genel kullanım ve servis sistemleri ile savaş ve komuta kontrol sistemlerinin elektrik güç ihtiyacı.....	17
Şekil 1.11	Tez çalışmasında önerilen ve tez çalışmasının ilgili bölümleri ile bütünleştirilmiş sevk ve elektrik güç sistemi seçim modeli.....	20
Şekil 2.1	Sevk sistemi zinciri.....	21
Şekil 2.2	Elektrik güç sistemi zinciri.....	31
Şekil 3.1	Direncin gemi hızına istinaden genel değişimi.....	37
Şekil 3.2	Jenerik fırkateynin tecrübe direnç eğrisi.....	38
Şekil 3.3	Jenerik ADKG'nin tecrübe direnç eğrisi.....	38
Şekil 3.4	Dirençten fren gücüne geçiş işlemlerinin akışı.....	39
Şekil 3.5	Jenerik fırkateynin kullanım direnç eğrisi.....	40
Şekil 3.6	Jenerik ADKG'nin kullanım direnç eğrisi.....	40
Şekil 3.7	MC440 yazılımının işlem akışı.....	42
Şekil 3.8	Jenerik fırkateyn için MC440 yazılımı vasıtasıyla hesaplanan shaft devri, hatve oranı, gemi hızı ve pervane gücü ilişkisi.....	43

Şekil 3.9	Jenerik ADKG için MC440 yazılımı vasıtasıyla hesaplanan şaft devri, hatve oranı, gemi hızı ve pervane gücü ilişkisi.....	44
Şekil 4.1	Tahrik yöntemlerinin birbiri ile ilişkisi.....	45
Şekil 4.2	Bütünleşik elektrikli tahrikin genel mimarisi.....	50
Şekil 4.3	Şaftları çapraz bağlanabilen birleşik sistemlerin devir düşürücü yerleşimi.....	54
Şekil 4.4	Jenerik fırkateyn için önerilen sevk sistemi seçenekleri.....	57
Şekil 4.5	Jenerik fırkateynin toplam elektrik gücü ihtiyacı.....	59
Şekil 4.6	Jenerik ADKG için önerilen sevk sistemi seçenekleri.....	63
Şekil 4.7	Jenerik ADKG'nin toplam elektrik gücü ihtiyacı.....	64
Şekil 5.1	İncelemeye alınan ölçütler.....	65
Şekil 5.2	Bütünleşik beka kabiliyetinin “soğan” benzeşimi.....	71
Şekil 5.3	Alınan darbe/hasarın, meydana gelen bir infilakın veya oluşan yangın benzeri tehlikeli bir olayın başlangıcından itibaren, geminin kabiliyetinin zamana bağlı olarak genel değişimi.....	72
Şekil 5.4	Gemi izleri.....	80
Şekil 5.5	Siyah cisimden yayılan ışınımın (spektral yayma) gücü.....	84
Şekil 5.6	Hasar kontrol teşkilatının kapsamı.....	90
Şekil 5.7	Bir harp gemisi için, elden çıkarma bileşeni hariç tutulduğunda, diğer bileşenlerin LCC'ye yaklaşık oranı.....	91
Şekil 5.8	Yakıt tüketimi ve CO ₂ salım hesaplama modeli.....	94
Şekil 5.9	Tez çalışmasında kullanılmasına karar verilen ölçütler.....	98
Şekil 6.1	Bir bulanık sayı örneği.....	111
Şekil 6.2	Yamuk bulanık sayı.....	112
Şekil 6.3	Üçgen bulanık sayı.....	112
Şekil 6.4	McCulloch ve Pitts (1943) tarafından önerilen yapay nöron modeli.....	117
Şekil 6.5	Bu tez çalışmasında sevk ve elektrik sistemi seçimi için önerilen FAHP ve yapay sinir ağlarından oluşan karar modeli.....	119

Şekil 6.6	Önerilen yapay sinir ağı mimarisi.....	120
Şekil 6.7	En sık kullanılan etkinlik fonksiyonları.....	120
Şekil 7.1	Jenerik fırkateynin seçeneklerinde yer alan ısı makine ve gemi hızına [çalıştırılma durumu (Tablo 4.2)] bağlı yük ve verim verileri...	128
Şekil 7.2	Jenerik fırkateyn için ölçütlerin birbirine göre göreceli ağırlıkları.....	130
Şekil 7.2	Jenerik ADKG için ölçütlerin birbirine göre göreceli ağırlıkları.....	130
Şekil B.1	Örnek bir açık su pervane haritası (MC440 yazılımı vasıtasıyla oluşturulmuştur).....	172
Şekil C.1	Dizel motorun kuramsal çalışma zarfı.....	176
Şekil C.2	Gaz türbininin kuramsal çalışma zarfı.....	178
Şekil C.3	PMSM örnek çalışma zarfı.....	179
Şekil Ç.1	Jenerik fırkateyn için MATLAB Simulink ortamına aktarılan yapay sinir ağı mimarisi.....	180
Şekil D.1	Jenerik ADKG için MATLAB Simulink ortamına aktarılan yapay sinir ağı mimarisi.....	181

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Bir dakikadaki krankşaft devir sayılarına istinaden dizel motorların gruplandırılması.....	23
Tablo 2.2	Sevk makinesi olarak kullanılan muhtelif elektrik motorları ve özellikleri.....	27
Tablo 4.1	Birleşik sevk sistemlerini tanımlamak için kullanılan kısaltmalar.....	47
Tablo 4.2	Jenerik fırkateyn için seçilmiş olan sevk makinelerinin ve üreteç setlerinin çalıştırılma durumu.....	60
Tablo 4.3	Jenerik ADKG için seçilmiş olan sevk makinelerinin ve üreteç setlerinin çalıştırılma durumu.....	64
Tablo 5.1	Bakım ölçütü için önerilen ölçek.....	79
Tablo 5.2	Yedeklenebilirlik ölçütü için önerilen ölçek.....	79
Tablo 5.3	Kızıl altı bölgenin alt bölgeleri.....	83
Tablo 6.1	AHP’de 9’lu karşılaştırma işlemi için kullanılan önem derecelendirme ölçeği.....	103
Tablo 6.2	Ölçüt sayısına istinaden RI değerleri.....	105
Tablo 6.3	Üçgen bulanık sayılar kullanılarak yapılan ikili karşılaştırmalar için önerilen dilsel değerlendirme ölçeği.....	113
Tablo 6.4	Bulanık değerlendirme yapabilmek maksadıyla kullanılan üçgen bulanık sayı ölçeği.....	113
Tablo 6.5	Üçgen bulanık sayıların bulanık aritmetik işlemleri.....	113
Tablo 6.6	Biyolojik nöron ile yapay nöronun basit benzeşimi.....	118
Tablo 7.1	Ölçütlerin ağırlık değerleri.....	121
Tablo 7.2	Jenerik fırkateynin seçenekleri için belirlenmiş/hesaplanmış ölçüt değerleri.....	123
Tablo 7.3	Jenerik ADKG’nin seçenekleri için belirlenmiş/hesaplanmış ölçüt değerleri.....	124
Tablo 7.4	Jenerik fırkateyn için seçeneklerin sıralaması.....	131

Tablo 7.5	Jenerik ADKG için seçeneklerin sıralaması.....	131
Tablo A.1	Jenerik firkateynin genel özelliklerine ilişkin veriler.....	163
Tablo A.2	Jenerik firkateynin seçeneklerinin ısı makinelere ilişkin veriler...	164
Tablo A.3	Jenerik firkateynin seçeneklerinin sevk elektrik motorlarına ilişkin veriler.....	166
Tablo A.4	Jenerik firkateynin üreteç setlerine ilişkin veriler.....	166
Tablo A.5	Jenerik ADKG'nin genel özelliklerine ilişkin veriler.....	167
Tablo A.6	Jenerik ADKG seçeneklerinin sevk makinelerine ilişkin veriler.....	168
Tablo A.7	Jenerik ADKG üreteç setlerine ilişkin veriler.....	169



Harp Gemilerinin Kavramsal Tasarım Aşamasında Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçimine Yönelik Bulanık Hiyerarşi Süreci ve Yapay Sinir Ağları ile Bütünleşik Karar Modeli Geliştirilmesi

Selçuk CİN

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ

Deniz kuvvetinin su üstü ana muharebe kabiliyetini su üstü harp gemileri oluşturmaktadır. Bu gemiler, “sistemler sistemi” olarak tanımlanan karmaşık bir yapıya sahiptir. Her bir sistemin, belirlenmiş çok sıkı kurallar ve kısıtlamalar içerisinde, birbiriyle ve mürettebatla bütünleşik olarak görevini yerine getirecek şekilde tasarımılanması gerekmektedir. Bu isterler, tasarım sürecinde büyük zorlukları ve riskleri kaçınılmaz olarak beraberinde getirmektedir.

Askerî gemi tasarım sürecinin birinci aşaması olan kavramsal tasarım aşamasında çözümlenen hususlardan biri hayati öneme sahip olan sevk ve elektrik güç sisteminin seçimidir. Seçime yönelik kararlar, belirli ölçütlere istinaden belirli seçenekler arasından verilmektedir. Seçimde kullanılan birçok ölçütün iç içe geçmiş olmaları ve birbiriyle çatışan ögeler içermeleri, bu seçim sürecini zorlaştırmakta ve karmaşıklştırmaktadır. Geleneksel düşünme ve muhakeme yeteneği bu seçimin yapılmasında yetersiz kaldığından bir karar destek modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında; harp gemilerinin sevk ve elektrik güç sistemine ilişkin karar verme süreçlerinde risk ve zorlukları azaltmak maksadıyla, makine ve gemi inşaatı mühendisliği, yöneylem araştırması

ile yapay zekâ dallarından çeşitli unsurları içeren disiplinler arası bir karar destek modeli önerilmiştir.

Modelin uygulaması, jenerik birer fırkateyn ve açık deniz karakol gemisi (ADKG) için gösterilmiştir. Bu gemilerin özellikleri kullanılarak MARIN'in Wageningen C4-40 serisi pervaneler için geliştirmiş olduğu MC440 yazılımı vasıtasıyla sevk sistemlerinin sahip olması gereken fren gücü değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlere istinaden; fırkateyn için konvansiyonel dizel motorlardan ve dizel motor-gaz türbini birleşimlerinden oluşan tam mekanik tahriki, gaz türbini-elektrikli tahrik birleşimlerinden oluşan melez tahriki ve tam elektrikli tahriki içeren yedi seçenek; ADKG için ise konvansiyonel dizel motor birleşimlerini ve dizel motor-elektrikli tahrik birleşimlerini içeren dört seçenek kullanılmıştır. Seçenekleri değerlendirebilmek maksadıyla yapılan çözümleme sonucunda dokuz ölçüt belirlenmiştir.

Bu modelde, ölçütlerin ağırlıklarının girdi olarak atandığı ve her ölçüt için seçeneklerin ağırlıklarının sinaptik ağırlık olarak kullanıldığı bir yapay sinir ağı mimarisi oluşturulmuştur. Girdi olarak kullanılacak değerlerin hesaplanması için; AHP'yi, insanın düşünme tarzına yakın olan ve algının veya yargının ifade edildiği dilde bulunan belirsizlik, muğlaklık ve öznelliğin üstesinden gelebilmek maksadıyla bulanık kuram ile birleştiren Buckley geometrik ortalama yaklaşımını esas alan bulanık AHP (FAHP) yöntemi uygulanmıştır. Yapay sinir ağı işlemleri, MATLAB Simulink Deep Learning Toolbox™ ortamında yapılmıştır.

Yapay sinir ağı kullanılarak yapılan sıralamada her iki jenerik gemi için de konvansiyonel dizel motor tahrikli sistemler ilk sırayı almıştır. Önerilen model, iç içe geçmiş karmaşık ölçütleri içeren ve çoklu seçeneğin bulunduğu benzer seçim süreçleri için de kolaylıkla uygulanabilecek bir yapıya sahiptir. Geleneksel enerji verimliliği tahmin/hesaplama yaklaşımlarından farklı olarak, ticari gemiler için uygulanmakta olan EEDI benzeri bir gösterge olan IWEEDI'nin harp gemileri için enerji verimliliği belirleme standardı olarak kullanılmasına yönelik uygulamalar yapılarak, bu göstergenin kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: FAHP, yapay sinir ağı, harp gemisi, kavramsal tasarım, sevk sistemi.

Development of Integrated Decision Model Utilizing Fuzzy Hierarchy Process and Artificial Neural Networks for Propulsion and Electrical Power System Selection at the Conceptual Design Phase of Warships

Selçuk CİN

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ

Surface warships (combatants) constitute the main surface warfare capability of a naval force. These vessels have a complex structure described as a “system of systems”. Each system of warships should be designed to fulfill their duties working in compatibility with each other and with the crew within strict regulations and constraints. These requirements inevitably bring great difficulties and risks in the design process.

One of the issues analyzed in conceptual design phase, which is the first phase of the naval ship design process, is the selection of the vitally important propulsion and electrical power system. Selection decisions are made among certain options based on certain criteria. The fact that many criteria used in the selection are interrelated and contain conflicting elements makes this selection process difficult and complex. Since traditional thinking and reasoning abilities are insufficient to make this selection, a decision support model is required. In this context, in order to reduce risks and difficulties in decision-making processes regarding propulsion and electrical power systems, an interdisciplinary decision support model that includes various elements from mechanical and marine engineering, operations research and artificial intelligence has been proposed in this dissertation study.

The application of the model was demonstrated for a generic frigate and an offshore patrol vessel (OPV). Using the characteristics of these vessels, the brake power values that the propulsion systems should produce were calculated utilizing the MC440 software developed by MARIN for the Wageningen C4-40 series propellers. Based on these values; seven options including fully mechanical propulsion consisting of conventional diesel engines and diesel engine-gas turbine combinations, hybrid drive consisting of gas turbine-electric propulsion combinations and fully electric propulsion were used for the generic frigate; and four options including conventional diesel engine combinations and diesel engine-electric propulsion combinations were used for the generic OPV. Nine criteria were determined as a result of the analysis conducted to evaluate the options.

In this model, an artificial neural network architecture was created in which the weights of the criteria were assigned as input and the weights of the options for each criterion were used as synaptic weights. The fuzzy AHP (FAHP) method, which is based on the Buckley geometric mean approach that combines fuzzy theory and AHP to overcome the uncertainty, ambiguity and subjectivity found in the language that is close to the human way of thinking and in which perception or judgement is expressed, was applied in order to calculate the weights to be used as input. Artificial neural network operations were performed in the MATLAB Simulink Deep Learning Toolbox™ environment.

In the ranking using artificial neural network, conventional diesel engine propulsion systems ranked first for both generic vessels. The proposed model can easily be applied to similar selection processes that involve complex interrelated criteria and multiple options. Unlike traditional energy efficiency estimation/calculation approaches, the usability of the Integral Warship Energy Efficiency Design Index (IWEEDI), an indicator similar to the Energy Efficiency Design Index (EEDI) applied for commercial ships, has been demonstrated by making applications to use it as an energy efficiency determination standard for warships.

Keywords: FAHP, artificial neural network, warship, conceptual design, propulsion system.

1 GİRİŞ

Tarihi kalıntılarda MÖ 4000 yıllarına kadar uzanan dönemlerde suda muhtelif araçların kullanıldığına ilişkin kanıtlar bulunmuştur (Curley, 2012). Araçlar, başlangıçta kürek ve/veya yelkenle hareket ettirilirken ilerleyen dönemlerde sadece yelkenle sevk edilir olmuştur. Buhar gücünün sanayide kullanılmaya başlanması ile birlikte suda kullanılan araçlarda da ilk önce pistonlu, müteakiben de türbinli buhar makineleri kullanılmıştır. Enerji kaynağı olarak ise önce katı fosil yakıtı (kömür) daha sonra ise sıvı fosil yakıtı (petrol) kullanılır hâle gelmiştir.

20. yüzyılın başlarında kara araçlarında dizel motorların kullanılması ile birlikte gemi sevkinde de yeni bir çağ başlamıştır. 20. yüzyılın ortalarında hava araçlarının motorlarından türetilen deniz gaz türbinleri, güç yoğun yapıları ile farklı bir sevk seçeneği oluşturmuştur. Günümüzün deniz araçlarında genel olarak sıvı veya sıvılaştırılmış fosil yakıtlı dizel motorlar ve gaz türbinleri ile çekirdeksel veya sıvı fosil yakıtlı buhar türbinleri kullanılmaktadır. Kaynaklarının kısıtlı olması ve iklim değişikliğine olumsuz etkileri nedeniyle fosil yakıtlar yerine yenilenebilir ve/veya görece daha “temiz” sevk sistemleri ile ilgili çalışmalar başlamıştır.

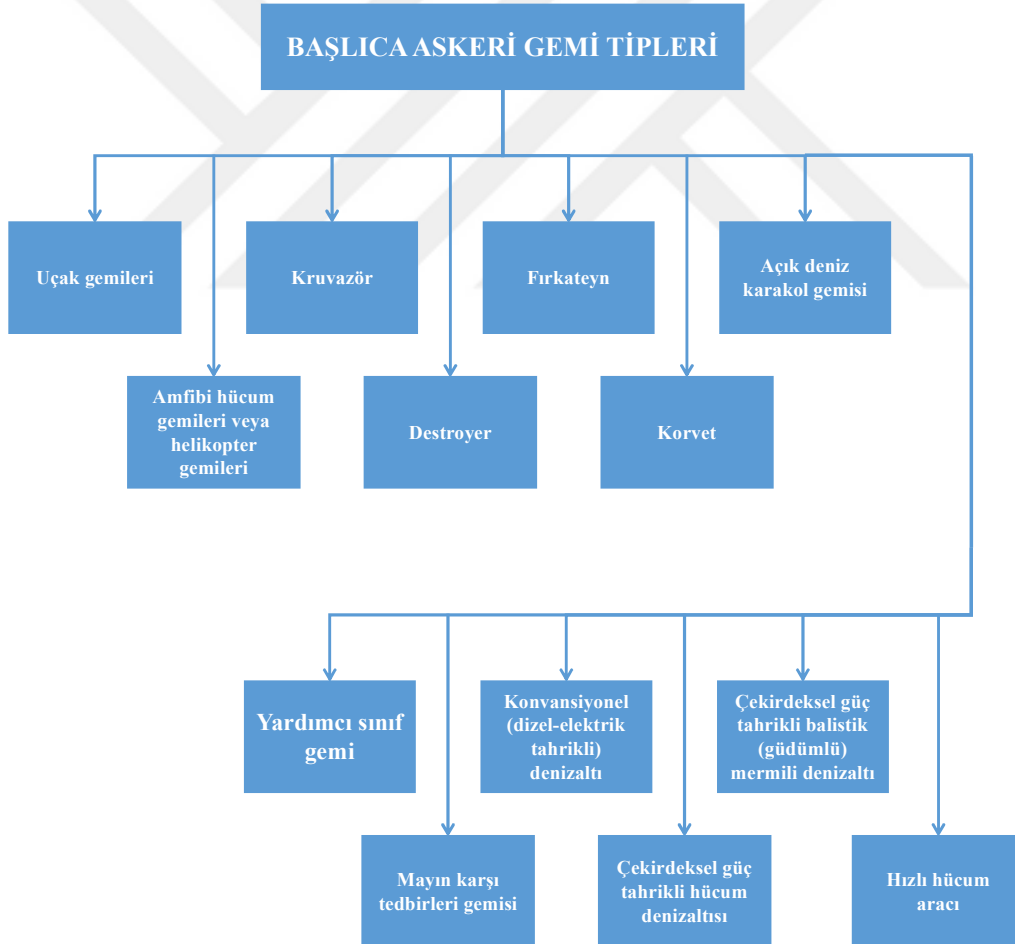
Askerî gemilerin sevk sistemleri de yukarıda belirtilen tarihi gelişimden geçmiştir. Askerî gemilerin tasarımları, silah teknolojisindeki ve harp/harekât türlerindeki gelişmelere istinaden farklı görevleri icra edecek şekilde farklılaşmıştır. Sömürge dönemlerinde askerî gemiler, ticari sömürge konvoylarını korumak ve donanmalar arası üstünlük sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Mayın, uçak, denizaltı, radar, güdümlü mermi, sonar vb. silah sistemlerinin savaş sahnelerinde kullanılmaya başlanması ve çıkarma harekâtı, filo refakati vb. farklı ve görece yeni harp/harekât türlerinin ortaya çıkması sonucu askerî gemilerin tasarımlarında önemli değişiklikler oluşmuştur. Gemi tasarımında oluşan bu değişikliklerin yanında teknolojiye de yaşanan gelişmeler sonucu sevk sistemlerinin tasarımı da değişmiştir. Sevk sistemleri daha karmaşık hâle gelmiş, bu durum da bu sistemlerin tasarımında ve bu tasarıma bağlı işletme ve destek (idame) süreçlerinde önemli risk ve zorlukların yaşanma olasılığını arttırmıştır.

Bu tez çalışmasında; çağdaş donanmalarda yaygın kullanımı olan ve önemli sayıda donanmanın bel kemiğini teşkil ettiği değerlendirilen iki farklı tip su üstü harp

gemisi, uygulama için örnek alınmak suretiyle, risk ve zorlukların yaşanma olasılığının azaltılarak, kavramsal tasarım safhasında seçenekler arasından en uygun sevk sistemi seçiminin yapılabilmesi maksadıyla bir karar modeli önerilmiştir.

1.1 Askerî Gemi Tipleri

Devletler; millî menfaat, etki ve ilgi alanlarına istinaden ihtiyaç ve imkânları doğrultusunda tedarik edecekleri deniz harp sistemlerini belirlemektedir. Devletlerin deniz kuvvetleri (donanması), sahip oldukları deniz harp sistemlerinin kabiliyetlerine istinaden derecelendirilebilmektedir (Fels ve ark., 2012). Bu sistemler genel olarak yaptıkları görevlere istinaden Şekil 1.1’de gösterildiği şekilde farklı tiplere ayrılmaktadır (Carlton, 2003; Fels ve ark., 2012).



Şekil 1.1 Başlıca askerî gemi tipleri [Fels ve arkadaşlarından (2012) uyarlanmıştır]

Bir deniz kuvvetinin su üstü ana muharebe kabiliyetini su üstü harp gemileri oluşturmaktadır. “Harp gemisi” kavramının tanımı ve bu kavramın kapsadığı gemi tipleri ile ilgili açık bir uzlaşma ya da ölçünlü bir tanımlama bulunmamaktadır. Carlton (2003), su üstü harp gemilerini “büyük” ve “küçük” olarak iki ayrı gruba ayırmıştır. “Büyük” grupta, kruvazörler, destroyerler ve fırkateynler yer alırken, “küçük” grupta ise korvetler, güdümlü mermili araçlar, karakol gemileri vb. daha küçük platformlar yer almaktadır. Kimber (2015), küçük harp gemilerini fırkateyn, korvet ve açık deniz karakol gemisi (ADKG) olarak belirtmiştir; birincisi, okyanus ortamında harekât kabiliyetine sahip karmaşık bir gemi iken sonuncusu açık denizde görev yapabilen görece basit bir platformdur. Korvet ise karmaşık ama dayanıklılığı düşük gemileri tanımlamaktadır. Bricknell ve Partridge (2007) korvet, fırkateyn, destroyer ve uçak gemilerini küresel harp gemisi olarak tanımlamıştır. Kastner ve arkadaşları (1982), 1980’lere kadar fırkateynlerin, destroyer olarak adlandırıldıklarını belirtmiş ve bu gemi tipini küçük harp gemisi olarak tanımlamıştır.

2. Dünya Savaşı’nda fırkateynler, refakat görevlerinde ve temel olarak denizaltı savunma harbi (DSH) için kullanılmıştır (Office of the Parliamentary Budget Officer, 2017). Destroyerler ise hafif top ve uçaksavar silahlarına sahip olan, DSH silahları ve su bombaları ile donatılmış genel amaçlı gemiler olarak tanımlanmıştır. Günümüzde ise destroyer ifadesi, 7000 ton ve üzeri light ship weight’e (LSW) sahip ve üzerinde gelişmiş radar sistemleri ile en az 48 hücreli dikine fırlatıcıya sahip gemileri tanımlamaktadır.

Çağdaş harp gemileri, en karmaşık insan yapımı sistemlerden biri hâline gelecek şekilde gelişim göstermiştir. Bu gemilerden; muhtelif harp türlerini (DSH, hava savunma harbi-HSH ve su üstü harbi-SÜH) yanında; korsanlıkla ve uyuşturucu kaçakçılığı ile mücadele, insani yardım ve tahliye, arama-kurtarma, su ürünleri denetimi vb. doğrudan harp harekâtları ile bağlantılı olmayan görevleri yerine getiren zorlu ve geniş ölçekli kabiliyete sahip olması beklenmektedir (Tudor ve Harrison, 2019). Genel olarak çağdaş fırkateynlerden de savaş dönemlerinde SÜH, DSH ve HSH türlerini icra edebilecek şekilde tasarlanması istenmektedir (Barbato ve Bonvicini, 2015; Congressional Research Service [CRS], 2020).

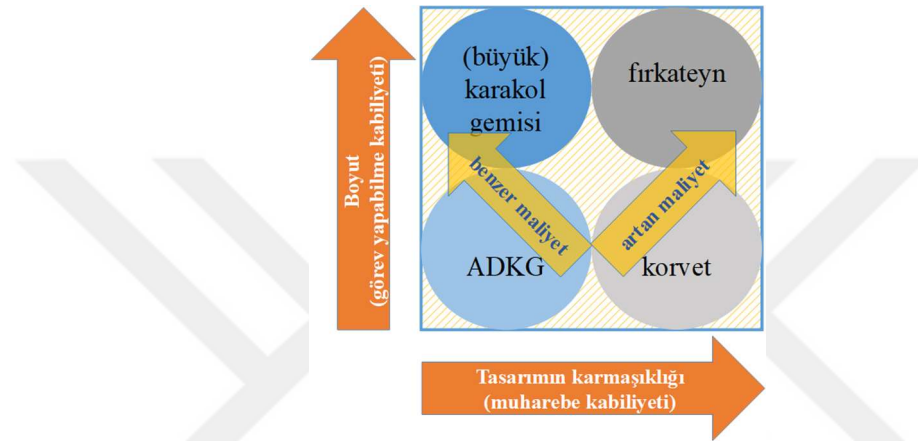
Geleceğe yönelik olarak pek çok donanmanın deniz güvenliğini sağlamaya odaklanması ve küresel ekonomik durum nedeniyle gemi tasarımcılarının ve

üreticilerinin, fırkateyne alternatif olarak “hesaplı” (yeterli askerî yetenek sunan ancak bir fırkateyn veya destroyer tipinden çok daha düşük ve sabit bir “bedele” sahip) karakol gemisi tasarımına yönelmektedir (Kimber, 2015). Bu gemiler, ADKG ile aynı imkân ve kabiliyetlere, fakat küresel olarak görev yapabilen özelliklere ve fırkateynlerden daha düşük harp ve beka kabiliyetlerine sahip olacaktır (Kimber ve Thorne, 2013). Maliyetleri düşük tutmak maksadıyla bu tür tasarımlarda ana kilit nokta gerçek isterleri ve gemilerin kullanılacakları sahayı anlamak ve gerekenden fazla kabiliyet eklenerek asıl isterlerden uzaklaşılmasını engellemektir.

Tasarımda önemli etkenlerinden biri geminin sahip olması istenen beka kabiliyeti ile görev yetenekleri arasındaki dengedir (Kimber ve Thorne, 2013). Maliyet etkin beka kabiliyeti, tehditleri anlamak ve bu tehditlere karşı gemiyi koruyacak bir tasarımla ilgili olmaktadır. ADKG’ler doğrudan muharebe maksadıyla tasarlanmamakta ve beka kabiliyetleri, mürettebatın emniyetini ve kolluk görevlerinin icrasını kapsayacak kadar sınırlandırılmaktadır. Diğer harp gemileri ise “muharebe” maksadıyla tasarlanmakta ve bu gemilerin, harp kabiliyetlerinin kaybı riskini en aza indirecek düzeyde beka kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. ADKG’ler için her ne kadar en büyük öncelik mürettebat emniyeti olsa da bu gemiler deniz güvenliği görevlerini yürütürken çoğu zaman tek gemi olarak görev yaptıklarından beka kabiliyetlerinin; asimetrik tehditler, küçük deniz aracı ile taarruzlar vb. tehditlere karşı koyacak yeterlilikte olması gerekmektedir. Fırkateyn ile ADKG arasına, “düşük seviyeli (profilli)” muharebe görevlerine katılabilen ve bir ADKG’ye kıyasla daha fazla beka kabiliyetine sahip, ancak bir fırkateyn olarak tasarlanması hâlinde “hesaplı” olamayacak bir “ara” gemi tipi çözüm olarak önerilebilecektir: “(büyük) karakol gemisi”. Burada önerilen yeni karakol gemisi tipinin ve diğer gemi tiplerinin maliyet, tasarım karmaşıklığı ve boyut ilişkisi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.

Gemilerin tipleri ve görev kabiliyeti boyutlarla ilişkilendirilse de farklı uygulamalarla da karşılaşılabilmektedir. 108 m boya ve 3750 ton deplasmana (Hollanda Savunma Bakanlığı, t.y.) sahip Hollanda Kraliyet Donanmasına ait Holland sınıfı gemilerin görev bölgeleri arasında, Atlas Okyanusu’nun ortasında yer alan Karayipler bulunurken (Smith, 2015), 90 metre boyunda ve 1800 ton deplasmana (BAE Systems, t.y.) sahip Birleşik Krallık Kraliyet Donanması’na ait

River sınıfı gemiler Atlas Okyanusu'nun tamamında görevlendirilmektedir (Birleşik Krallık Kraliyet Donanması, t.y.). Holland sınıfı gemiler, gemileri inşa eden tersane (Damen, t.y.) tarafından ADKG (“offshore patrol vessel-OPV”) olarak tanımlanmışken, kullanıcısı (Hollanda Savunma Bakanlığı, t.y.) tarafından “ocean-going patrol vessel-OPV” olarak tanımlanmıştır. River sınıfı gemiler ise hem gemileri inşa eden tersane hem de kullanıcısı tarafından ADKG (“offshore patrol vessel-OPV”) olarak tanımlanmıştır (BAE Systems, t.y.; Birleşik Krallık Kraliyet Donanması, t.y.).



Şekil 1.2 Harp gemileri için maliyet, tasarım karmaşıklığı ve boyut ilişkisi
[Kimber ve Thorne'dan (2013) uyarlanmıştır]

Yukarıda yapılan incelemeler dikkate alındığında, gemi tiplerinin belirlenmesinde herhangi kesin ve keskin bir kaide görülememiştir; aksine çeşitli çalışmalarda aynı ve/veya benzer platformlara, farklı tip isimleri verilmiştir. “Ocean-going”, “offshore” vb. Türkçe’ye tercüme edildiklerinde/uyarlandıklarında, birbirine yakın anlamlar içerebilen ve bu hâliyle tercümede zorluk yaşanan adlandırmalar da bulunmaktadır.

“Global Surface Warships Market Report 2020” sonucuna göre 10 yıllık su üstü harp gemisi pazar tahmini 155,16 milyar ABD dolarıdır (Defence IQ, t.y.-a). Karakol gemisi pazarının ise askerî denizcilik pazarının en hızlı büyüyen bölümü olduğu belirtilmiştir (Defence IQ, t.y.-b); bu pazarın değerinin (2019'da) 20,6 milyar ABD dolarından (2024'te) 34,1 milyar ABD dolarına yükselmesi beklenmektedir. 429 sektör uzmanı ve askerî paydaş ile yapılan bir ankette, katılımcıların %81'i, uzun vadede, mevcut gemileri modernize etmek veya (ihtiyaçlara) uyarlamak yerine, yeni karakol gemisi tedarik etmenin daha maliyet

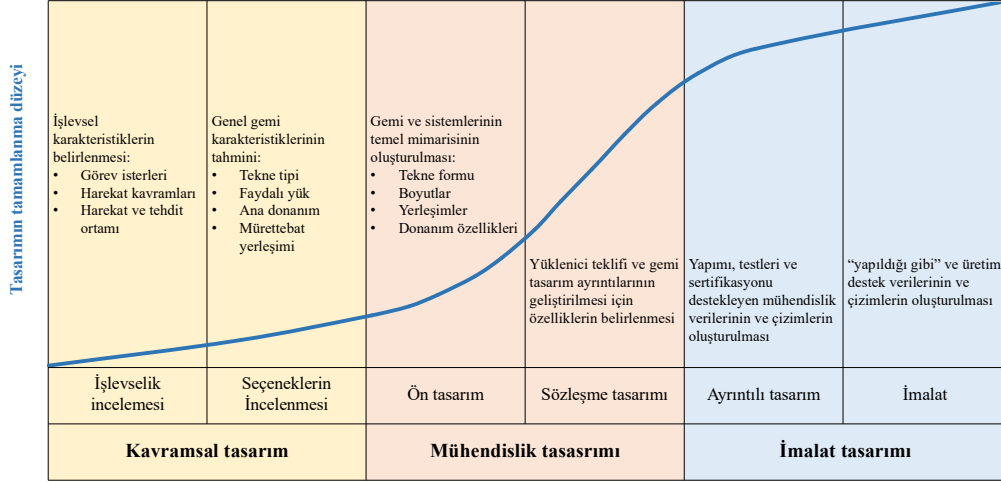
etkin ve stratejik olarak uygun bir seçenek olduğunu belirtmiştir (Defence iQ, t.y.-c).

Yukarıda verilen bilgilere istinaden; fırkateynlerin, nispeten daha küçük ölçekli donanmaların ana, büyük ölçekli donanmaların ise önemli bir su üstü savaş unsuru olmaya devam edeceği; gelişen tehdit ve ekonomik durum nedeniyle doğrudan harp kabiliyeti gerektirmeyen görevlerde daha maliyet etkin bir unsur olan karakol gemilerinin kurumlar tarafından kullanılmaya devam edileceği, fırkateyn ve özellikle karakol gemilerine olan talebin uzun yıllar boyunca artarak süreceği değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında jenerik gemi olarak kullanılmak üzere fırkateyn ve ADKG tipi gemiler seçilmiştir.

1.2 Askerî Gemilerin Tasarım Süreci

Askerî gemiler için tedarik süreçleri, filonun genelinde harekât kabiliyetinde bir eksiklik/boşluk tespit edilmesiyle birlikte başlamaktadır; bu eksikliğin/boşluğun sebebi yeni silah sistemlerinin mevcut gemilere basit/uygun bir şekilde kurulamaması, filoya ilave görevler verilmesi, mevcut sınıf gemilerin kullanım ömrünün tamamlanması vb. etkenler olabilmektedir (la Monaca ve ark., 2020). Tespit edilen bu eksikliklerin/boşlukların giderilmesine yönelik olarak harekât istekleri belirlenmektedir. Askerî gemilerin tasarım süreci (Şekil 1.3), bu harekât isteklerinin belirlenmesiyle başlayan ve yeni geminin kullanıcılarına teslim edilmesiyle sona eren, oldukça uzun, zorlu, yüksek riskli ve karmaşık bir süreçtir.

İsteklerde yapılan değişiklikler/güncellemeler, gemilerin tasarımında ve ömür devri maliyetinde (life cycle cost-LCC) önemli değişikliklere neden olabilmektedir (Fitzsimonds, 1980; Hawke ve ark., 1985; McKenzie ve Moores, 1992). Ayrıca gemilerin, tedarik kararının verilmesinden çok uzun bir süre sonra ancak göreve başlayabilecekleri (McCallum ve ark., 2020) ve uzun süre boyunca kullanılacakları dikkate alındığında, harekât isteklerinin belirlenmesinde oldukça dikkatli olunması gerekmektedir (Watson, 1998). Type 23 fırkateyninin ömrü 18 yıl olarak öngörülmüş olmasına rağmen, gemilerin 35 yıldan fazla görevde kalabileceği belirtilmiştir (Peacock, 2019). Benzer örnekler, gemilerin kullanım ömrünün belirlenenden daha uzun olabileceğini göstermektedir. Bu ömür 50 yıla kadar ulaşabilmektedir (Tudor ve Harrison, 2019).



Şekil 1.3 Askerî gemilerin tasarım süreci [la Monaca ve arkadaşlarından (2020) uyarlanmıştır]

Kavramsal tasarım safhası, harekât isterlerinin belirlenmesi ve gerekli verilerin toplanmasını takip etmektedir. Bu safha, projede tekne formunun geliştirilmeye ve ana boyutlar ile makine sistemlerinin tanımlanmaya başlandığı nirengidir (la Monaca ve ark., 2020). Bu safhanın amacı kullanıcı isterlerinin belirginleştirilmesidir (Gale, 2003).

Gemiye kurulacak olan sistemlerin birbiri ile bütünleşik olarak görevini yerine getirmesi istenirken bu sistemler, özellikle ağırlık ve hacimleri nedeniyle birbirine çapırız vermektedir (la Monaca ve ark., 2020). Benzer şekilde birbirine çapırız veren isterlerin, kullanıcının hedeflerini de dikkate alarak eniyilenmesi gerekmektedir.

Ana boyutlar ve geometrik katsayılar, güç, LSW, taşıma kapasitesi (faydalı yük), dead weight tonnage (DWT), denizcilik nitelikleri vb. birçok kontrol etkeninin, geminin sonraki tasarım aşamalarında önemli ölçüde değişmesi beklenmemektedir (la Monaca ve ark., 2020). Yeni bir bileşenin, alt sistemin veya sistemin gemiyle bütünleştirilmesinin gerekmesi durumunda, tasarımın karmaşıklığı katlanarak artacak ve bunun da gemi üzerindeki etkisinin öngörülmesini çok zorlaştıracaktır. Tasarımın zorlu yönü, tasarım safhalarında ilerledikçe tasarımın ayrıntılarının artması ancak uygulanabilecek seçeneklerin azalmasıdır (Chalfant, 2015). Böylece, en az bilginin mevcut olduğu ve verilerdeki belirsizliğin en fazla olduğu tasarımın erken safhalarında en yüksek etkiye sahip kararlar alınmış olmaktadır. Maliyetle ilgili yapılan araştırmalar, bir silah sisteminin işletme ve destek maliyetlerinin

yaklaşık %85'inin, LCC'nin %10'dan azının harcanmış olduğu isterlerin tespit edilmesi sürecinde belirlendiğini göstermektedir (United States Government Accountability Office [GAO], 2003).

Kavramsal tasarım safhasında iki aşama bulunmaktadır: Tasarım seçeneklerinin oluşturulması/üretilmesi ve mümkün olan en iyi seçeneğin seçilmesine karar verilmesidir (la Monaca ve ark., 2020). Birbiriyle iç içe geçmiş ve birbirini etkileyen çoklu etkenlerin olduğu bu tür tasarım süreçlerinde çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin uygulanması önem kazanmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanması için ise uygun bir modele ihtiyaç duyulacaktır. Kesin olmayan ve birbirini etkileyen birçok etkenin bulunduğu ve tasarımcıların ve/veya karar vericilerin tecrübelerinin de dâhil edilmesi olanağının sağlanmak istenildiği durumlarda bulanık mantığın uygulanması büyük yarar sağlayacaktır.

Kavramsal tasarım safhasında farklı seçenekler arasında performans, maliyet ve risk karşılaştırması yapıldığından, kesin doğruluktan ziyade göreceli doğruluk ve tutarlılık ortaya konulmaktadır (la Monaca ve ark., 2020). Bu safha tamamlandığında, temel performans isterleri ile birlikte yeni geminin ana karakteristiklerinin belirlenmiş olması gerekmektedir. Kavramsal tasarım safhasının çıktıları arasında, bu tez çalışmasının kapsamında olan iki önemli çıktı bulunmaktadır: sevk sisteminin ve elektrik güç sisteminin belirlenmesi (Gale, 2003; la Monaca ve ark., 2020).

Sevk sistemi, sevk gücünü üreten makinenin enerji kaynağı olan yakıtın depolanmasından pervaneye kadar olan bir dizi bileşeni ve kavramı içermektedir. Benzer şekilde elektrik güç sistemi de elektrik gücünü üreten makinenin, varsa depolanabilir enerji kaynağının (yakıt, pil vb.) depolanmasından elektrik gücüne ihtiyaç duyan son kullanıcıya kadar olan bileşenleri ve kavramları içermektedir. Yukarıda da açıklandığı üzere gemiyi oluşturan tüm sistemlerin, alt sistemlerin ve bileşenlerin, harekât isterlerini karşılayacak ve belirlenmiş olan kurallar dâhilinde birbiri ile bütünleşecek şekilde tasarımlanmaları gerekmektedir. Manevra ve hız isterleri bakımından sevk sistemi ile geminin başta silah, komuta-kontrol ve hasar kontrol olmak üzere tüm elektrik kullanıcılarını besleyen elektrik güç sistemi geminin tamamıyla iç içe ve bütünleşik olarak görev yapacaktır.

Sevk sisteminden belirli hız, ivmelenme, menzil, çeviklik ve manevra kabiliyeti sunması beklenmektedir, ancak bunların hepsinin aynı anda sağlanması mümkün olamamaktadır (Buckingham, 2017). Bu nedenle performans, gizlilik, hassasiyet, hasar, güvenilirlik, emniyet ve maliyetlerin hepsinin “katlanılabilir” ve uygulanabilir olduğu dengeli bir tasarım ancak mümkün olabilecektir. Bu kapsamda, bir gemi için muhtemel aday olan sevk ve elektrik güç sistemlerinin seçiminde yukarıda da belirtildiği üzere bir model oluşturulması ve çok ölçütlü seçim değerlendirmesi yapılması önerilmektedir. Bu seçim çalışmalarına başlanmadan önce Şekil 1.4’te gösterilen verilerin sağlanmış olması gerekmektedir (Couch ve Fisher, 2016).



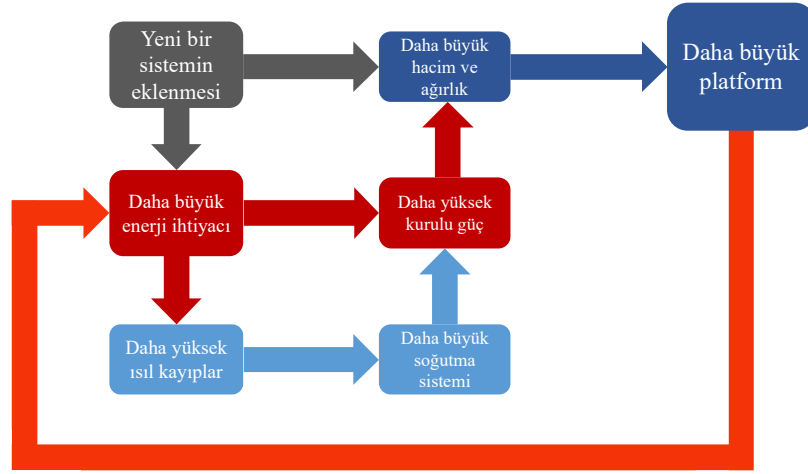
Şekil 1.4 Sevk sistemi seçim çalışmalarına başlanmadan önce sağlanmış olması gereken veriler [Couch ve Fisher’den (2016) uyarlanmıştır]

Bu tez çalışmasında, önceki kısımda belirtilmiş olan iki farklı tipte jenerik gemi için muhtelif sevk ve elektrik güç sistemi seçenekleri arasından en uygun olanının seçimine yönelik bir model önerilmiştir. Bu seçim için gerekli olan ve yukarıda belirtilen dört veri ile ilgili çözümleme bu bölümün ileriki kısımlarında yapılmıştır.

Gelecekte karşılaşılabilecek tehditlere karşı gemiye kurulumu gerekecek olası silah ve algılayıcılarla ilgili yapılacak değerlendirmelerde, bunların gemi tasarımına olan etkilerinin de dikkate alınması gerekecektir. İstenecek olası ilave kabiliyetlerin gemiye getireceği büyüme etkisi Şekil 1.5’te gösterilmiştir (Tate, 2018).

Özellikle maliyetleri düşürmek ve ihtiyaç duyulan platformu kısa sürede tedarik edebilmek maksadıyla, ortak programların projeleri veya kullanımda olan platformlar üzerinde değişiklik yapmak suretiyle de gemi programları yürütülebilmektedir (McCallum ve ark., 2020; Michalchuk, 2017; Thyssenkrupp, t.y.). Her ne kadar uygun bir çözüm olarak görünse de bu tür programlarda çeşitli

sebeplerle gecikmelerin, maliyet artışlarının vb. olumsuzlukların yaşanabileceğinin dikkate alınması gerekmektedir (Australian National Audit Office [ANAO], 2023).



Şekil 1.5 Olası ilave kabiliyetlerin gemiye getireceği büyüme etkisi [Tate'ten (2018) uyarlanmıştır]

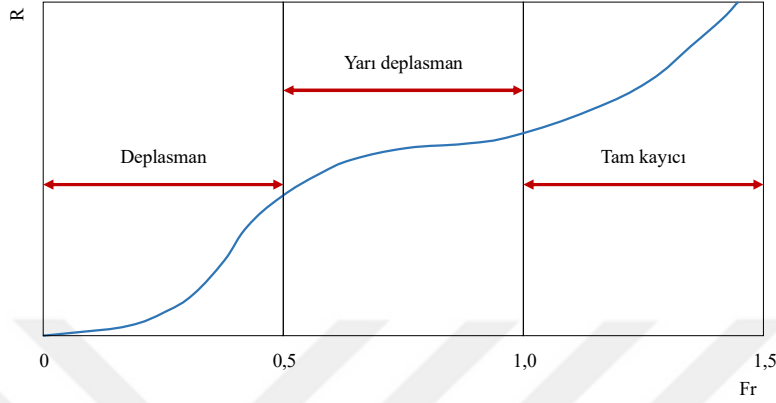
Mevcut askerî ihtiyaçları karşılayan ve ortaya çıkan tehditlere de aynı zamanda uyum sağlayan dengeli, işlevsel ve fiziksel olarak bütünleşik bir tasarıma ulaşma zorunluluğu, tasarımcılar için büyük bir zorluk teşkil etmektedir (Tudor ve Harrison, 2019). Bir geminin işlevsel ve fiziksel tasarımının karmaşıklığı arttıkça, sistemlerin bütünleştirilmesinde başarısızlığa yol açabilecek risklerin çeşitliliği ve sayısı da artmaktadır.

1.3 Tekne Tipi

Harp gemilerinin tasarımına etki eden önemli isterlerden biri geminin sahip olması istenen azami hızıdır. Azami hız, gemiye kurulacak sevk sisteminin azami gücünün ana belirleyicisidir. Azami hız, görev profilinin en üst hız kademesidir.

Elektrikli tahrikte, geminin toplam elektrik güç ihtiyacı, elektrikli sevk makineleri (sevk elektrik motorları) ve gemideki diğer elektrik kullanıcılarının (genel kullanım ve servis sistemleri, savaş ve komuta kontrol sistemleri) toplam ihtiyacı hesaplanarak belirlenmektedir; sevk güç ihtiyacı ile elektrik güç sisteminin güç ihtiyacının birlikte değerlendirilmesi ve tasarımın birlikte yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, elektrikli tahrik uygulamalarında, geminin azami hızı doğrudan elektrik güç sisteminin tasarımını da etkilemektedir. Bu husus Üçüncü ve Dördüncü Bölüm'de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Azami hız isteri geminin hidrodinamik davranışını doğrudan etkilemekte/ belirlemektedir (Molland ve ark., 2011). Bu davranış genel olarak Şekil 1.6’da verilen eğri ile gösterilebilmektedir. Tekne formunun temel gelişimi bu aşamaların her biri için farklı olmaktadır. Tekne formu ile ilgili en temel tanım (1.1) eşitliği ile yapılabilmektedir.



Şekil 1.6 Direncin Fr sayısı ile değişimi [Molland ve arkadaşlarından (2011) uyarlanmıştır]

$$\nabla = C_B \cdot B \cdot L \cdot T \quad (1.1)$$

Kuramsal olarak, boyutlarda herhangi bir sınırlama olmaksızın, (1.1) eşitliğini sağlayacak sonsuz sayıda C_B , B , L ve T birleşimi bulunabilecektir; bununla birlikte uygulamada boyutların seçim aralığını sınırlayan birçok amaç ve kısıtlama bulunmaktadır (Molland ve ark., 2011). Bunlar arasında liman, üs vb. gemilerin aborda olabileceği yerlerdeki ve deniz sahası, kanal vb. gemilerin görev yapacağı bölgelerdeki fiziksel sınırlamalar yer almaktadır. Diğer sınırlamalar ise düşük direnç ve dolayısıyla düşük sevk gücü (yakıt tüketimi), denizcilik özellikleri, stabilite, maliyetler vb. gemilerin harekât isterleri ve verimle ilgili olan sınırlamalar/isterlerdir. Belirtilen tüm bu sınırlamaları/isterleri içeren “eniyilenmiş gemi boyutu”, ancak tasarım hızı için belirlenebilmektedir; tekne formunun, tasarım hızı dışında kalan tüm hız kademeleri için eniyilenmiş olarak tasarlanması çok mümkün olamamaktadır.

Geminin denizcilik özelliği, yukarıda belirtildiği şekilde gemi boyutuna etkisinin olmasının yanında, tekne yapısının da belirlenmesine etki etmektedir. Bununla birlikte, konvansiyonel deplasman tekne formuna sahip gemiler için hızı arttırmak ve denizcilik özelliklerini geliştirmek belirli bir aşamaya kadar mümkün olmaktadır (van Oossanen, 1989). Kötü hava ve deniz durumunda direnç artacak ve bu artış

çok büyük sevk gücünü gerektirecektir. Konvansiyonel deplasman tekne formu gemilerin denizcilik özellikleri, boyutlarının büyütülmesiyle arttırılabilmektedir. Yüksek hız ve arttırılmış denizcilik özelliklerinin aynı anda sağlanması ancak, teknenin deplasman hacminin en büyük kısmının tamamen su üstünde veya bu hacmin, su sathından çok derinde bırakılması ile mümkün olabilmektedir. Bu tekne yapısına sahip tekneler “gelişmiş tekneler” olarak adlandırılmaktadır. Bu tekne yapısına başlıca örnekler, SWATH, ACV, kayıcı ve hidrofil teknelerdir.

Deplasman tekne formu hızlı gemiler, Fr sayısının 0,4 ile 0,5 arasında olduğu gemileri tanımlamaktadır; destroyerler ve fırkateynler bu aralıkta yer almaktadır (van Oossanen, 1989). Bu hızlarda sevk gücünün azaltılmasında en önemli etken boy-deplasman hacmi ($L/\nabla^{1/3}$) oranıdır. İyi tasarıma sahip tekne formlarının en az 8 olan $L/\nabla^{1/3}$ oranına sahip olması gerekmektedir.

van Oossanen (1989) tarafından yukarıda belirtilen dört gelişmiş tekne için yapılan çalışma neticesinde, 30 knot hıza kadar olan hız ihtiyaçları için gelişmiş teknelerin konvansiyonel tekneler kadar enerji verimli olmadıkları ve bu gelişmiş teknelerin çok yüksek hız gereksinimleri için uygun oldukları bildirilmiştir. Ayrıca bu teknelerin tedarik maliyetlerinin de oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir.

LCS programının (ABD Donanması, t.y.) trimaran tekneye sahip olan Independence ve yarı kayıcı tekneye sahip olan Freedom sınıfı gemilerin benzeri bir kısım gemi sınıfı hariç olmak üzere, genel olarak fırkateyn ve ADKG’lerin tekne formunun, tek gövdeli konvansiyonel deplasman olduğu görülmektedir.

Her ne kadar gemilerin ağır deniz ve hava durumlarında yüksek hız yapabilmesi amacıyla denizcilik özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılsa da gemilerin hız tecrübeleri sakin suda yapılmakta ve Üçüncü Bölüm’de açıklandığı üzere ağır deniz ve hava durumlarında seyir için ilave güç payı bırakılmaktadır. Yukarıda da belirtildiği üzere tekne formu, tasarım hızı için belirlenebildiğinden; rüzgâr ve dalga hareketlerinin gemi performansı üzerindeki etkisinin de tasarım aşamasında dikkate alınması gerekmektedir (Bowditch, 1802/1995).

Dalga yüksekliği, geminin (hız) performansını etkileyen en önemli etkidir (Bowditch, 1802/1995). Dalga yüksekliğinin etkisi, rüzgârın etkisi ile benzerlik göstermektedir. Geminin emniyetli şekilde muhtelif faaliyetlerinin (hava aracı harekâtı, vasıta mayna/hisa, silah sistemlerinin kullanımı vb.) teknik olarak

icrasında hava ve deniz durumu önemli kısıtlamalar getirebilmektedir; bu nedenle tecrübe şartlarında yeterli bir performans gösteren bir geminin, kötü hava ve deniz şartlarında daha düşük performans göstermesi beklenen bir sonuçtur. Bu düşük performans, kısmi olarak muhtelif tedbirler (ör. yalpa sönümleyici kanatçıklar) ile belirli bir oranda arttırılabilmektedir.

Gemilerde kullanılacak itici tipi ve sayısı, tekne formunun tasarımına önemli etkisi bulunmaktadır. İtici tipi ve sayısı doğrudan tekne hatlarını, bu hatlar da direnci etkilediğinden; itici tipi ve sayısının, sevk gücünün hesaplanmasından önce belirlenmesi gerekmektedir (Watson, 1998). Ayrıca, iticilerin kış tarafta konumlandırıldığı gemilerde, iticiden kaynaklı titreşimlerin azaltılması maksadıyla, kış formunun yapısı önem teşkil etmektedir.

İtici, mekanik enerjiyi itme kuvvetine dönüştürerek gemiyi hareket ettirmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Farklı performans taleplerini karşılamak maksadıyla tasarımlanmış muhtelif itici tipleri veya iticilere destek sağlayan donanımlar kullanılmakla birlikte, en çok tercih edilen itici tipi uskur pervanedir.

Gemi boyutu ve özellikle su çekimi dikkate alındığında gücün büyük ve hızın yüksek olduğu durumlarda, kısıtlı su çekimine uygun boyutta pervane kullanılabilmesi amacıyla pervane sayısının arttırılması gerekebilecektir (Watson, 1998). Yüksek manevra kabiliyeti veya hasar durumunda yedeklenebilirlik sağlanabilmesi maksadıyla, harp gemilerinde çift pervane kullanmak en iyi seçenek olmaktadır (Bricknell ve Partridge, 2007; Watson, 1998). Gerekli sevk gücünün belirli pervane çapı ve bir adet pervane için çok büyük olması durumunda da birden fazla şaftın kullanımı gerekli olabilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003).

Yukarıda yapılan değerlendirmelere istinaden jenerik gemilerin çift şaftlı, uskur pervaneli ve tekne formunun tek gövdeli konvansiyonel deplasman olmasına karar verilmiştir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında örnek olarak alınan fırkateynin özellikleri van Es (2011) ve ADKG'nin özellikleri Buckingham (2011), Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman (2017) ve Smith (2015) tarafından kullanılan gemilerin özelliklerinden uyarlanmıştır. Bu gemilere ilişkin bilgiler Ek-A'da verilmiştir.

1.4 Görev Profili

Yıllık toplam görevde (seyirde) kullanılacak sürenin her bir hız kademesine dağılımı, görev profilini belirlemektedir. Başka bir ifadeyle, sevk ve elektrik güç sistemi bakımından görev profili, geminin görev yapması istenen hız aralığını ve her bir hız kademesinde geminin seyir yapacağı süreyi göstermektedir; her bir hız kademesinde geçirilen sürelerin toplamı yıllık seyir süresini belirtmektedir.

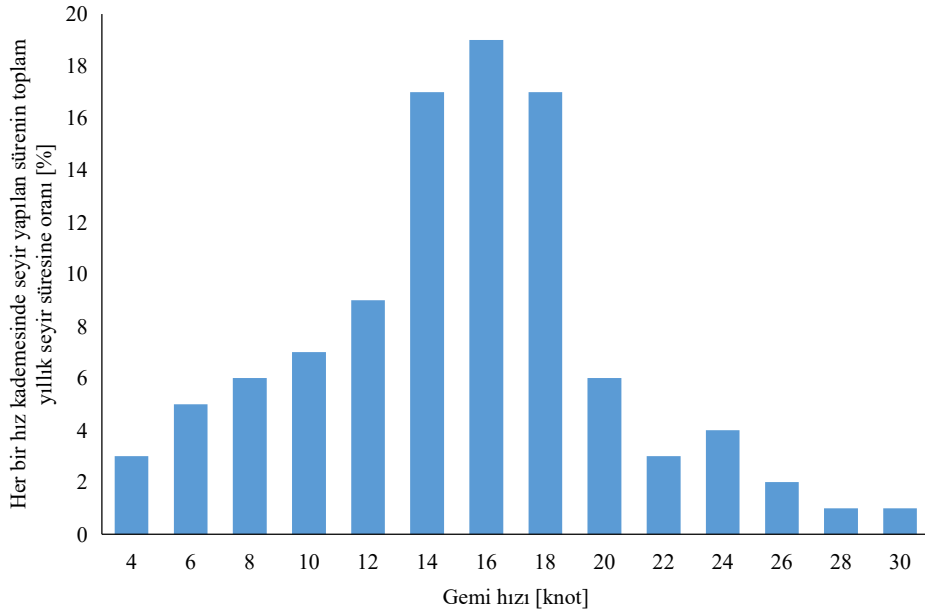
Görev profili, sevk ve elektrik güç sistemleri ile ilgili verilecek birçok kararı etkilemektedir (Surko ve Osborne, 2005). Görev profili ilaveten tekne formuna, depolanacak yakıt miktarına, bakım ve lojistik usullerine, güvenilirliğe, kullanılabilirliğe, salım ve atıklara (gri-siyah su), verimliliğe vb. etki etmektedir. “Tasarım Süreci” başlığı altında da belirtildiği üzere görev profili, sevk ve elektrik güç sistemlerinin seçim çalışmalarına başlanmadan önce belirlenmesi gereken dört temel husustan biridir (Couch ve Fisher, 2016).

Kastner ve arkadaşları (1982), fırkateynlerin, seyir zamanlarının %90’ını, azami hızın %60’ı altında kalacak şekilde görev yaptıklarını ve bu hız değeri için gerekli olan gücün toplam kurulu sevk gücünün %20’sine karşılık geldiğini belirtmiştir. Yazarlar, 0-18 knot aralığını intikal, 18 knot’ın üzerini ise “yüksek (boost)” hız aralığı olarak adlandırmıştır. Hodge ve Mattick (1996), harp gemilerinin genellikle 30 knot civarında azami hız yapacak şekilde tasarımlanmakla birlikte, seyir zamanlarının çoğunu daha düşük hızlarda geçirdiklerini, bu seyir zamanlarının %80’ini 18 knot’ın altında olacak şekilde seyir yaptıklarını belirtmiştir. Doerry (2007), 30 knot azami hıza sahip destroyer tipi bir geminin toplam seyir süresinin %2’sini 25 knot üzerinde geçirdiğini ve çoğunlukla 15 knot altında seyir yaptığını bildirmiştir. Karakol gemilerinin azami hızı için kullanılan değerler ise genel olarak 20-25 knot aralığında olacak şekilde belirlenmiştir (Açık Deniz Karakol Gemisi (ADKG), 2023; BAE Systems, t.y.; Hollanda Savunma Bakanlığı, t.y.).

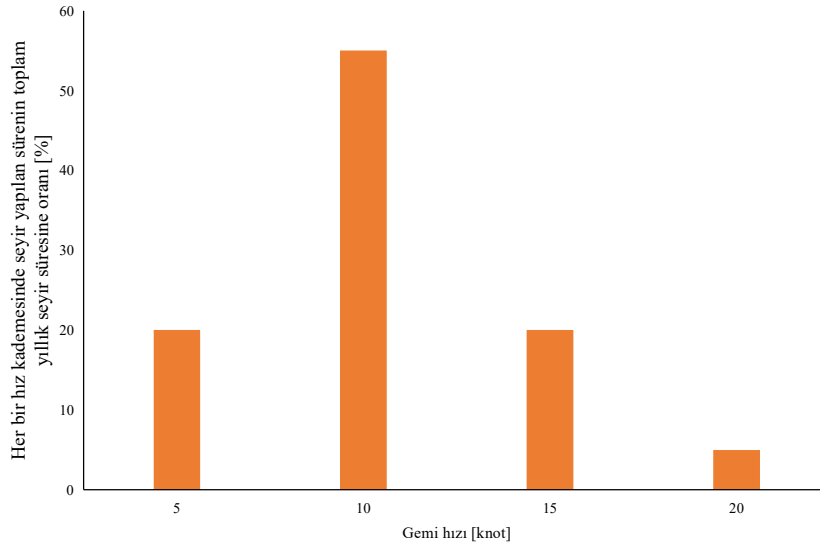
Fırkateyn tipi gemilerde kullanılan birleşik sevk sistemlerinde intikal hızları için farklı, daha yüksek hızlar için farklı makineler kullanılabilir (Hodge ve Mattick, 1996). Bu kullanım usulü sayesinde, yukarıda belirtilen önemli tasarım değişkenlerine olumlu katkı sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, jenerik gemiler için ihtiyaç duyulan görev profilleri fırkateyn için van Es’ten (2011) ve ADKG için Buckingham’dan (2011) uyarlanmış olup

Şekil 1.7 ve Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Yıllık seyir (görev) süresi fırkateyn için 3000 saat ve ADKG için 2000 saat olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.7 Jenerik fırkateynin görev profili [van Es’ten (2011) uyarlanmıştır]



Şekil 1.8 Jenerik ADKG’nin görev profili [Buckingham’dan (2011) uyarlanmıştır]

1.5 Elektrik Güç İhtiyacı

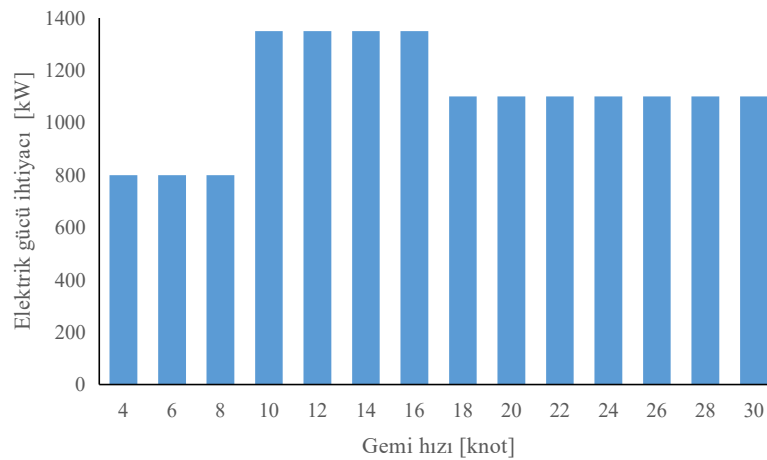
Elektrik kullanıcıları; genel kullanım ve servis sistemleri, savaş ve komuta kontrol sistemleri ile sevk elektrik motorlarıdır. Elektrik kullanıcıları, elektrik güç sisteminin özelliklerinin belirlenmesinde en önemli etkidir. Bu nedenle bu kullanıcıların elektrik güç ihtiyacının belirlenmesi/hesaplanması gerekmektedir. Bu

hesaplamayı yapabilmek maksadıyla muhtelif yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler; deneysel yöntemler, elektrik yük incelemesi (EPLA) ve benzetimdir (Woud ve Stapersma, 2003). EPLA en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde, gemilerin muhtelif çalışma durumları (demir, liman, intikal, harekât, acil) için kullanıcıların elektrik güç ihtiyacının hesaplaması yapılmaktadır (Naval Sea Systems Command [NAVSEA], 2012).

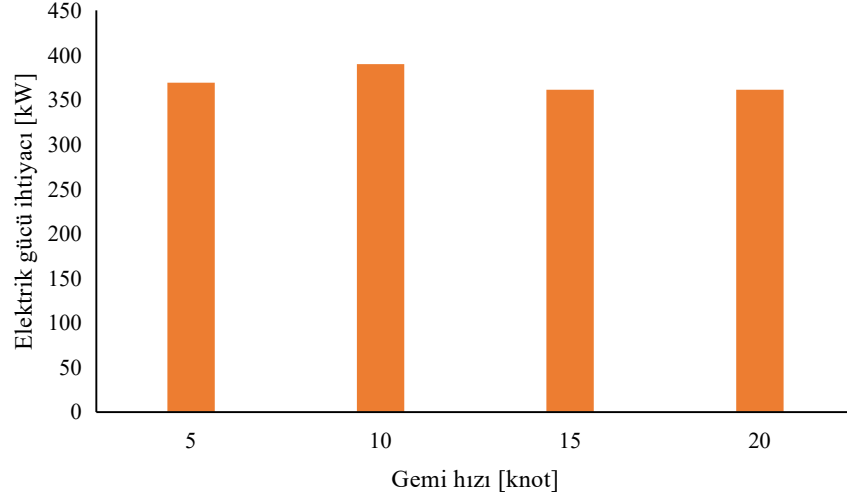
Benzetim, elektrik güç ihtiyacının hesaplamasında daha kesin sonuçlar verebilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Bu yöntemde, geminin kullanımı ile ilgili ayrıntılı bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında örnek alınan gemilerin, genel kullanım ve servis sistemleri ile savaş ve komuta kontrol sistemlerinin elektrik güç ihtiyacı verileri, fırkateyn için van Es (2011) ve ADKG için Smith'ten (2015) uyarlanmış olup sırasıyla Şekil 1.9 ve Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Dördüncü Bölüm'de önerilen elektrikli tahrikin kullanıldığı seçeneklerde yer alan sevk elektrik motorlarının ihtiyacı olan ilave elektrik gücü de bu şekillerdeki değerlere eklenmek suretiyle yine aynı bölümde ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bu şekillerde belirtilen güç ihtiyacı da dikkate alınarak, Dördüncü Bölüm'de önerilen her bir sevk sistemi için gereken üreteç seti özellikleri yine aynı bölümde incelenmiş ve sayıları belirlenmiştir.

Jenerik gemilerin, yıllık seyir süresi dışında kalan dönemlerinde, kıyıdan elektrik beslemesi aldığı ve bunun sonucu bu dönemlerde üreteçlerin çalıştırılmadığı kabulü yapılmıştır.



Şekil 1.9 Jenerik fırkateynin genel kullanım ve servis sistemleri ile savaş ve komuta kontrol sistemlerinin elektrik güç ihtiyacı [van Es'ten (2011) uyarlanmıştır]



Şekil 1.10 Jenerik ADKG'nin genel kullanım ve servis sistemleri ile savaş ve komuta kontrol sistemlerinin elektrik güç ihtiyacı [Smith'ten (2015) uyarlanmıştır]

1.6 Tezin Akışı, Kabuller ve Sınırlamalar

Başarılı ve karmaşık bir harp gemisinin tasarımı ve inşası doğası gereği zorlu bir süreçtir (Tudor ve Harrison, 2019). Deneyim ve beceriden bağımsız olarak, doğru yetenekleri bütçe ve zamanla dengelemek sürekli olarak önemli bir zorluk teşkil edecektir; bunların tümü risk olarak nitelendirilecek ve yönetilecektir. Askerî gemiler ait oldukları devletlerin birer toprak parçası ve egemenliğinin göstergesi olarak kabul görmektedir. Programları sırasında önemli ölçüde ulusal ve devlet denetimine tabi olmakta ve genellikle gemi inşa kapasitesi veya ulusal sanayi girişimleri gibi diğer ulusal stratejik yatırımları veya stratejileri desteklemek için kullanılmakta ve bunların tümü böyle bir programın karmaşıklığını arttırabilmektedir. Kara ve hava araçlarının tasarım süreçlerinde genel olarak prototipler geliştirilmekte ve üretilmekte, bu prototipler ile süreç devam ettirilmektedir. Prototiplerle yapılan tecrübelerde belirli bir aşamaya gelinmesinden ve belirli bir performans sağlanmasından sonra üretime geçilmektedir. Gemi programlarında ise, çok özel birkaç uygulama hariç, gemilerin genel performansı (manevra, hız, ivmelenme, atış vb.) ancak gemilerin üretimi tamamlandıktan sonra fiilen yapılabilmektedir. Bu husus da diğer araçlardan farklı olarak gemi tasarım süreçlerinin riskini, karmaşıklığını ve zorluğunu arttırmaktadır.

Çok sıkı isterler ve düzenlemelere tabi olan harp gemilerinin hayati önem taşıyan ve en önemli sistemi olan sevk sisteminin; yukarıda belirtilen risk, karmaşıklık ve zorlukları barındıran tasarım aşamasında yapılacak seçiminde, birçok ölçütün dikkate alınması ve bu ölçütlere istinaden seçenekler arasından en uygun sevk sisteminin seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

Ölçütlerin birbiri ile olan iç içe geçmiş ilişkisi, birbirine olan doğrudan veya dolaylı etkileri, birbiriyle çatışan farklı nicel veya nitel özellikleri; seçim sürecinin kontrolünü, uygulanabilirliğini ve sürdürülebilirliğini önemli ölçüde zorlaştırmaktadır; sağlıklı seçimin yapılamaması durumu ile karşı karşıya kalma olasılığı oluşabilmektedir.

“Tasarım Süreci” başlığı altında belirtildiği üzere, projeyi ve ömür devrini doğrudan etkileyen kararların, tasarım safhalarının çok erken dönemlerinde alınması, alınan kararlarda yapılacak değişikliklerin büyük zaman kaybına ve büyük maliyet artışına neden olması, belirli bir aşamadan sonra geri dönüşlerin mümkün olmaması, verilecek kararların ve seçimlerin önemini ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda, yukarıda belirtilen olumsuzlukları en aza indirmek ve karar vericilerin, nitel ölçütlerin yanında nicel ölçütler ile ilgili yaklaşımlarını da seçim sürecine dâhil edebilmek maksadıyla; insanın düşünme sistematığına yakın olan ve birçok farklı alanda kullanılabilecek; bulanık AHP ve yapay sinir ağlarından oluşan bir bütünleşik karar modeli önerilmiş ve gelecek dönemde yeni su üstü gemi inşa programlarının önemli bir bölümünü oluşturacağı değerlendirilen ve birçok kurumun kullanımına girmesi planlanan iki farklı tipte gemi üzerinde uygulaması yapılmıştır. Önerilen modelin uygulamasının sadece muharip platformlar ile sınırlı kalmayacağı, büyük risk barındıran ve yüksek maliyetlere sahip bu tür programlara da fayda sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının yukarıda belirtilen amacı doğrultusunda, önerilen modelin akış şeması tez çalışmasının ilgili bölümleri ile bütünleştirilerek Şekil 1.11’de gösterilmiştir. Bu kapsamda;

- Birinci bölümde, su üstü harp gemisi tasarımına etki eden hususlar ve bu tasarımın sevk ve elektrik güç sistemleri ile olan etkileşimi genel ve temel hatlarıyla tez çalışmasının kapsamına istinaden değerlendirilmiştir. Önerilen

yöntemin uygulanmasını gösterebilmek maksadıyla seçilen iki jenerik geminin özellikleri tanıtılmıştır.

- İkinci bölümde, harp gemileri için sevk ve elektrik güç sisteminin genel mimarileri incelenmiş ve jenerik gemiler için kullanılacak bileşenlerin ve makinelerin özellikleri açıklanmıştır.

- Üçüncü bölümde tekne-sevk makinesi-pervane uyumu kapsamında, gemi direncinden fren gücüne geçişin aşamaları ve yöntemleri ile makinelerin çalışma sınırlamaları incelenmiştir. Bu bölümde sevk gücü hesaplama yöntemi tanıtılmış ve jenerik gemilerin sevk gücü ihtiyacı hesaplanmıştır.

- Dördüncü bölümde, harp gemileri için sevk ve elektrik güç sistemi seçenekleri incelenmiş ve jenerik gemilerde kullanılmak üzere seçilen sistemlerin özellikleri açıklanmıştır.

- Beşinci bölümde, sevk sistemi seçim ölçütleri çözümlenmiş ve bu tez çalışmasında kullanılacak ölçütler belirlenmiş ve bu ölçütlerin hesaplama yöntemleri açıklanmıştır.

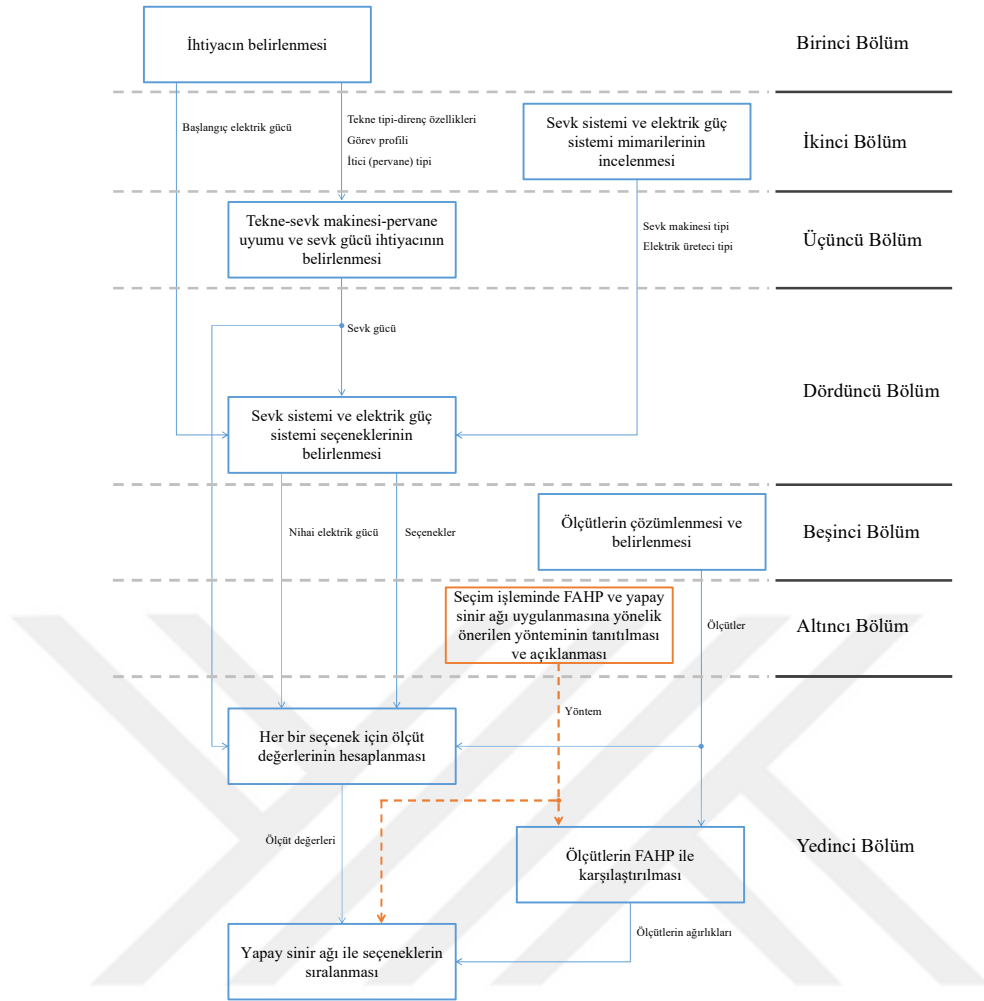
- Altıncı bölümde, dördüncü bölümde belirlenen seçeneklerden, gemilere en uygun olan seçeneğin seçiminin yapılabilmesi maksadıyla, bulanık AHP (fuzzy AHP-FAHP) ve yapay sinir ağları kullanılarak oluşturulan seçim modeli tanıtılmıştır.

- Yedinci bölümde, altıncı bölümde belirtilen model kullanılarak beşinci bölümde belirlenen ölçütlere istinaden dördüncü bölümde belirlenen seçeneklerin sıralaması yapılmıştır.

- Sekizinci bölümde, genel bir değerlendirme yapılarak tez çalışması sonuçlandırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamındaki tüm çalışmalar, açık/akademik/ulaşılabilir kaynaklara istinaden herhangi bir gizlilik içermeyen veriler kullanılarak yapılmıştır.

Bu tez çalışması, herhangi bir kurumla ilişkili olmayıp, herhangi bir kurumu da esas almamaktadır.



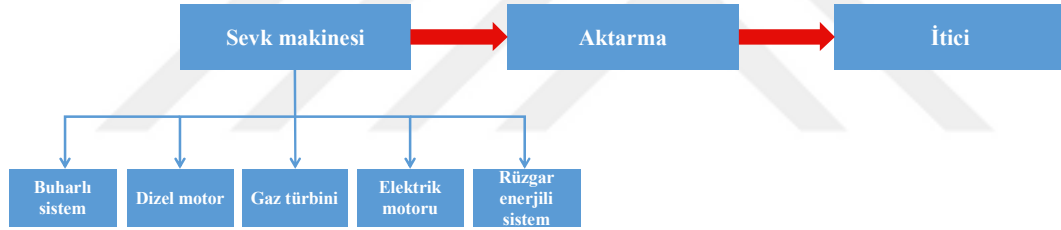
Şekil 1.11 Tez çalışmasında önerilen ve tez çalışmasının ilgili bölümleri ile bütünlleştirilmiş sevk ve elektrik güç sistemi seçim modeli

2 GEMİ SEVK VE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ BİLEŞENLERİ

Bir gemiyi hareket ettirmek, gemi üzerinde bulunan elektrik kullanıcılarını beslemek ve ısıtma sistemlerinde ısı üretmek için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu enerjinin, geminin mevcut imkânları ile sağlanması gerekmektedir. Genel olarak gemide kullanılabilecek enerji kaynakları kimyasal, rüzgâr, güneş ve çekirdeksel (nükleer) enerjidir. En çok kullanılan enerji kaynağı sıvı fosil yakıtta bulunan kimyasal enerjidir. Gemiler için enerji kavramı genellikle güç kavramı ile ilişkilendirilmekte ve nitelendirilmektedir.

2.1 Sevk Sistemi

Gemiyi istenen hızda hareket ettirmek amacıyla gereken itme, sevk sistemi tarafından üretilmektedir. Sevk sistemi bileşenleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sevk sistemi zinciri [Woud ve Stapersma’dan (2003) uyarlanmıştır]

2.1.1 Sevk Makinesi

Sevk makinesi, hareket için gerekli olan mekanik enerjiyi sağlamaktadır (Woud ve Stapersma, 2003). Isıl sevk makineleri (dizel motor, gaz türbini ve buharlı sistem) fosil yakıttaki kimyasal enerjiyi veya çekirdeksel enerjiyi önce ısı enerjisi ve müteakiben de mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Isıl enerjiye dönüşümün, doğrudan mekanik enerjiyi üreten makine içerisinde yapılması durumunda bu makineler içten yanmalı makine (dizel motor ve gaz türbini), makine dışarısında yapılması durumunda ise dıştan yanmalı makine (buhar türbini) olarak adlandırılmaktadır.

Elektrik motoru da sevk makinesi olarak kullanılabilir (Woud ve Stapersma, 2003). Bu makine, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir; ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi aşağıda açıklanan elektrik güç sistemi tarafından

sağlanmaktadır. Uçurtmalı, rotorlu ve yelkenli sistemler Şekil 2.1’de yer alan zincire ihtiyaç duymadan rüzgâr enerjisini doğrudan itmeye dönüştürmektedir.

2.1.1.1 Buharlı Sistem

Buharlı sistemde, kapalı bir çevrimde bir akışkanın (buharın) bir türbinde genişmesi sonucu mekanik enerji üretilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Buhar, sıvı fosil yakıtın kullanıldığı bir kazanda veya çekirdeksel bir reaktör tesisinde elde edilmektedir. Türbinin ürettiği enerji, sevk sistemini veya elektrik üreticini (turbo üreteç) tahrik etmek için kullanılabilir. Buharlı sistemlerin verimleri, dizel motorlara kıyasla daha düşüktür. Bu sistemler büyük hacimlidir, güç yoğunlukları düşüktür ve yüksek tedarik maliyetlerine sahiptir. Yukarıda belirtilen özellikleri nedeniyle LNG tankerleri dışında çok fazla ticari gemide kullanılmamaktadır. Askerî uygulamalarda ise buharlı sistemlerin, çekirdeksel reaktör ile birlikte uçak gemileri ve denizaltılarda kullanım alanı bulunmaktadır. Buharlı türbinler için ilk çekirdeksel reaktör uygulaması 1950’li yıllarda bir denizaltıya yapılmıştır (Skjong ve ark., 2016).

Yukarıda belirtilen olumsuz özellikleri ve bu tez çalışması kapsamında yer alan fırkateyn ve ADKG tipi gemilerin çağdaşlarında kullanım yerinin kalmaması nedenleriyle, buharlı sistemler bu tez çalışması kapsamına dâhil edilmemiştir.

2.1.1.2 Dizel Motor

Dizel motorlar, sıkıştırma ateşlemeli pistonlu içten yanmalı motorlardır (Woud ve Stapersma, 2003). Çalışma ilkelerine istinaden iki zamanlı ve dört zamanlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. 100 gros ton üzerindeki sivil gemilerin %96’sında dizel motorlar kullanılmaktadır (Haglund, 2008).

Dizel motorların başka bir gruplandırma ölçüsü de bir dakikadaki krankşaft devir sayılarıdır. Bu gruplandırmada kesin bir ayrım olmamakla birlikte muhtelif kaynaklardan derlenen bilgiler Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Düşük devirli motorların tamamına yakını iki zamanlı motorlardır (Watson, 1998). Büyük ticari gemilerin neredeyse tamamında düşük devirli iki zamanlı dizel motorlar kullanılmaktadır (Carlton, 2003; Watson, 1998). Bu motorlar diğer dizel motorlara kıyasla daha verimlidir ve bu motorlarda daha düşük kaliteli ve daha ucuz yakıt olan HFO yakılmaktadır. Bu motorların boyutları oldukça büyüktür (Watson, 1998). Pervaneleri verimli olarak kullanabilmeye yetecek düzeyde düşük olan

devirleri nedeniyle bu motorlar, devir düşürücüye ihtiyaç duyulmadan doğrudan pervaneye irtibatlandırılabilir. Çoğunlukla konteyner, dökme yük ve tankerlerde kullanılmaktadır. Genellikle dönüş yönleri değiştirilebildiğinden, müteakip kısımlarda incelenen, daha basit ve düşük maliyetli olan sabit hatveli pervanelerle (fixed pitch propeller-FPP) kullanılabilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003).

Tablo 2.1 Bir dakikadaki krankşaft devir sayılarına istinaden dizel motorların gruplandırılması

Kaynak Devir türü	Carlton (2003)	Watson (1998)	Stapersma (2000a)
Düşük devirli	75-200 rpm (700-6000 kW/silindir)	60-150 rpm	250 rpm <
Orta Devirli	500-1000 rpm (100-1000 kW/silindir)	450-800 rpm	400-800 rpm
Yüksek Devirli	1000-3000 rpm (40-400 kW/silindir)	1000-3000 rpm	>1000 rpm

Yük taşıyan daha küçük gemilerde, harp gemilerinde ve yolcu gemilerinde orta devirli dört zamanlı dizel motorlar kullanılmaktadır (Carlton, 2003). Bu motorlar daha düşük hacme ve ağırlığa sahiptir. Yüksek hızlı gemilerde (hızlı feribot, hızlı karakol gemisi, fırkateyn vb.) yüksek devirli dört zamanlı dizel motorlar tercih edilmektedir (Stapersma, 2000a). Orta ve yüksek devirli dizel motorlar, düşük devirli motorlara kıyasla daha düşük hacim, ağırlık ve birim güç başına tedarik maliyeti vb. üstünlükler sunmaktadır, bununla birlikte bu motorlar, iyi bir pervane verimi sağlayacak devirlerin çok üzerindeki devirlerde çalıştıklarından, çoğunlukla pervane şaftına devir düşürücülerle bağlanmaktadır (Ships' Machinery Committee, 1990). Bu motorların dönüş yönleri genellikle değiştirilemediğinden, müteakip kısımlarda incelenen, daha karmaşık ve yüksek maliyetli olan hatvesi kumanda edilebilir (değiştirilebilir) pervanelerle (controllable pitch propeller-CPP) kullanılabilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Daha düşük güç gerektiren uygulamalarda ise devir yönü değiştirilebilen devir düşürücülerle kullanılabilmektedir.

Dizel motorun verimi, buharlı sistemler ve gaz türbiniyle karşılaştırıldığında daha yüksektir; bu durum tasarım noktası için olduğu kadar kısmi yük için daha da belirgindir (Stapersma, 2000a). Dizel motorlar daha basit bir yapıya ve daha düşük

LCC'ye sahiptir (Woud ve Stapersma, 2003). Dizel motorların güç yoğunlukları özellikle gaz türbinlerine kıyasla daha düşüktür.

Yüksek hızlı dizel motorlar, harp gemileri için düşük ağırlık/güç oranları (yoğunluğu) nedeniyle tercih edilmektedir. (Watson, 1998).

Yüksek devirli dizel motorların, yukarıda belirtildiği üzere, dizel motorlar arasında en yüksek güç yoğunluğuna sahip olması nedeniyle, bu motorlar bu tez çalışması kapsamına dâhil edilmiştir.

2.1.1.3 Gaz Türbini

1940'ların sonlarında ve 1950'lerin başlarında çeşitli donanmalar, düşük ağırlık/güç oranına sahip olmaları, (buhar çevrimli sistemlere kıyasla) daha hızlı devreye alınabilmeleri ve daha az mürettebat sayısını gerektirebilecek olmaları nedeniyle gaz türbinlerinin sevk maksadıyla gemilerde kullanımını değerlendirmeye almaya başlamıştır (Hendry ve Zekas, 2010). 1970'lere gelindiğinde, gaz türbini sahip olduğu daha yüksek verim sayesinde, o dönemde kullanılmakta olan buharlı sistemlerin yerine bir seçenek olmaya başlamıştır (Woud ve Stapersma, 2003). Ayrıca buharlı sistemlere kıyasla daha yüksek güvenilirlik ve daha kolay kumanda edilebilirlik özellikleri sayesinde buharlı sistemlere üstünlük sağlamıştır. Yukarıda belirtildiği üzere en çok kullanılan makine olan dizel motorlarla kıyaslandığında gaz türbinlerinin en büyük üstünlüğü, birim hacim ve kütle başına güç yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır. Bu üstünlük gaz türbinlerinin askerî platformlar için seçilmesinin başlıca nedeni olmuştur (Lim ve Harvey, 2016). Gaz türbinleri özellikle fırkateynlerde kullanım alanı bulmuştur. Askerî platformlar dışında, yüksek hızlı büyük feribotlarda ve kruvaziyerlerde kullanılmaya başlanmıştır (Woud ve Stapersma, 2003). Denizcilik uygulamaları için kullanılmakta olan gaz türbinleri genellikle hava araçlarının motorlarının dönüştürülmüş türevleridir (McCoy, 2015; Woodyard, 2009).

Şaft yataklarının aşırı yüke maruz kalmasını engellemek ve pervaneyi daha verimli kullanabilmek maksadıyla yüksek devirli dizel motorlarda olduğu şekilde gaz türbinlerinin de pervanelere devir düşürücüyle irtibatlanması gerekmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Gaz türbinlerinin dönüş yönleri genellikle değiştirilemediğinden, yüksek devirli dizel motorlarda da olduğu şekilde, müteakip

kısımlarda incelenen, daha karmaşık ve yüksek maliyetli olan CPP'yle kullanılabilmektedir.

Gaz türbinleri, düşük yapısal gürültüye ve NO_x salımlara sahiptir (Calabrese, 2000). Dizel motorlara kıyasla yakıt tüketimleri yüksektir (verimleri düşüktür) ve daha kaliteli yakıta ihtiyaç duymaktadır (Woud ve Stapersma, 2003).

Her ne kadar yüksek yakıt tüketimine sahip olsalar da gaz türbinleri çok yüksek hız kademeleri için kullanıldıklarından ve Birinci Bölüm'de belirtildiği üzere bu hız kademelerine nadiren çıkıldığından, gaz türbinlerinin yakıt tüketimi nedeniyle sahip oldukları mahzurların önemi azalmaktadır (Watson, 1998).

Isıl makineler arasında en yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları ve bu tez çalışmasında örnek alınan fırkateyn tipi gemilerde, yüksek hız kademelerinde görece daha kısa süreler için kullanılmaları hususları dikkate alındığında gaz türbinleri bu tez çalışması kapsamına jenerik fırkateyn için dâhil edilmiştir.

2.1.1.4 Elektrik Motoru

Elektrik motoru, geminin elektrik güç sisteminden sağlanan elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Elektrik motorlarında dönüş yönü basitçe değiştirilebildiğinden, orta ve yüksek devirli dizel motorlarının ve gaz türbinlerinin çoğunda zorunlu kullanımı olan CPP yerine daha basit yapılı, daha verimli ve maliyeti düşük FPP kullanılabilmektedir (Doerry, 2015).

20. yüzyılın başlarından itibaren kullanılmaya başlanan elektrik motorları, ilk dönemlerinde doğru akım (DC) ile tahrik edilirken, daha verimli olan dalgalı akım (AC) sürücülerinin geliştirilmesiyle AC ile beslenebilen motorlar daha çok kullanılır olmuştur (Reusser ve ark., 2020). Kalıcı (daimî) mıknatıslı senkron motorların (permanent magnet synchronous machine-PMSM) ve yüksek verimli asenkron motorların geliştirilmesi, DC motor sürücülerinin uygulama aralığını azaltmıştır. Sevk makinesi olarak kullanılabilen çok sayıda motor tipi mevcuttur; Tablo 2.2'de bu motorlardan bir kısmının özellikleri özetlenmiştir.

Teknolojilerinin kullanıma hazır olması ve yüksek güç yoğunluğu etkenleri dikkate alındığında; en düşük maliyete sahip olmamalarına rağmen PMSM'ler, sevk motoru uygulamaları için en uygun tercih olmaktadır (Castles ve ark., 2009).

PMSM'nin basit yapısı, daha kolay bakım ve daha düşük işletme maliyetleriyle birlikte daha fazla güvenilirlik ve dayanıklılık sunmaktadır (Thongam ve ark., 2013). Kalıcı mıknatıs teknolojisinin tam ve kısmi yüklerde sunduğu yüksek verimlilik performansı, geleneksel makinelerle göre önemli ölçüde enerji tasarrufu da sağlayabilmektedir.

Askerî uygulamalarda, maliyetlerden ziyade güç yoğunluğu daha önemli bir seçim etkeni olduğundan, yüksek güç yoğunluğuna sahip motorlar tercih edilmektedir (McCoy, 2002 ve Thongam ve ark., 2013). PMSM, sahip olduğu yapı sayesinde bu ihtiyacı karşılamaktadır.

Sevk elektrik motorları, devir düşürücüye gerek olmadan itici şaftına doğrudan bağlanabilmektedir. Başka bir motor uygulamasında ise motor bir “pod” içerisine konulmakta ve bunun sonucu hem sevk sisteminin hem de dümen tertibatının hacimsel olarak azaltılması sağlanmaktadır (Thongam ve ark., 2013).

Muhtelif çağdaş su üstü harp gemilerinde [İtalyan FREMM sınıfı fırkateyn (Sulligoi ve ark., 2012) ve FFX-II sınıfı fırkateyn (Widmann ve ark., 2019)] kullanılmaları ve yukarıda belirtilen üstünlükleri nedeniyle bu tez çalışmasında da PMSM’ler sevk elektrik motoru olarak tercih edilmiştir.

2.1.1.5 Rüzgâr Enerjili Sistemler

- **Flettner Rotor**

Klasik yelkenlere alternatif olarak 1920’lerin başında Anton Flettner tarafından önerilmiş olan bu “yelken” türü rotorlar Magnus ilkesi ile çalışmakta ve rüzgâr enerjisini doğrudan itmeye dönüştürmektedir (Traut ve ark., 2014 ve Pan ve ark., 2021). Rotorlar için ilave güverte alanına, geminin uygun en üst güverte kısımlarına kurulumunun yapılmasına ve rotorun irtibatlandırılacağı güvertenin güçlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, Magnus etkisini oluşturmak için rotorun döndürülmesi gerektiğinden, bu döndürme işlemi için doğrudan rotora bağlı bir donanımın gemiye kurulumu gerekmektedir. Tüm bu hususlar da geminin stabilitesini olumsuz etkilemektedir.

- **Uçurtma**

Uçurtma, geminin önünde yüksek irtifada “uçarak” rüzgâr gücünü, gemiyi halatlarla çekecek bir çekme kuvvetine dönüştürmektedir (Traut ve ark., 2014).

Tablo 2.2 Sevk makinesi olarak kullanılan muhtelif elektrik motorları ve özellikleri [Thongam ve arkadaşlarından (2013) uyarlanmıştır]

Motor tipi Nitelikler	Fırçalı DC motor	İndüksiyon motor	Sargılı rotorlu senkron motor (WRSM)	Daimi mıknatıslı senkron motor (PMSM)	Açık uçlu çoklu sargılı motor	Çift beslemeli indüksiyon motor (DFIM)	Senkron Relüktans motor (SynRM)
Üstünlükler	Herhangi bir yük durumunda azami tork Kolay tork ve yük kontrolü	Basit ve dayanıklı yapı Neredeyse bakıma ihtiyaç yok Geniş yük aralığı	Ayarlanabilir güç faktörü Endüksiyon motorlara kıyasla daha iyi şok dayanımı sunan daha büyük hava boşluğu	Yüksek güç yoğunluğu 0 devirde azami tork	Geliştirilmiş tork imkânı Yüksek yedeklenebilirlik	Senkron altı ve üstü bölgelerde çalışma imkânı Daha küçük dönüştürücü gereksinimi	Ayrı bir uyarım veya sabit mıknatıslara ihtiyacın olmaması Basit rotor tasarımı
Mahzurlar	Komütatör ve fırçaların oluşturduğu karmaşıklık Belirgin yüksek bakım maliyeti Komütatör yalıtımı	Kısmi yükte düşük verim Yüke bağlı değişken kayma Kısmi yükte düşük güç faktörü	Ayrı uyarım sargıları gerekliliği Kayma halkası ve fırçaların oluşturduğu karmaşıklık Belirgin yüksek bakım maliyeti	Isıl hassasiyet Yüksek maliyetli mıknatıslar	İlave güç dönüştürücü ihtiyacı 0 dizi akımı indüklemeye olasılığı	Kayma halkası ve fırçaların oluşturduğu karmaşıklık Rotor akımı nedeniyle düşük verim	Rotor tasarımına bağlı güç faktörü Sadece (yüksek güç uygulamaları için daha büyük hacme neden olan) relüktans tork bileşeni
Uygulanan platformlar	Type 23 sınıfı fırkateyn 209 sınıfı denizaltı	Buzkıran LNG tankeri	Albions sınıfı LPD Carnival cruise lines Mistral sınıfı LHD	212 ve Scorpene sınıfı denizaltı İtalyan FREMM sınıfı fırkateyn (Sulligoi ve ark., 2012) FFX-II sınıfı fırkateyn (Widmann ve ark., 2019)	Type 45 sınıfı destroyer Queen Elizabeth Invincible sınıfı uçak gemisi	Type 26 sınıfı fırkateyn	---

Gemilerde uçurtma kullanımının ana teknik zorlukları arasında, uçurtmanın uçuşunun otomatik kontrolü, uçurtmanın verimli bir bölgede uçuşmasının sağlanması, fırlatma ve geri toplama işlemlerini gemi çalışma koşullarını dikkate alarak yönetilmesi yer almaktadır (Pan ve ark., 2021).

Rüzgâr enerjisini itmeye çeviren sistemler, gemi tasarımına ilave karmaşıklık katmaktadır (Pan ve ark., 2021). Yelken alanının artmasıyla itme de artmakta, fakat bununla birlikte geminin yalpa ve savrulma hareketlerinde de artış olmaktadır.

Azami performansın elde edilebilmesi maksadıyla gemi üst yapılarında çok fazla değişiklik yapılmasına ve karmaşık kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulması, rüzgâr destekli sistemlerin uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır (Nuchturee ve ark., 2020). Yukarıda belirtilen rüzgâr enerjisini kullanan sistemler dışında geleneksel yelkenli sistemler veya bunlardan türetilmiş farklı yapıda muhtelif yelkenler de sevk için kullanılmaktadır.

Rüzgâr enerjisi ile çalışan tüm sistemlerin rüzgârın özelliklerine (yön, şiddet vb.) bağlı kalması nedeniyle ancak sevk veya elektrik güç sistemine yardımcı bir donanım olarak kullanılabileceği; bununla birlikte harp gemilerinin yapısal görünmezliğine olumsuz etkisi olacağı ve bunun sonucu olarak hem gözle hem de radar benzeri algılayıcılarla daha kolay tespit edilmesine neden olunacağı ve gemilerin kendi algılayıcı ve silah sistemlerinin kullanımının kısıtlanacağı dikkate alındığında; bu olumsuz hususların bir harp gemisi için hayati öneme haiz olması nedeniyle bu sistemlerin bu tip gemilerde kullanımının uygun olmayacağı değerlendirilmektedir (Webster ve ark., 2007).

2.1.2 İtici (Pervane)

Pervaneler, suyun akışına belirli bir hücum açısıyla dönen kanatlarda oluşan kaldırma kuvveti vasıtasıyla itme üretmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Genel olarak hatvesi sabit pervaneler (FPP) ve hatvesi kumanda edilebilir (değiştirilebilir) pervaneler (CPP) olmak üzere iki tipte kullanılmaktadır. FPP her ne kadar sabit hatveli olarak adlandırılrsa da hatve kanat boyunca değişken olup kanat, göbeğe sabitlenmektedir. Bu pervanede itme kuvveti pervanenin devriyle ayarlanmaktadır. FPP'nin dönüş yönü, sevk makinesinin dönüş yönü değiştirilerek veya devir düşürücü üzerinde özel donanım kullanılmak suretiyle shaftın dönüş yönü

değiştirilerek yapılmaktadır. CPP'nin tüm kanatları, kanat göbeği üzerinde döndürülebilmekte ve bunun sonucu hatve de değiştirilebilmektedir.

CPP kanatlarını döndüren aksama genellikle (hidrolik) yağ basıncıyla veya hava basıncıyla kumanda edilebilmektedir (Schneekluth ve Bertram, 1998). Bu aksamın pervane göbeğinde kalan kısmı, göbeğin büyümesine (Doerry, 2015), bu büyüme de pervane veriminin genel olarak yaklaşık %2 oranında düşmesine neden olmaktadır (Veneri ve ark., 2012; Watson, 1998). Dönüş yönü değiştirilemeyen sevk makinelerinin kullanıldığı uygulamalarda, ileri/tornistan yol için pervane yönünün değiştirilmeden pervanenin kanatlarının değiştirilmesi suretiyle istenen yönde itmenin sağlanması maksadıyla CPP'nin kullanılması gerekmektedir; bu özelliği ile CPP, su üstü harp gemilerinde en çok kullanılan pervane tipi olmuştur (Doerry, 2015). CPP ayrıca daha hızlı durma imkânı vermektedir. CPP, FPP'ye kıyasla daha gürültülü çalışmaktadır. CPP kanatlarının birbirine temas etmeden dönebilmesi gerekmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). CPP yukarıda belirtilen kumanda sistemi nedeniyle daha karmaşık bir yapıya sahiptir, daha maliyetlidir ve kavitasyona daha yatkındır.

CPP, tasarım noktası dışında sabit devirde kullanıldığında FPP'ye kıyasla daha düşük verime sahip olmaktadır (ABS, t.y.). Bununla birlikte; tasarım noktası dışında, pervane devri ile hatve açısı uygun şekilde ayarlandığında CPP, FPP'den daha iyi performans verebilmektedir.

CPP, farklı hız kademeleri için farklı ısı sevk makinelerinin kullanıldığı fırkateyn benzeri gemilerde, intikal hızlarında kullanılan makinenin FPP kullanımından kaynaklanacak aşırı torka maruz kalmasını engellemek için de tercih edilebilmektedir (Watson, 1998). Dizel motorların izin verilen en düşük devirleri azami devirlerinin %25-%35'i arasında değiştiğinden, geminin azami hızı da yüksek kalabilmektedir. Bu durum da özellikle manevra için gemi hızının çok yüksek olmasına neden olmaktadır; CPP kullanımı bu olumsuzluğu önemli oranda iyileştirebilmektedir.

İki veya daha fazla pervaneye sahip olan gemilerin tüm şaftlarının kullanılmadığı durumlarının da tasarım esnasında dikkate alınması gerekmektedir. Bu tür gemilerin tasarımı genel olarak tüm şaftlar aynı anda kullanılacak şekilde yapılmaktadır; bununla birlikte, bu gemilerin daha az sayıda pervane ile de seyir

yapma imkânı bulunmaktadır (Woud, 2000). FPP’li sevk sistemlerinde devrede olmayan pervanenin şaftının kilitlenmesi durumunda ilave direnç oluşacaktır. Bu direnç, pervane serbest olarak dönmeye bırakıldığı durumlarda kısmen azalacak ve fakat yine de dirençte görece düşük ama önemli bir artış oluşacaktır; bu durumda direnç artışı %20-%25 oranlarına çıkabilecektir. Bu artış, “feather” olarak adlandırılan ve pervane açısını akışa paralel olacak şekilde ayarlama kabiliyeti olan “featherable CPP (FCPP)” ile en aza indirilebilecektir. Çift şafta sahip gemilerde bir şaftın kullanılmaması durumunda, kullanımda olan pervanenin “yenmesi” gereken direnç iki katına çıkacak ve ayrıca yukarıda belirtilen kullanılmayan şaft hattının direnci de bu direnç artışına eklenecektir.

Su üstü harp gemilerinin torpido ve güdümlü/güdümsüz mermilerden kaçınmada hayati olan yüksek manevra kabiliyetinin (Watson, 1998) kazandırılması maksadıyla çift pervaneli gemilerde pervanelerin dışa doğru dönmesi gerekmektedir (Lawrance, 2003). Bununla birlikte 2. Dünya Savaşı esnasında Avustralya’da, 50’den fazla korvetin pervaneleri içe dönecek şekilde inşa edilmiştir; bunun sebebinin daha yüksek hızlar elde edilmesi öngörüsü olduğu belirtilmiştir.

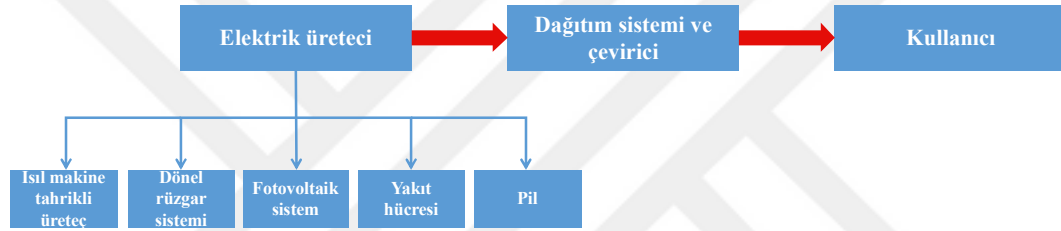
2.1.3 Aktarma

Aktarma bileşeni, sevk makinesi tarafından üretilen mekanik enerjiyi, bir şaft vasıtasıyla doğrudan veya devir düşürücü kullanmak suretiyle iticiye ve itici tarafından üretilen itmeyi gemi gövdesine iletmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Aktarma bileşeni genel olarak, (kullanıldıysa) devir düşürücü, şaft, şaft yatakları ve itme yatağından oluşmaktadır. Devir düşürücü vasıtasıyla genelde güç yoğun ve maliyeti düşük yüksek devirli ısı sevk makinelerin kullanımına imkân sağlamaktadır; bununla birlikte devir düşürücü kullanımı sevk sisteminin hacmini, ağırlığını ve maliyetini arttırmaktadır. Çeşitli sebeplerle sevk gücünün bölünmesi zorunluluğunun olması durumunda, farklı sevk makinelerinin aynı şafta irtibatlandırılması maksadıyla devir düşürücüler kullanılabilir. Sevk gücünün şaft başına muhtelif sebeplerle farklı sevk makinelerinden karşılanması zorunluluğu durumunda da devir düşürücüler kullanılabilir. Bu durumda, farklı gemi hızları için farklı sevk makinelerinden “ve” veya “veya” birleşimleri oluşturulabilir; bu birleşik sevk sistemleri, Dördüncü Bölüm’de incelenmiştir.

Şaft, sevk makinesini veya (kullanıldıysa) devir düşürücüyü iticiye irtibatlandırmaktadır. Şaft yatakları, şaftın ağırlığını desteklemektedir (Woud ve Stapersma, 2003). İtme yatağı, iticinin sağladığı itmeyi, gemi gövdesine aktararak geminin hareket etmesini sağlamaktadır. Podlu sistemlerde elektrik motoru doğrudan iticiye bağlı olduğundan şaft ve şaft yataklarına ihtiyaç kalmamaktadır.

2.2 Elektrik Güç Sistemi

Gemide ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi, elektrik güç sistemi tarafından üretilmekte ve dağıtılmaktadır. Bu sistemin bileşenleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Üretilen elektrik enerjisi, Şekil 2.2’de gösterildiği üzere dağıtım sistemi ve çevirici bileşenleri vasıtasıyla kullanıcılara ulaştırılmaktadır.



Şekil 2.2 Elektrik güç sistemi zinciri [Woud ve Stapersma’dan (2003) uyarlanmıştır]

Gemide kullanım (ısınma, sıcak su üretimi, yakıtın ısıtılması vb.) için gereken ısı enerjisi, geleneksel ticari gemilerde kazanlarda üretilmektedir, ancak harp gemilerinde ihtiyaç duyulan ısı için; ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri ve elektrikli tatlı su ısıtıcıları kullanılmaktadır (Cin ve Çelebi, 2021b); HVAC sistemi ve ısıtıcıların elektrik enerjisi ihtiyacı, gemi elektrik güç sisteminden karşılandığından, bu tez çalışmasına kazanlar dâhil edilmemiştir.

2.2.1 Elektrik Üretici

Isıl makineler fosil yakıttaki kimyasal enerjiyi veya çekirdeksel enerjiyi, dönel rüzgâr sistemleri, rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye; elektrik üretici ise bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Yakıt hücreleri ve fotovoltaik sistemler de farklı birer elektrik üretici türüdür. Yakıt hücreleri, yakıttaki kimyasal enerjiyi elektrokimyasal dönüşüm vasıtasıyla doğrudan elektrik enerjisine (Oh ve ark, 2023), fotovoltaik sistemler de güneş enerjisini doğrudan elektrik

enerjisine dönüştürmektedir (Jeong ve ark., 2022). Yukarıda belirtilen kaynaklarda üretilen elektrik enerjisi pillerde depolanabilmektedir.

2.2.1.1 Yakıt Hücresi

Yakıt hücreleri genel olarak daha yüksek verim ve güvenilirliğe, daha düşük gürültü, titreşim ve bakım maliyetlerine sahiptir (Pan ve ark., 2021). Verimlerin %65'e çıkabileceği bildirilmiştir (Shih ve ark., 2014). Gemilerde kurulumuna yönelik güvenlik hususları (patlama, havalandırma, yüksek basınç altında depolama vb.) hassasiyet teşkil etmektedir (van Biert ve ark., 2016). Mevcut yakıt hücreli sistemler, geleneksel üreteçlere kıyasla daha yüksek maliyetlidir. Sistemlerin, dinamik yük değişimlerine verdikleri cevap oldukça yetersiz kalmaktadır (Pan ve ark., 2021).

En verimli yakıt hücreleri doğrudan hidrojenle çalışan hücrelerdir (van Biert ve ark., 2016). Başka bir yakıt tipi kullanmak için ihtiyaç duyulan işleme sistemleri, ağırlık ve maliyeti arttırmakta, ayrıca hacimleri büyütmektedir. Denizcilik sektöründe en çok kullanılmakta olan sıvı fosil yakıt doğrudan yakıt hücresinde kullanılamamaktadır (Nuchturee ve ark., 2020). Dizel yakıtın uzun karbon zinciri nedeniyle yakıt hücresinde kullanılabilir hâle getirilmesi teknik karmaşıklığı çok yüksek bir işlemdir. Bu zorluklar nedeniyle, dizel yakıt, yakıt hücresi sistemleri için uygun olmayan bir yakıt olarak kabul edilmektedir (van Biert ve ark., 2016).

Yukarıda belirtilen tespitler ve ayrıca; dizel yakıt haricinde önerilen hidrojen, metanol, dimetil eter, amonyak, doğal gaz (van Biert ve ark., 2016) yakıt tipleri incelendiğinde; bu yakıtların harp gemilerinde depolanmasının emniyet bakımından taşıdığı risk, bu yakıtların harekât ortamında hem devamlılık hem de emniyet açısından denizde ikmâlinin sağlanmasındaki risk ve karada bu yakıtlar için kurulması gereken ikmâl destek altyapısının kurulmasındaki zorluk (Reusser ve ark., 2020) nedenleriyle de bu yakıtların harp gemilerinde kullanımının uygun ve emniyetli olmadığı değerlendirilmektedir.

2.2.1.2 Fotovoltaik (Güneş Enerjisini Kullanan) Sistem

Fotovoltaik işlem, ışıktan doğrudan elektrik enerjisi elde edilmesini veya güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürülmesini tanımlamaktadır (Jeong ve ark., 2022). Bu dönüşüm fotovoltaik paneller vasıtasıyla yapılabilmektedir (Veneri ve ark., 2012). Bu panellerden enerji üretimi; geminin bulunduğu konuma, tarihe

(takvim gününe), yerel zamana, zaman dilimine/bölgesine ve gemi hareketlerine bağlı kalmaktadır (Lan ve ark., 2015 ve Wen ve ark., 2016). Panellerin deniz ortamına maruz kalması nedeniyle bakım maliyetleri artmaktadır (Veneri ve ark., 2012). Ayrıca panellerin kapasiteleri düşüktür ve geniş düzlemsel yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır (Nuchturee ve ark., 2020 ve Veneri ve ark., 2012). Harp gemilerinin görev yaptıkları değişken sahalar, esnek görev profilleri ve yapısal özelliklerinin, panellerin kurulumuna çok uygun olmaması nedeniyle, bu panellerin harp gemilerinde kullanımının uygun olmayacağı değerlendirilmektedir.

2.2.1.3 Dönel Rüzgâr Sistemi (Rüzgâr Türbini)

Bu sistemlerde rüzgâr, bir üretece bağlı olan yatay türbinleri (horizontal axis wind turbine-HAWT) veya dikey türbinleri (vertical axis wind turbine-VAWT) (pervaneyi) döndürmektedir (Pan ve ark., 2021). Üreteç, türbinlerin sağladığı mekanik (hareket) enerjiyi yukarıda açıklandığı şekilde elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Rüzgârın kuvvetine karşılık bu türbinlerin gemi bünyesine bağlandıkları yerlerin kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu sistemlerin stabiliteye olan olumsuz etkilerinin de tasarım aşamasında dikkate alınması önem teşkil etmektedir. Uygun rüzgâr koşullarında türbinli sistemler %16'ya kadar yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir (Nuchturee ve ark., 2020). Yukarıda belirtilen rüzgâr enerjisini kullanan sistemler dışında geleneksel yelkenli sistemler veya bunlardan türetilmiş muhtelif farklı yapıda yelkenler de kullanılmaktadır.

Bu bölümün “Sevk Sistemi” başlığı altında rüzgâr sistemi ile ilgili belirtilen hususlar ve yukarıda belirtilen olumsuz özellikleri nedeniyle, rüzgâr sistemlerinin elektrik üretmek maksadıyla jenerik gemilerde kullanılmasının uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

Rüzgâr ve güneş enerjisi kaynaklarının kullanımı, bunların uygulanacakları gemilerin özelliklerine bağlıdır (Bouman ve ark., 2017). Gelecekte, rüzgâr enerjisinin kullanımının yüksek, güneş enerjisinin kullanımının ise daha düşük olacağı beklenmektedir. Bu tür enerjilerin kullanımı daha çok küçük gemilerle sınırlı kalmaktadır.

2.2.1.4 Pil

Yukarıda belirtilen sistemler vasıtasıyla, rüzgâr veya güneş enerjisinden veya yakıt hücreleri kullanılarak kimyasal enerjiden üretilen elektrik enerjisi doğrudan

geminin elektrik güç sistemine verilebilmekte veya pillerde depolanabilmektedir. Pillerde depolanan bu enerji, ihtiyaç duyulduğunda kullanıcılara dağıtılabilmektedir.

Chin ve arkadaşları (2022) tarafından yedi pil türünün denizcilik uygulamalarında kullanımı ile ilgili yapılan çalışmada, lityum pillerin, diğer pillere kıyasla enerji yoğunluğu, ömür ve verim bakımından daha üstün olduğu ve taşınabilir cihazlar ile kara araçlarında kullanıldığı şekilde birçok uygulamada kullanıldığı, bununla birlikte denizcilik, uzay ve askerî alanda daha yavaş uygulama imkânı buldukları belirtilmiştir. Modern lityum iyon piller, yaygın olarak kullanılan kurşun-asit pillerden daha hafif olmasına rağmen, pil sisteminin ağırlığı, hacmi ve maliyeti hâlihazırda endişe verici faktörlerdir. Denizcilik uygulamalarında pilin kullanımı ile ilgili en uygun yaklaşım elektrik enerjisi ihtiyacının belirli durumlarda kısmi olarak karşılanmasıdır; pil, öngörülemeyen durumları desteklemek ve “tepe yükü tıraşlama (peak load shaving)” işlemi maksadıyla kullanılabilecektir.

Her ne kadar bazı pil türleri ümit verici özelliklere sahip olsa da denizcilikte kullanılacak pillerin, kara aracı uygulamalarında kullanılan pillere kıyasla sahip olması gereken daha yüksek gereklilikleri (yangın algılama, yalıtım gereksinimleri, soğutma ve yangınla mücadele donanımı vb.), ağırlık ve maliyette önemli bir artışa neden olmaktadır (Chin ve ark., 2022).

Kullanım ömrü, pilin gemide kullanılmasıyla ilgili önemli diğer bir etkidir (Skjong ve ark., 2016). Pilin hızlı şarj edilmesi ve boşaltılması, kayıp olarak görülebilecek çok fazla ısı üretmekte ve pilin ömrü üzerinde kritik etkiye sahip olabilmektedir. Dolayısıyla, pilin yakıt tüketimini azaltarak kurulum maliyetlerini geri ödemeyi başaramadan pil ömrünün bitmesi şeklinde bir sonuçla karşılaşılabilir.

Blokland ve arkadaşları (2019), lityum-iyon pillerin askerî platformlarda kullanımı ile ilgili olarak yukarıda belirtilen aşırı dolum (şarj), aşırı ısınma vb. önemli güvenlik sorunlarına dikkat çekmişlerdir.

Çok yüksek ağırlık gereklilikleri nedeniyle, pillerin gemilerde kullanılabilirliği sınırlı kalmaktadır; 2000 kW kullanarak 10 gün seyir yapan bir gemi, yaklaşık 2000 tonluk bir pil paketinin kurulumunu gerektirmektedir (van de Ketterij, 2018).

Elektrik üreten muhtelif sistemlerin (üreteçlerin) yukarıda belirtilen mahzurları nedeniyle, bu tez çalışmasında elektrik gücü üreten cihaz olarak kullanılmak üzere ısı makine (dizel motor veya gaz türbini) tahrikli üreteç (jeneratör) tercih edilmiştir. Bu ısı makine ve üreteç birleşimi “üreteç seti (ÜS)” olarak adlandırılmıştır.

2.2.2 Dağıtım Sistemi ve Çevirici

Elektrik üreteçlerinde üretilen elektrik enerjisi dağıtım sistemi vasıtasıyla son kullanıcılara ulaştırılmaktadır. Sevk elektrik motorlarının hız kontrolünün yapılabilmesi maksadıyla frekans ve gerilimi uygun değerlere dönüştüren çeviriciler kullanılmaktadır (Woud ve Stapersma, 2003).

2.2.3 Kullanıcı

Elektrik kullanıcıları; genel kullanım ve servis sistemleri, savaş ve komuta kontrol sistemleri ile sevk elektrik motorlarıdır.

3

TEKNE-SEVK MAKİNESİ-PERVANE UYUMU

Gemiye istenen hızda hareket ettirmek amacıyla gereken itme kuvveti, sevk sistemi tarafından üretilmektedir. Bu kuvvetin sağlanabilmesi için sevk sisteminin, geminin akışkan (su ve hava) içinde hareket ederken oluşturduğu direnç kuvvetini yenmesi gerekmektedir.

Direnç kuvveti, muhtelif alt bileşenlerden oluşmakla birlikte (MAN ES, 2018; Roh ve Lee, 2018), bu alt bileşenlerin gruplandırılması ile ilgili kesin bir uzlaşma bulunmamaktadır. Bu bileşenler birbirini etkilemekte ve çoğunun ayrı ölçümleri mümkün olamamaktadır (Roh ve Lee, 2018).

Direnç tahmini için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Roh ve Lee, 2018). Geleneksel ve ölçünlü seri yöntemleri, bir dizi fonksiyonla direnci tahmin eden çözümlemeli yöntemlerdir. Sayısal yöntemler, muhtelif denklemler kullanarak direnci sayısal olarak tahmin eden hesaplamalı yöntemlerdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) sayısal yöntemlerden biridir. Deneysel yöntemlerle, model testlerinden elde edilen veriler kullanılarak direnç tahmin edilmektedir. Sayımlamalı yöntemler, birçok direnç modeli testinden elde edilen verilerin bağlanım çözümlemesiyle elde edilen bir kısım katsayı dâhil olmak üzere deneysel denklemler kullanarak direnci tahmin etmektedir.

Tam ölçekli bir geminin direnci doğrudan ölçülemediğinden, geminin direncine ilişkin veriler, zaman ve maliyet gerektiren model testlerinden elde edilmektedir (Roh ve Lee, 2018). Bununla birlikte, erken tasarım aşamalarında model sağlanamamaktadır. Bu aşamalarda, sayımlamalı yöntemlerin kabul edilebilir sonuçlar verebilecekleri bilindiğinden, bu yöntemler birçok tasarımcı tarafından kullanılmaktadır.

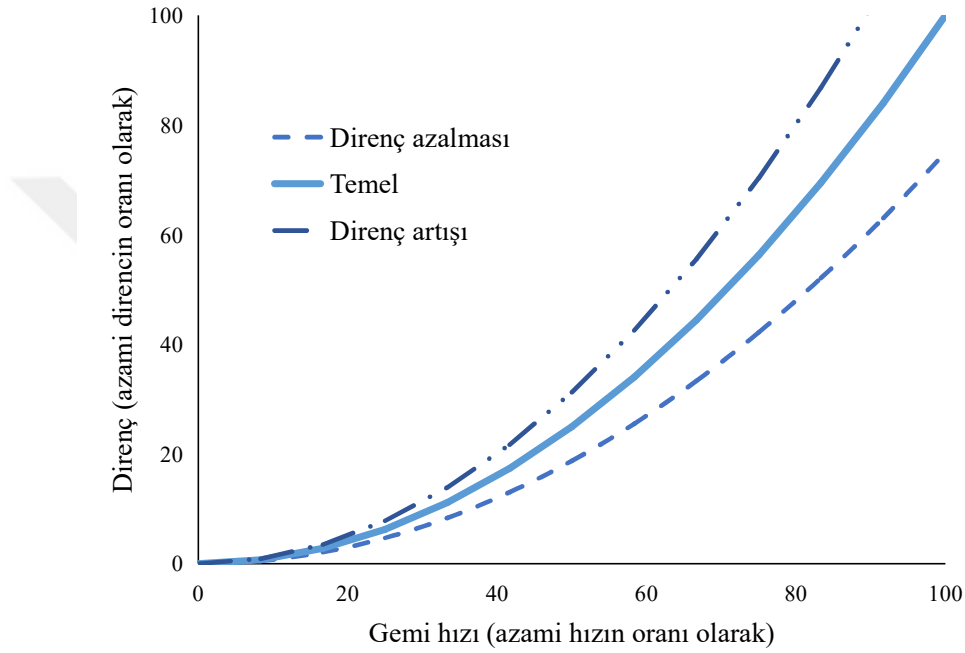
Direnç kuvveti, çok genel bir yaklaşımla (3.1) bağıntısında gösterildiği şekilde, (görece düşük gemi hız değerleri için) hızın ikinci kuvveti ile ilişkilendirilmektedir (Stapersma, 2000b; Woud, 2000).

$$R \propto v_s^2 \quad (3.1)$$

R : direnç kuvveti [kN]

v_s : gemi hızı [knot]

Dirençin gemi hızına istinaden değişimi çok genel olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Direnç artışı olması durumunda bahse konu “temel” eğri sol üste doğru, direnç azalması olması durumunda ise sağ alta doğru hareket etmektedir.

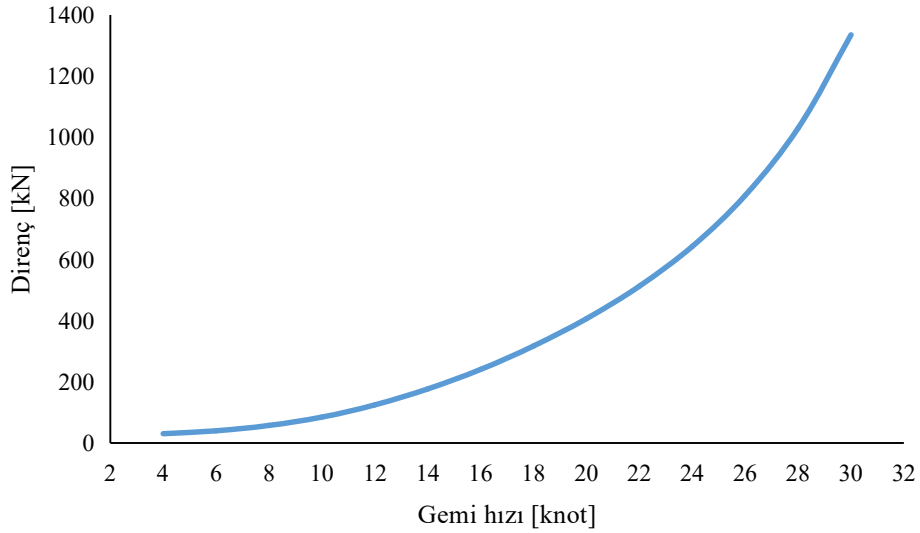


Şekil 3.1 Direncin gemi hızına istinaden genel değişimi [Woud’tan (2000) uyarlanmıştır]

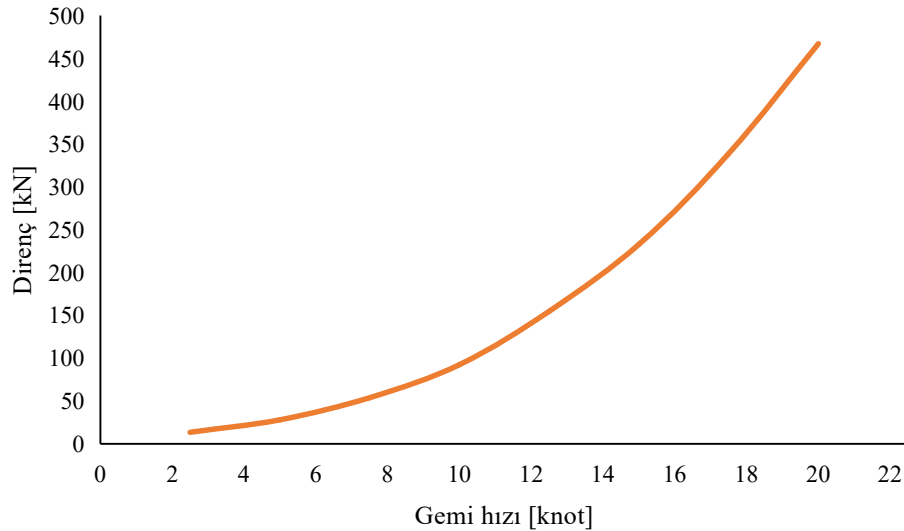
Genel olarak tam ölçekli gemilerin performansı; tecrübe durumunda (sakin su, temiz karina) yapıldığından (International Maritime Organization [IMO], 2002; Woud, 2000), bu direnç eğrileri “tecrübe direnç eğrisi” olarak adlandırılmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan jenerik gemilerin tecrübe direnç özellikleri fırkateyn için van Es’ten (2011), ADKG için Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman’dan (2017) uyarlanmış olup sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te verilmiştir.

Dirençin belirlenmesinden sonra bu direnci yenerek gemiyi hareket ettirecek sevk makinesi gücünün belirlenmesi gerekmektedir. Bu güç, sevk makinesinin krankşaft çıkışında (dizel motorlar için) veya şaft çıkışında (elektrik motoru ve gaz türbinleri için) ölçülen güçtür. Bu güç, makinelerin fabrika tecrübeleri esnasında, genelde makinelere bağlanan fren donanımı vasıtasıyla ölçüldüğünden “fren gücü” olarak

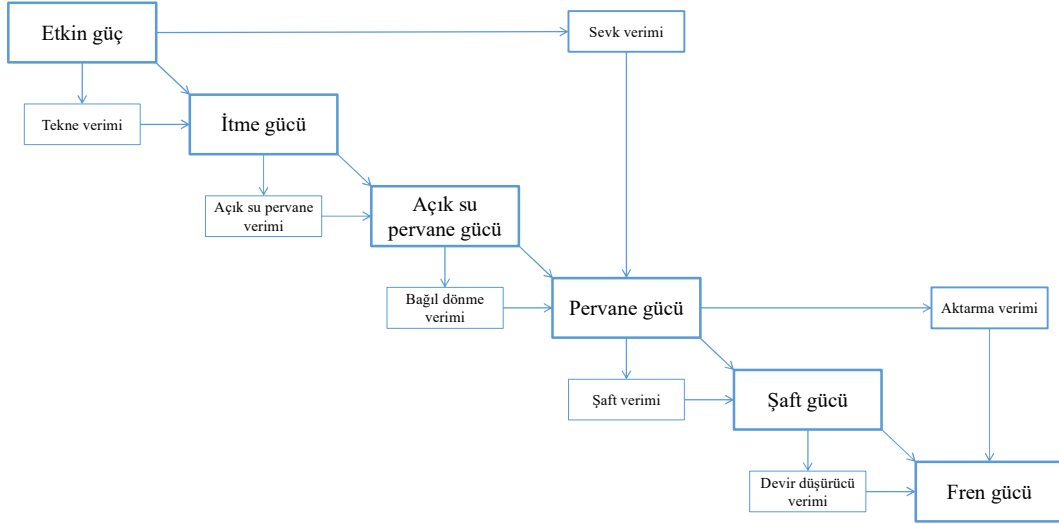
adlandırılmaktadır. Bu gücün, gemiyi hareket ettirecek pervane ve direnci yenilecek tekne ile uyumlandırılması gerekmektedir. Bu uyumun sağlanamaması durumunda; geminin hız, ivmelenme/durma, yakıt tüketimi özellikleri karşılanamayabilecektir (Woud, 2000). Dirençten fren gücüne geçiş işlemlerinin akışı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Jenerik fırkateynin tecrübe direnç eğrisi [van Es'ten (2011) uyarlanmıştır]



Şekil 3.3 Jenerik ADKG'nin tecrübe direnç eğrisi [Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman'dan (2017) uyarlanmıştır]



Şekil 3.4 Dirençten fren gücüne geçiş işlemlerinin akışı [Woud ve Stapersma’dan, (2003) uyarlanmıştır]

“R” direncine sahip bir gemiyi “ v_s ” hızında yedekte çekmek maksadıyla ihtiyaç duyulan güç, “etkin güç (yedekte çekme gücü)” olarak adlandırılmakta ve (3.2) eşitliğiyle hesaplanmaktadır (Stapersma ve Woud, 2005).

$$P_E = R \cdot v_s \quad (3.2)$$

P_B : etkin güç [kW]

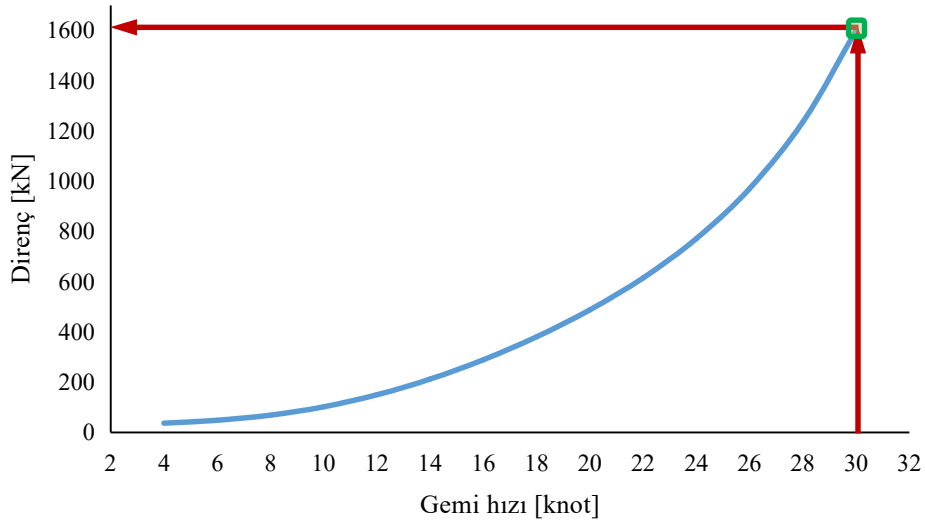
R : gemi direnç kuvveti [kN]

v_s : gemi hızı [m/s]

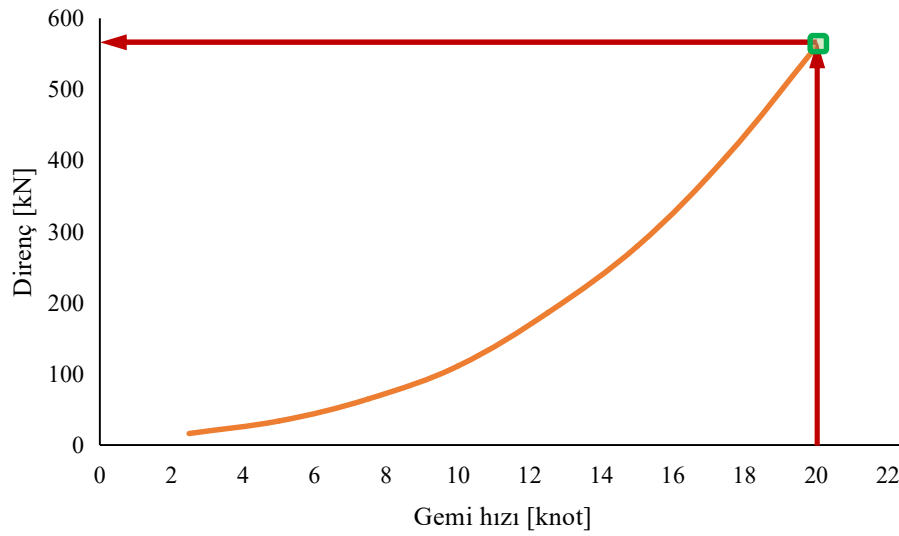
Direnç tahmini, sakin su ortamında yapıldığında, geminin kullanımı esnasında direnç artışına neden olacak etkenlerin (kirlenme, su çekimi artışı, deniz ve hava durumu ile su derinliği) etkin gücün hesaplama işlemlerine eklenmesi gerekmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Bu kapsamda, jenerik gemiler için bu direnç artışı, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te gösterilen direnç değerlerine %20’lik ilave bir “pay” eklenmesi suretiyle uygulanmıştır. Bu ekleme sonucu oluşan yeni eğriler Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da gösterilmiş olup, bu eğriler “kullanım direnç eğrisi” olarak adlandırılmaktadır (Ships’ Machinery Committee, 1990).

Bahse konu pay, genel olarak “sea margin” olarak adlandırılmaktadır (MAN ES, 2018). Çok değişken olmayan (neredeyse sabit) ve azami hızlarına yakın hızlarda seyir yapan ticari gemiler için ilave bir payın (engine margin) daha eklenmesi önerilmektedir. Jenerik gemilerin, Şekil 1.7 ve Şekil 1.8’de görüldüğü üzere azami

hızlarda çok kısa sürelerle seyir yapmaları (Woud ve Stapersma, 2003) nedeniyle, bu tez çalışmasında bu ilave payın eklenmesine ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 3.5 Jenerik fırkateynin kullanım direnç eğrisi



Şekil 3.6 Jenerik ADKG'nin kullanım direnç eğrisi

Azami hız ile kullanım direnç eğrisinin kesiştiği nokta, tasarım noktasıdır; bu noktanın konumu Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da yeşil ile gösterilmiştir. Bu noktaya karşılık gelen etkin güç de tasarım noktasının etkin gücüdür. Tasarım noktası, sevk makinesinin sahip olması gereken asgari fren gücünün belirlenmesinde en önemli husustur. Etkin güçten fren gücüne geçiş esnasında Şekil 3.4'te gösterildiği üzere önemli kayıplar verilmektedir. Bu şekilde gösterilen işlemler için jenerik gemilerle ilgili gerekli olan bilgiler Ek-A'da verilmiştir.

İtme gücünün belirlenmesinden sonra açık su pervane veriminin (dolayısıyla açık su pervane gücünün) belirlenmesi gerekmektedir. Kuramsal olarak kolay görünse de uygulamada bunu yapabilmek çok kolay olmamaktadır. Bunun nedeni açık su pervane veriminin, pervane tasarımıyla doğrudan ilişkili olmasıdır. Pervane tasarımında, sadece sanal ortamda veya hesaplama ile elde edilen veriler yeterli olmamakta, açık su havuzlarında veya kavitasyon tünellerinde fiili model tecrübelerinin de yapılması gerekmektedir. Tecrübeler esnasında tork değerleri ölçülebilmektedir. Bu tecrübeler; uzun süreli, yüksek maliyetli ve oldukça kapsamlı işlemlerdir. Bu nedenle tasarımcılar tarafından, “stok” olarak adlandırılan ve yukarıda belirtilen tüm işlemlerden geçerek kendini kanıtlamış hazır pervane “model” serileri tercih edilebilmektedir.

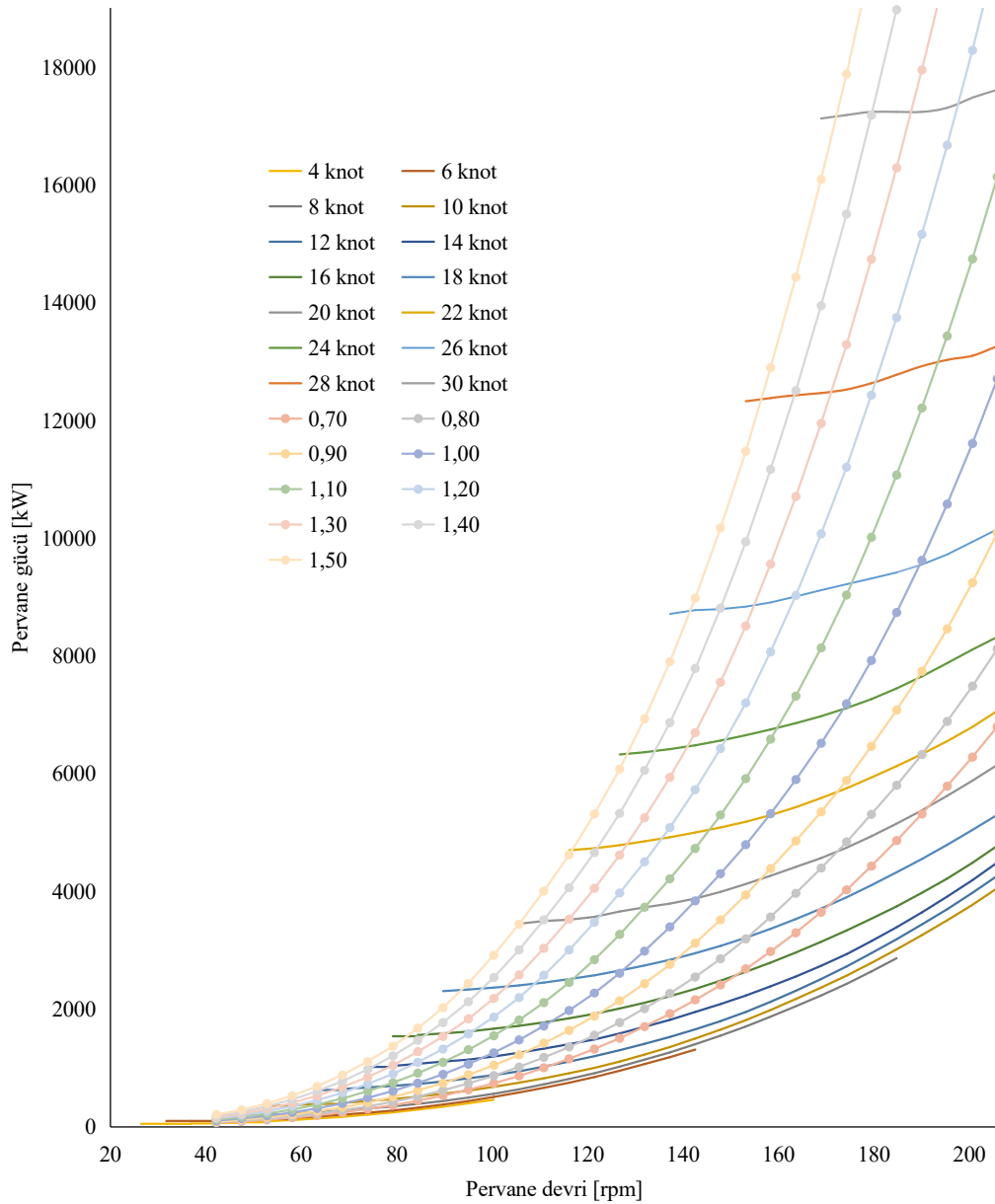
Pervanelerin performansı, muhtelif haritalar ile gösterilmektedir (Ek-B). Bu haritalar “açık su pervane haritaları” olarak adlandırılmaktadır. Bahse konu haritalar, direnç özelliklerini pervane güç özelliklerine aktarmaktadır (Woud, 2000). Bu haritalardan ayrıca; “tasarım açık su verimi”, “tasarım hatve oranı” ve “tasarım pervane devri” hesaplanabilmektedir.

Jenerik gemiler için seçilecek sevk makinelerinin sayı ve özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla her hız kademesinde ihtiyaç duyulan fren gücünün hesaplanması gerekmektedir. Jenerik gemilerin “direncinden fren gücüne” geçişin yapılabilmesi maksadıyla Geertsma ve arkadaşları (2016); Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman (2017) ve Gypa ve arkadaşları (2023) tarafından da kendi çalışmalarında kullanılmış olan Wageningen C4-40 pervane serisi (Dang ve ark., 2013) seçilmiştir. Bu kapsamda, Wageningen C4-40 serisi için geliştirilmiş olan MC440 yazılımı (Marin, t.y.) kullanılmış olup, yazılımın işlem akışı Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Yazılım; shaft devri, hatve oranı, gemi hızı ve fren gücü ilişkisini bir şekil üzerinde görüntülemektedir.

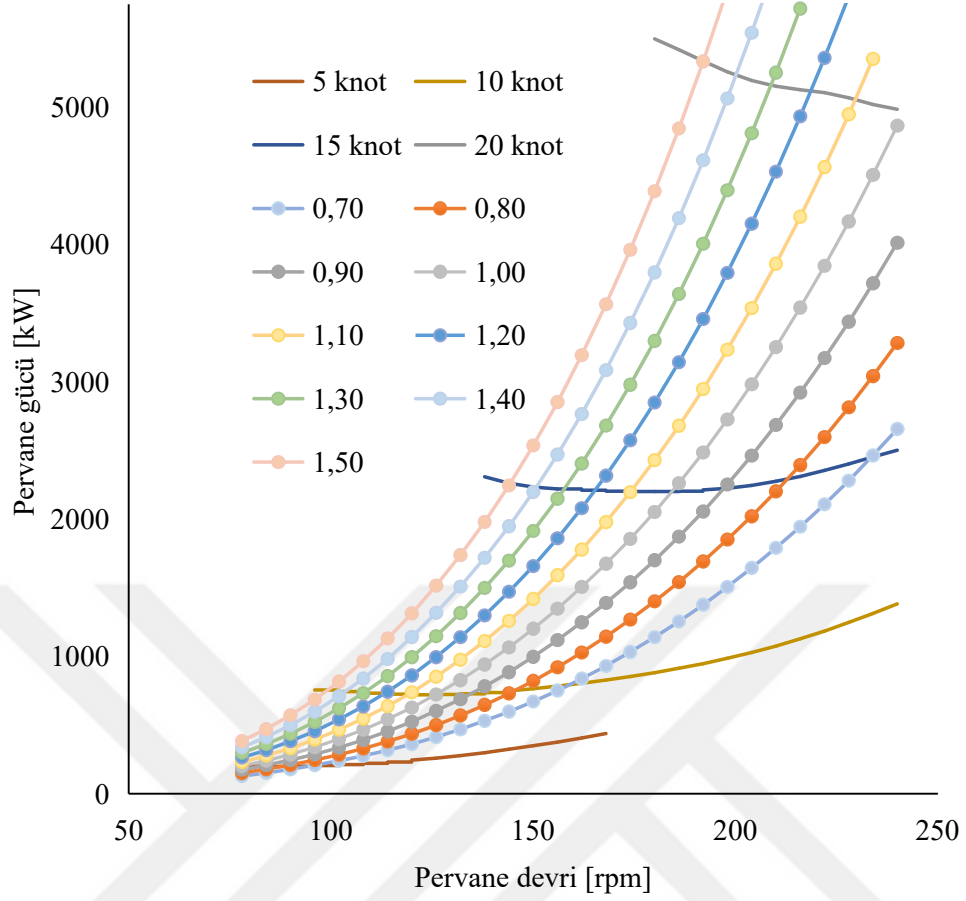
Bu tez çalışmasında kullanılan jenerik gemilerin görev profillerinde belirtilen her bir hız kademesi için gereken pervane gücü, yazılım vasıtasıyla hesaplanmış olup Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bu şekillerde bulunan pervane gücü değerleri ve Ek-A’da yer alan gemilere ilişkin veriler kullanılarak, Şekil 3.4’te verilen işlem akışına istinaden, sevk makinelerinin üretmesi gereken fren gücü değerleri hesaplanmıştır.

gemi hızları için de sevk makinesinin “emniyetli” ve “uygun” olacak şekilde üreticisi tarafından belirlenmiş çalışma zarfı ve kuralları içinde kalarak güç üretmesini sağlayacak bir tasarım yapılması gerekmektedir.

İkinci Bölüm’de bu tez çalışması kapsamında sevk makinesi olarak kullanılmasına karar verilmiş olan dizel motorlar, gaz türbinleri ve elektrik motorları ile pervanelerin uyumlandırılmasına, tasarım etkenlerine ve sınırlamalarına ilişkin bilgiler ve hesaplama yöntemi Ek-C’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Jenerik fırkateyn için MC440 yazılımı vasıtasıyla hesaplanan şaft devri, hatve oranı, gemi hızı ve pervane gücü ilişkisi



Şekil 3.9 Jenerik ADKG için MC440 yazılımı vasıtasıyla hesaplanan şaft devri, hatve oranı, gemi hızı ve pervane gücü ilişkisi

4

SEVK VE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ ÇEŞİTLERİ

Sevk ve elektrik güç sistemleri temel olarak bütünleşik ve ayrık olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Günümüz gemilerinde esasen, ayrık ve bütünleşik olmak üzere iki farklı sevk ve güç sistemi mimarisi kullanılmaktadır (Ziwi, 2005; Paul, 2020). Bütünleşik mimaride sevk elektrik motorları kullanılmakta ve bunun sonucu hem sevk elektrik motorları hem de diğer elektrik kullanıcıları (genel kullanım ve servis sistemleri, savaş ve komuta kontrol sistemleri) için elektrik gücü ihtiyacı tek sistemden karşılanmaktadır; başka bir ifadeyle sevk elektrik motorlarının güç beslemesi elektrik güç sisteminden yapılmaktadır. Ayrık mimaride, sevk gücü ihtiyacı sadece ısıl makinelerden sağlanmaktadır; başka bir ifadeyle sevk gücü ve elektrik güç ihtiyacı ayrı sistemlerden karşılanmaktadır. İlk dönemlerde ayrık mimari; sevk elektrik motorlarını beslemek için ayrı, geminin diğer elektrik kullanıcılarını beslemek için ayrı olmak üzere iki farklı elektrik güç sistemi kullanan mimarileri tanımlamak için de kullanılmıştır (Skjong ve ark., 2016). Bu iki mimaride kullanılacak sevk tahrik yöntemleri üç ana gruba ayrılmaktadır. Isıl makinelerin sevk için kullanıldığı tahrik yöntemi “mekanik tahrik”, sevk elektrik motorlarının kullanıldığı tahrik yöntemi “elektrikli tahrik”, hem ısıl makinelerin hem de elektrikli makinelerin aynı sevk sisteminde kullanıldığı tahrik yöntemi ise “melez (hybrid) tahrik” olarak adlandırılmaktadır (Bricknell ve Partridge, 2007). Tahrik yöntemlerinin birbiri ile ilişkisi, küme benzeşimi kullanılarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Tahrik yöntemlerinin birbiri ile ilişkisi

Yüksek sevk gücü gerektiren ve fakat katı hacim ve ağırlık sınırlamaları olan fırkateyn benzeri gemi tiplerinde sevk gücünün “bölünerek birleştirilmesi” zorunluluğu oluşmaktadır (Woud ve Geertsma, 2003). Sevk sisteminin yedeklenebilirliği, bu bölünmeye etki eden diğer bir husustur. Sevk makinelerinin, görev profiline istinaden eniyilenmiş verimlilikte çalıştırılması hususu da güç bölünmesinin tercih edilmesine neden olmaktadır. Çağdaş fırkateynlerin tamamında bu tür güç bölünmesi yapılmaktadır. ADKG benzeri, görece daha düşük sevk gücü gerektiren gemilerde ise sevk için gereken güç, genellikle şaft başına birer sevk makinesinden alınabilmekle birlikte, yedeklenebilirlik ve verimlilik hususları nedeniyle sevk gücü bölünebilmektedir.

Farklı hız kademeleri için farklı sevk makinesi birleşimlerinin kullanıldığı mimari “birleşik sevk sistemi” olarak adlandırılmaktadır (Woud ve Geertsma, 2003). Birleşik sevk sistemleri muhtelif kısaltmalar ile tanımlanmaktadır. Bu kısaltmalar ile ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tablodaki hız ile ilgili bilgiler, yaygın kullanılan tanımlamalar olup, alanyazında farklı tanımlamalara rastlamak mümkündür. Kısaltmalardaki “CO” ifadesi, sistemin birleşik olduğunu; “A” harfi sevk makinelerinin yüksek hız kademeleri için birlikte kullanıldığını; “O” harfi ise sevk makinelerinin yüksek hız kademeleri için birlikte kullanılmadığını belirtmektedir. Şaftların çapraz olarak birbirine bağlanabildiği sistemleri tanımlamak amacıyla tabloda belirtilen tanımlamaların sonuna “-CC (cross connect)” ifadesi eklenmektedir (RENC GmbH, 2023). Birleşik mekanik tahrike sahip sevk sistemleri yakıt maliyetlerinin düşürülmesine olanak vermektedir (Hodge ve Mattick, 1996). Bu olanak, yakıt verimliliğinin yanında, gemide yakıtın depolanması için gerekli hacmi de azaltmaktadır. Bu azaltım sonucu ve güç yoğun gaz türbinleri kullanılması suretiyle elde edilen ilave hacmin, küçük deplasmanlı (dolayısıyla düşük maliyetli) gemilerde silah sistemlerine ayrılmasına imkân sağlanmış olmaktadır. Mekanik tahrik uygulamalarında gaz türbini kullanılan birleşik sistemlerin çağdaş gemilerde kurulumuna son dönemlerde de devam edilmiştir (ABD Donanması, t.y.; Zamarin, 2016).

CODOG’ta dizel motorlar daha az yakıt tüketimi ve düşük hızda daha yüksek performans sergilemektedir (Bricknell ve Partridge, 2007). Buna karşın bu motorlar fazla bakım ihtiyacı gerektirmekte ve yüksek gürültü ve titreşimlere sahiptir. Onarım ve planlı büyük bakımları uzun zaman sürmektedir.

Tablo 4.1 Birleşik sevk sistemlerini tanımlamak için kullanılan kısaltmalar
(Mazzuca ve Torre, 2008; RENK GmbH, 2023; Roa, 2015)

CO	D DL (DEL) G	A O	D G
CO: CO mbined Sevk sisteminin birleşik olduğunu tanımlamaktadır.	D: D iesel DL: D iesel E lectric (DEL: D iesel E lectric) G: G as turbine Düşük hız kademlerinde kullanılan tahrik ve makine tipini tanımlamaktadır.	A: A nd (ve) Düşük ve yüksek hız kademlerinde kullanılan makinelerin, yüksek hız kademlerinde birlikte kullanıldığını belirtmektedir. O: O r (veya) Düşük ve yüksek hız kademlerinde kullanılan makinelerin, yüksek hız kademlerinde birlikte kullanılmadığını (ayrı kullanılabildiğini) belirtmektedir.	D: D iesel G: G as turbine Yüksek hız kademlerinde kullanılan makine tipini tanımlamaktadır.

Gaz türbinlerinin sunduğu üstünlüklere rağmen, sadece dizel motorların birleşik olarak (CODAD) kullanıldığı çağdaş uygulamalar da bulunmaktadır (Danimarka Parlamentosu, t.y.). CODAD, yeni projeler için de önerilmeye devam edilmektedir (BMT Defence Services, 2016).

Deniz araçlarında elektrik güç sistemlerinin kullanımına ilişkin yapılan çalışmaların tarihçesi 1830'lu yıllara kadar uzanmaktadır (Skjong ve ark., 2015). Gemilerde ilk elektrik sisteminin kullanıldığı gemi SS Columbia olarak kayıtlara geçmiştir. 1903'te Vandal dizel-elektrik tahrikli ilk gemi olurken, 1912'de USS Jupiter ilk elektrik tahrikli askerî gemi olarak tarihteki yerini almıştır. Dalgalı akımın (AC) icadından 70 yıl sonra 1960'ta alternatif akım motorunun ilk kullanıldığı gemi SS Canberra olmuştur. 1987'de Queen Elizabeth II bütünleşik tahrikin ilk uygulandığı gemi olarak tarihteki yerini almıştır.

Elektrikli tahrik kavramının 100 yıla varan bir geçmişi bulunmasına rağmen; güç yoğun, güvenilir ve maliyet açısından rekabetçi çözümlerle, geniş bir güç aralığında değişken hızlı elektrik motorlarının kontrolünün yapılabilmesi olanağı sayesinde elektrikli tahrikin kullanımı 80'li ve 90'lı yıllarda yeni uygulama alanlarında ortaya çıkmıştır (Ådnanes, 2003).

Elektrikli tahrikin verimlilik, performans ve esneklikte sunduğu üstünlüklerin sonucu olarak, 20. yüzyılın ortalarından itibaren askerî gemilerin sevk sistemleri, mekanik tahrikten elektrikli tahrike doğru geçişe başlamıştır (Simmonds, 2016). Bu geçişin ilk adımları melez tahrik ile atılmıştır. Birinci Bölüm'de değinilmiş olan Type 23 sınıfı fırkateyn, melez tahrike sahip ilk harp gemisi olarak tarihte yerini almıştır (SSS Clutch Company Inc., t.y.).

Elektrik tahrikin kullanımı 90'lı yıllarda özellikle kruvaziyerlerde ilgi çekmeye başlamıştır (Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman, 2017a). Elektrikli tahrik, harp gemilerinin ve kruvaziyerlerin dışında çoğunlukla; feribotlar, DP sondaj gemileri, kablo/boru döşeme gemileri, buzkıranlar, ikmâl gemilerinde kullanılmaya başlanmıştır (Ådnanes, 2003). Bu tür gemilerde elektrik tahrikin seçilmesinde en önemli etken, gemilerin değişken görev profilidir (Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman, 2017a).

Bütünleşik mimari, çok genel olarak; gemideki tüm tahrik makinelerinin elektrik ürettiği (elektrik üreteçlerini tahrik ettiği) ve üretilen bu elektrik gücünün elektrik sevk motorları ile gemideki diğer elektrik kullanıcıları tarafından ortak kullanıldığı mimari şeklinde tanımlanabilmektedir (Backlund ve ark., 2012; Doerry, 2015; Hodge ve Mattick, 1996; Hodge ve ark., 2002; IEEE, 2017; Kim ve ark., 2015; Kumar ve Zare, 2019; Little ve ark., 2003; McCoy, 2015; Petersen ve ark., 2011; Schuddebeurs ve ark., 2006; Simmonds, 2016; Skjong ve ark., 2016; Young ve ark., 2001). Her ne kadar bu kaynaklarda yer alan tanımlamada belirli bir birlik/ortaklık görünse de özellikle tam elektrikli tahrikin adlandırılmasında farklılıklar görülmektedir: Skjong ve arkadaşları (2016) tarafından AES; Hodge ve Mattick (1996), Simmonds (2016) ve Young ve ark. (2001) tarafından IFEP; Doerry (2015), IEEE (2017), Kim ve arkadaşları (2015), Kumar ve Zare (2019) ve McCoy (2015) tarafından IPS olarak adlandırmıştır.

Hodge ve arkadaşları (2002), IPS'in azami hız için elektrik motorlarını besleyebilecek imkâna sahip olan ve mekanik tahrik içermeyen uygulamalarını, IFEP olarak adlandırmıştır. Backlund ve arkadaşları (2012), AES ile geleneksel bir gemi arasındaki temel farkın, AES'in IPS mimarisine sahip olduğunu belirtmiştir. Petersen ve arkadaşları (2011), yukarıdaki tanımlamayı IPS olarak adlandırmış olmakla birlikte, Birleşik Krallık Kraliyet Donanması'nın bu mimariyi IFEP olarak adlandırdığını belirtmiştir. Schuddebeurs ve arkadaşları (2006), tüm farklı adlandırmaları kendi yayınlarında tanımlayarak açıklamıştır.

Little ve arkadaşları (2003), Schuddebeurs ve arkadaşlarının (2006) yaptıkları tanımlamalara benzer tanımlamalar yapmış olup, bu tanımlamalara istinaden Type 45 sınıfı destroyerlerin sisteminin IEP olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde gemilerin ilk tesliminde kurulmuş olan dizel tahrikli üreteçlerin üreticisi Wärtsilä (2009) tarafından da Type 45 sınıfı destroyerlerin IEP'e sahip olduğu belirtilmiş olmasına rağmen, bahse konu gemilerde kullanılan sevk elektrik motorlarının çeviricilerinin üreticisi (GE Power Conversion, 2022) tarafından Type 45'in sahip olduğu sistemin IFEP olduğu belirtilmiştir. Type 45 programında görev almış olan Joyce ve Wixey (2019) de IFEP adlandırmasını kullanmıştır.

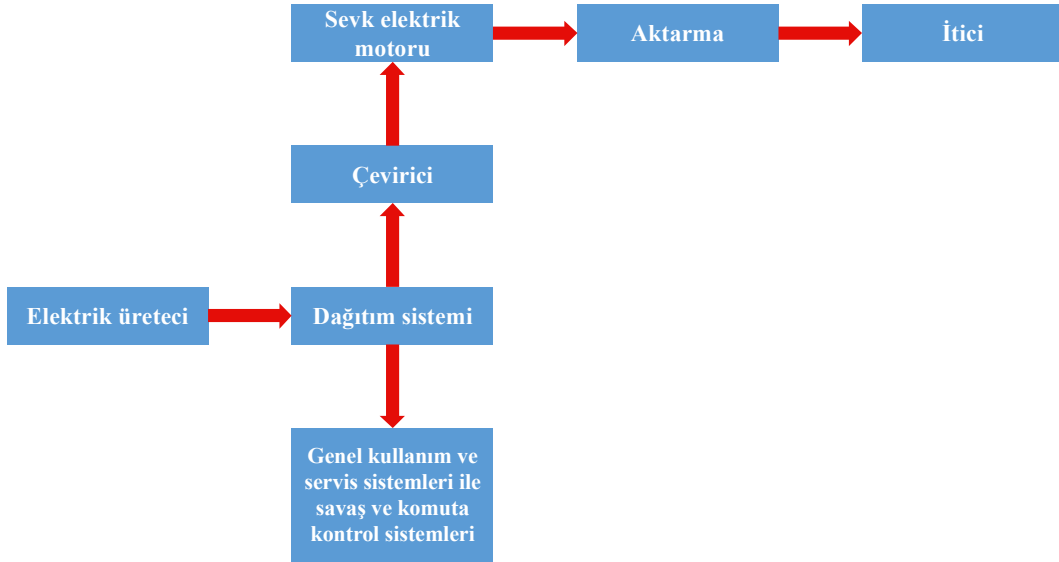
Ayrıca, yukarıda belirtilen tanımlamalardan kısmen farklı olarak Sulligoi ve arkadaşları (2012) tarafından melez (CODLAG) tahrike sahip FREMM programına mensup İtalyan fırkateynlerinde bulunan ve hem sevk elektrik motorlarını hem de gemideki diğer elektrik kullanıcılarını besleyen elektrik güç sistemi IPS olarak adlandırılmıştır.

Bu tez çalışmasında, gemide mevcut tüm ısıl makinelerin, elektrik üreteçlerini tahrik ettiği ve bu üreteçlerin hem sevk elektrik motorlarını hem de diğer elektrik kullanıcılarını beslediği mimari "IFEP" olarak adlandırılmıştır.

Yukarıdaki tanımlamalara ve bu tanımlamalara ilişkin atıfta bulunulan kaynaklarda yer alan şekillere istinaden bütünleşik elektrikli tahrikin genel mimarisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Şekil 4.2'de gösterilen mimarinin üstün özellikleri harp gemileri için IPS adı altında yapılmış olan Doerry'nin (2015) çalışmasından uyarlanarak aşağıda verilmiştir.

- IPS, tahrik makinelerinin verimliliğini iyileştirmektedir.



Şekil 4.2 Bütünleşik elektrikli tahrikin genel mimarisi

- IPS, tahrik makinelerinin sayısının azaltılmasına imkân vermektedir. Bu azalma, tedarik maliyetlerinde tasarrufa, bakım maliyetlerinin azalmasına, emme ve egzoz devreleri için gereken hacmin azalmasına ve insan gücü gereksinimlerinin azalmasına katkıda bulunabilmektedir.
- IPS, iticilerin (pervanelerin) verimini arttırmaktadır.
- IPS, kurulum esnekliği sağlamaktadır.
- IPS, bölgesel beka kabiliyetini desteklemektedir. Bölgesel dağıtım yönteminin (Hegner ve Desai, 2002) kullanılması sonucu, bölgesel beka kabiliyeti artırılmaktadır.
- IPS, gemi üretiminde kolaylık sağlamaktadır. Uzun şaft hatlarının ortadan kaldırılması, gemi yapımcısının yapım sırasını değiştirerek montaj programını basitleştirmesine ve dolayısıyla geminin inşaat programını kısaltmasına olanak sağlamaktadır.
- IPS, elektrik güç sistemi tasarımında, elektrik güç sistemi tarafından kullanıcılara sağlanan elektrik gücünün güvenilirliğini ölçmek için bir ölçek olarak kullanılan “kullanım kalitesini (quality of service-QOS)” iyileştirmektedir.
- IPS, yüksek güç gerektiren gelişmiş görev sistemlerini desteklemektedir.

Elektrikli tahrikle ilgili yapılan birçok çalışmada (Ådnanes, 2003; Kim, 2015; Simmonds, 2016; Tortarolo, 2000) da yukarıda belirtilen üstünlüklere değinilmiştir.

Bunların dışında önem taşıdığı değerlendirilen başka hususlar da bulunmaktadır. Yine yukarıda belirtilen sevk elektrik motorlarının yönünün kolayca değiştirilebilmesi özelliği sayesinde daha hızlı acil durdurma (crash stop) manevrası yapılabilmektedir (Kim, 2015; Veneri ve ark., 2012); (dizel) elektrik tahrik daha iyi ileri ve tornistan ivmelenmesi sağlamaktadır (Veneri ve ark., 2012). Elektrik tahrikinin kullanımı sayesinde üreteç setlerinin geminin muhtelif bölümlerine esnek olarak konumlandırılabilmesi (Hodge ve Mattick, 1996), şaftın daha kısa olması ve sabit devirli tahrik makinelerinin kullanılması (Ådnanes, 2003) sonucu daha düşük seviyede gürültü ve titreşim yayımlanmaktadır. Sevk elektrik motorunun doğrudan şaft üzerine yerleştirilmesi, devir düşürücüden kaynaklanacak gürültüyü engellemekte ve bunun sonucu geminin genel gürültü izinde azalma sağlanmaktadır (Rolls-Royce, 2018; Widmann ve ark., 2019).

Tasarım aşamasında mevcut olmayan ve fakat ileriki dönemlerde olası kullanılma ihtimali olan ve elektrik güç ihtiyacı belirlenemeyen silah sistemleri için gemide önceden bir altyapı oluşturmak, önemli maliyet (tedarik, yakıt, bakım, hacim, ağırlık vb.) artışlarına neden olabilecektir; IPS'nin, öne çıkan üstünlüklerinden biri olan üreteçlerin verimli işletimi hususu ile çelişkili olabilecektir; olmayan bir yük için yüksek güçlü üreteç setleri koymak hem maliyetleri arttıracak, hem de verimleri düşürecektir. Önemli bir başka husus da önceden öngörülen silah sistemlerinden muhtelif sebeplerle vazgeçmelerin de gerçekleşebileceği durumlardır (Charette, 2018). Bu nedenle gemilerin tasarım aşamasında mevcut ve gelecek algılayıcı ve silah sistemlerinin kullanılabilirliğinin dikkatli bir şekilde incelenmesi büyük önem teşkil etmektedir. Bu kapsamda, makul bir “kullanım genişlemesi” öngörmek yukarıda belirtilen riskleri önemli ölçüde azaltılabilecektir.

Yukarıda verilen üstünlüklerinin dışında, elektrik tahrikin mahzur olarak değerlendirilebilecek özellikleri de bulunmaktadır. Üreteç setinden sevk elektrik motorlarının çıkışına kadar önemli güç kayıpları oluşmaktadır (Ådnanes, 2003; Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman, 2017a, Hodge ve Mattick, 2015). Bu kayıplar yaklaşık %10 oranında (Ådnanes, 2003) olmakla birlikte %15'e kadar çıktığı da bildirilmiştir (Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman, 2017a). Bununla birlikte, şaft devri düştükçe, mekanik tahrike kıyasla oldukça az verim düştüğünden, özellikle düşük devirlerde elektrikli tahrik daha yüksek verimli olmaktadır (Hodge ve Mattick, 2015). Bu noktada, üreteçleri tahrik eden dizel

motorların veya gaz türbinlerinin de düşük yükte verimlerinin oldukça düştüğünün dikkate alınması gerekmektedir. Bu olumsuzluk, daha verimli çalışma aralığında çalıştırılabilecek üreteç setlerinin ve sayısının seçilmesi ile giderilebilecektir ve fakat, her bir projeye tamamen uygun üreteç setinin, üreticilerde bulunmasının her zaman mümkün olamadığı olgusu da dikkate alınması gereken başka bir husustur. Bu kapsamda, küçük güce sahip üreteçlerin kullanılması bir çözüm olabilecektir (Ådnanes, 2003).

Dizel elektrik tahrik, yüksek ilk tedarik maliyetine sahiptir (Ådnanes, 2003). Elektrik tahrikli sistemlerin yeni envantere girdiği kurumlar için farklı bakım-işletme ve personel stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

IPS'nin, yüksek soğutulma ihtiyacına sebep olacağı ve bu durumun da üreteç setlerinin kapasitelerinin (büyüklüklerinin) artırılmasına neden olacağı bildirilmiştir (Backlund ve ark., 2012); bunun sonucu olarak da Şekil 1.5 ile açıklanan olumsuz durumun yaşanacağı değerlendirilmektedir.

Küçük gemiler için, üstünlüklerine rağmen IFEP, mekanik tahrik içeren sistemlere kıyasla hacmin büyümesine, ağırlığın ve maliyetlerin artmasına neden olmaktadır (Simmonds, 2016). Jenerik bir fırkateyn için; belirlenmiş görev profillerine istinaden IFEP'in, mekanik tahrike kıyasla %18,5'e varan daha düşük kullanım maliyetlerine sahip olmasına karşın yaklaşık %25 daha yüksek tedarik maliyeti, daha büyük hacim ve ağırlığa sahip olduğu belirtilmiştir (Hodge ve Mattick, 1995).

Melez tahrik, mekanik ve elektrikli tahrikin özelliklerini birleştirmektedir. Çağdaş melez sistemler; IFEP'in sahip olduğu hacim, ağırlık ve maliyet olumsuzluklarına sahip olmadan; elektrikli tahrikin yararlarını verebilmektedir (Simmonds, 2016). Melez tahrik; değişken görev profiline sahip gemiler için, IFEP'ten daha düşük maliyetle, mekanik tahrike kıyasla daha büyük kullanım esnekliği sunmaktadır.

Melez tahrikte, genel olarak elektrikli tahrik düşük hız kademeleri için kullanılmaktadır (David ve Partridge, 2007). Melez tahrik, “Or” veya “And” mimarisiyle tasarlanabilmektedir. Isıl ve elektrikli makinelerin aynı anda çalıştırıldığı “And” mimarisine sahip sevk sistemlerinde ileri kontrol uygulamaları gerekmektedir (Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman, 2017b). Örneğin CODLOG, elektrikli ve ısıl makinelerin güçlerinin eş zamanlı birlikte

kullanıldığı CODLAG’a kıyasla daha basit bir yapı sunmaktadır (Rolls-Royce, 2018).

Melez tahrik, karmaşık bir yapıya sahiptir, bu nedenle geleneksel bir tahrikle karşılaştırıldığında tasarımı ve inşası daha uzun sürebilmektedir (Roa, 2015). Melez tahrik, geleneksel sevk sistemi kontrolü ve güç yönetimi sistemine kıyasla yukarıda belirtildiği üzere daha karmaşık otomasyon gerektirebilmektedir.

Melez tahrik, son dönemlerde harp gemilerinde verimliliğin sağlanmasında önemli ilgi görmektedir (Kim ve ark, 2015). Melez tahrik, genellikle yüksek azami hız gereksinimi (28-30 knot) ile birlikte toplam gemi boyutunu en aza indirme imkânına sahip olması istenen harp gemileri için özellikle uygun bir çözüm olmaktadır (McCoy, 2015).

Melez tahrik kullanılan çağdaş fırkateyn programlarından biri F125 programına mensup fırkateynler CODLAG’a sahiptir (Siemens AG, 2008). Fırkateyn tipi gemiler dışında farklı tipte gemilerde de melez tahrik kullanılmaktadır. Birinci Bölüm’de bahsedilen Holland sınıfı gemiler CODELOD melez tahrik sistemine sahiptir (Smith, 2015).

Düşük ağırlık, küçük boyut ve yüksek güç/tork aktarımı, devir düşürücü tasarımcıları için zorlu etkenlerdir (Bricknell ve Partridge, 2007). Şaftları çapraz bağlanabilen (-CC) birleşik sistemlerin devir düşürücü yerleşimi Şekil 4.3’te verilmiştir. Çapraz yerleşim genellikle oldukça hantal ve karmaşıktır; ayrıca gürültülü çalışmaktadır (Mazzuca ve Torre, 2008). Bu olumsuz özelliklerinin yanı sıra, iki şaft hattı arasındaki tork dengesinin sağlanması büyük önem taşımaktadır (Martelli ve Figari, 2017). Özellikle sert dönüş manevraları esnasında, iki şaft hattı arasında tamamen farklı güç ve tork ihtiyacı oluşabilmektedir (Mauro, 2013).

Jenerik gemiler için; Birinci Bölüm’de belirtilen gerekçelere istinaden, yine aynı bölümde, sevk sisteminin çift şafta ve uskur pervaneye sahip olmasının kararlaştırıldığı belirtilmiştir. Bu kapsamda, hesaplamalar her iki şaftın aynı anda kullanıldığı duruma (Woud, 2000) istinaden Üçüncü Bölüm’de açıklanan yöntemle yapılmıştır.

karakol gemilerinin daha az sayıda ve daha “düşük profilli” algılayıcı ve silah sistemlerine sahip olduğu belirtilmiştir; bu kapsamda jenerik ADKG için ileriki dönemlerde herhangi bir genişleme ihtiyacı öngörülmemiştir.

Toplam elektrik güç ihtiyacının belirlenmesinden sonra, hesaplamalarda dikkate alınması gereken diğer bir etken de üreteç setlerinin yüklenebileceği azami değer olan “emniyet payıdır”; bu tez çalışmasında bu payın değeri %90 olarak belirlenmiştir (Doerry, 2007; MAN Diesel & Turbo, t.y.). Sonuç olarak, tüm üreteç setlerinin azami güçlerinin toplamı, sevk gücü ile diğer elektrik kullanıcılarının ihtiyacını, kullanım genişlemesini ve emniyet payını da içerecek şekilde, ihtiyaç duyulan tüm elektrik gücünün toplam değerine eşit ya da daha yüksek olması gerekmektedir (Doerry ve Fireman, 2006).

Dizel motorlar ve gaz türbinlerinin her bir sevk ve elektrik güç sistemi tasarımına özel olarak tasarlanıp üretilmesi; yüksek maliyetler, uzun süreler ve sürdürülebilirlik etkenleri nedeniyle (çok sınırlı değişiklikler haricinde) genelde mümkün olmadığından, bu makineler “hazır ürün” olarak tedarik edilebilmektedir. Bu nedenle, sevk ve elektrik güç sisteminin tasarımının bu olguya istinaden yapılması durumu oluşmaktadır. Sevk elektrik motorları ise projeye özel tasarlanıp üretilmektedir. Devir düşürücüler de “hazır ürün” olarak tedarik edilebilmekle birlikte, yüksek güç ihtiyaçları ve/veya farklı ilave kullanım istekleri için “projeye özel tasarım” yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında da Birinci Bölüm’de belirtilen ilkelere uygun olarak üreteç setleri dâhil dizel motorlar ve gaz türbinleri açık kaynaklardan seçilmiş, sevk elektrik motorlarının verileri FFX-II fırkateyn programında kullanılan motorun üreticisinden alınmış, diğer bileşenlerin özellikleri ise muhtelif kaynaklarda bulunan yöntemlerle belirlenmiş/hesaplanmıştır. Bu yöntemler, ilgili bileşenin incelemesinin yapıldığı kısımda açıklanmış/belirtilmiş ve kaynak bilgileri Ek-A’da verilmiştir.

4.1 Jenerik Fırkateynin Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçenekleri

Bu bölümün başında, sevk gücünün bölünmesinin gerekçeleri açıklanmış olup, bu gerekçelere istinaden jenerik fırkateynin sevk gücü, IFEP seçeneği hariç olmak üzere, farklı sevk makinelerine bölünmüştür. Bu kapsamda, bahse konu fırkateyn için önerilen sevk sistemi seçenekleri Cin ve Çelebi’den (2021b) uyarlanmış olup

Şekil 4.4'te gösterilmiştir; bahse konu şekilde yer alan her bir seçenek ile ilgili açıklama ve incelemeler müteakip kısımlarda yapılmıştır.

Görev profiline istinaden, fırkateynin yıllık görev süresinin önemli bölümü 18 knot altında kullanılmaktadır. Mekanik ve melez tahrikli sevk sistemi seçenekleri için sevk gücünün bölünmesi esnasında bu durumun da dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda, CODAD ve IFEP seçenekleri hariç olmak üzere, sevk gücünün 18 knot ve altı ile 18 knot üzeri olmak üzere ikiye bölünecek şekilde sevk makinelerinin seçimi yapılacaktır.

Seçeneklerde yer alan sevk makinelerinin sahip olması gereken asgari fren gücü değerleri Üçüncü Bölüm'de açıklanan yöntem ve Şekil 3.8 kullanılarak hesaplanmış ve bu değerlere istinaden makineler seçilmiştir. Bu hesaplamanın yapılabilmesi amacıyla gerekli olan veriler ile makine seçimde kullanılan bilgiler ve bunların alıntılandığı kaynaklar Ek-A'da yer almaktadır.

Birinci seçenek CODAD olarak adlandırılmış olup, bu seçenekte her şaft için ayrı olacak şekilde, ikişer eş dizel motor bulunmaktadır. Düşük hız kademeleri için şaft başına birer dizel motor kullanılmaktadır. Yüksek hız kademeleri için dört dizel motor birlikte devreye alınmaktadır.

İkinci seçenek CODOG olarak adlandırılmış olup, bu seçenekte her şaft için ayrı olacak şekilde, birer dizel motor (SM2) ve birer gaz türbini (SM3) bulunmaktadır. Düşük hız kademeleri için şaft başına birer dizel motor kullanılmaktadır; bu durumda gemiye 18 knot hız yaptırılabilir. Bu hızdan yüksek hız kademeleri için dizel motorlar devre dışı bırakılmakta ve gaz türbinleri devreye alınarak gemiye azami hız yaptırılabilir.

Üçüncü seçenek CODOG-CC olarak adlandırılmış olup, bu seçenekte her şaft için birer dizel motor (SM4) ve her iki şafta çapraz bağlanabilen bir gaz türbini (SM5) bulunmaktadır. Düşük hız kademeleri için şaft başına birer dizel motor kullanılmaktadır; bu durumda gemiye 18 knot hız yaptırılabilir. Bu hızdan yüksek hız kademeleri için dizel motorlar devre dışı bırakılmakta ve gaz türbini devreye alınarak gemiye azami hız yaptırılabilir.

Dördüncü seçenek CODAG-CC olarak adlandırılmış olup şekilsel yapısı CODOG-CC ile benzerlik göstermektedir. Bu seçenekte her şaft için de birer dizel motor (SM6) ve her iki şafta çapraz bağlanabilen bir gaz türbini (SM7) bulunmaktadır.

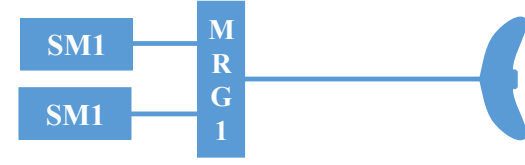
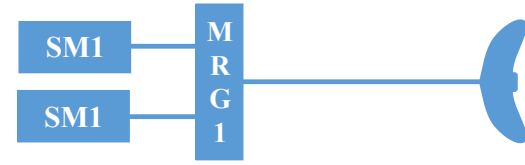
Düşük hız kademeleri için şaft başına birer dizel motor kullanılmaktadır; bu durumda gemiye 18 knot hız yaptırılabilir. Bu hızdan yüksek hız kademeleri için dizel motorlar gaz türbini ile birlikte kullanılarak gemiye azami hız yaptırılabilir. Bu mimaride dizel motorların hem tekil olarak ve hem de gaz türbini ile birlikte tam güçte kullanılabilir. Bu devir düşürücünün (MRG4) dizel motor kısmının, iki hız kademeli olarak tasarlanması gerekmektedir.

Beşinci seçenek CODLOG-CC olarak adlandırılmış olup, bu seçenek CODOG-CC ile benzerlik göstermektedir; dizel motorlar yerine sevk elektrik motorları konulmuştur. Bu motorlar, yukarıda belirtildiği üzere daha sessiz kullanım için devir düşürücünün kışına, “şaft üzerine” konulacak şekilde tasarlanmıştır; bu sayede devir düşürücü kullanılmadan motorlar çalıştırılabilir. Bu seçenekte her şaft için birer sevk elektrik motoru ve her iki şafta çapraz bağlanabilen bir gaz türbini bulunmaktadır. Düşük hız kademeleri için şaft başına birer sevk elektrik motoru kullanılmaktadır; bu durumda gemiye 18 knot hız yaptırılabilir. Bu hızdan yüksek hız kademeleri için sevk elektrik motorları devre dışı bırakılmakta ve gaz türbini devreye alınarak gemiye azami hız yaptırılabilir.

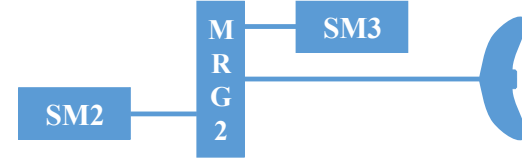
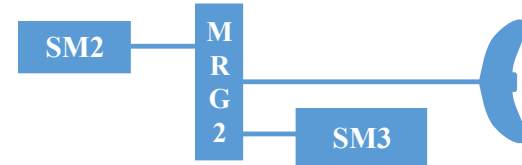
Altıncı seçenek CODLAG-CC olarak adlandırılmış olup şekilsel yapısı CODLOG-CC ile benzerlik göstermektedir. Bu seçenekte her şaft için de birer sevk elektrik motoru ve her iki şafta çapraz bağlanabilen bir gaz türbini bulunmaktadır. Düşük hız kademeleri için şaft başına birer sevk elektrik motoru kullanılmaktadır; bu durumda gemiye 18 knot hız yaptırılabilir. Bu hızdan yüksek hız kademeleri için sevk elektrik motorları gaz türbini ile birlikte kullanılarak gemiye azami hız yaptırılabilir.

Yedinci seçenek IFEP olarak adlandırılmış olup, bu seçenekte her bir şaft doğrudan birer sevk elektrik motoru tarafından döndürülmektedir.

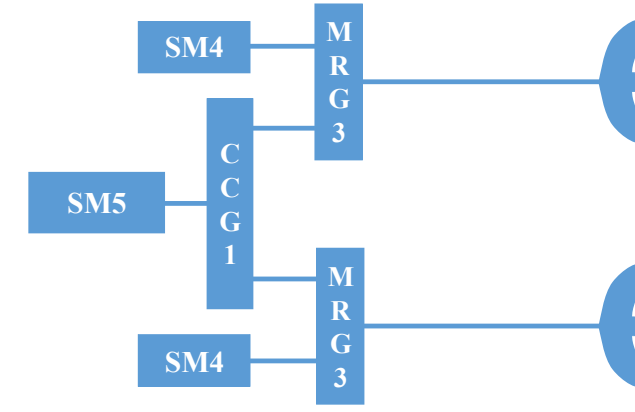
Sevk makinelerinin kullanım durumlarının belirlenmesinden sonra üreteç setlerinin özelliklerinin ve sayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Mekanik tahrikli olan seçeneklerin elektrik güç ihtiyacının belirlenebilmesi amacıyla Şekil 1.9’da bulunan değerler kullanılmıştır. Elektrikli tahrik seçeneklerinde bütünleşik mimari kullanılmış olup; bu kapsamda, elektrikli tahrik seçenekleri için Şekil 1.9’da bulunan değerlere, sevk elektrik motorlarını beslemek amacıyla her bir hız kademesi için ihtiyaç duyulan (ilave) elektrik gücü değerleri eklenmiştir.



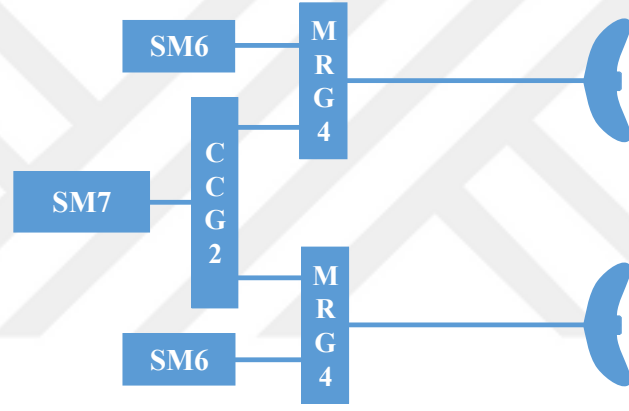
CODAD



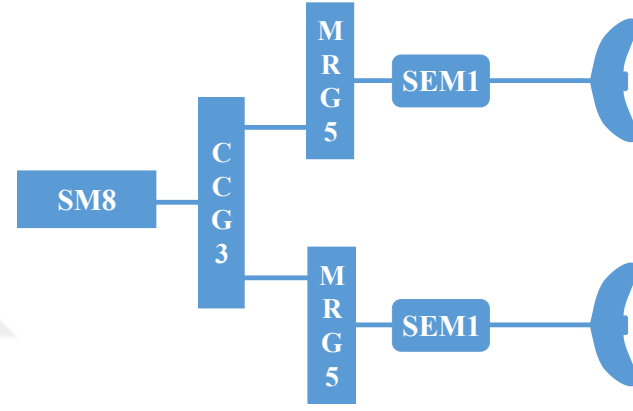
CODOG



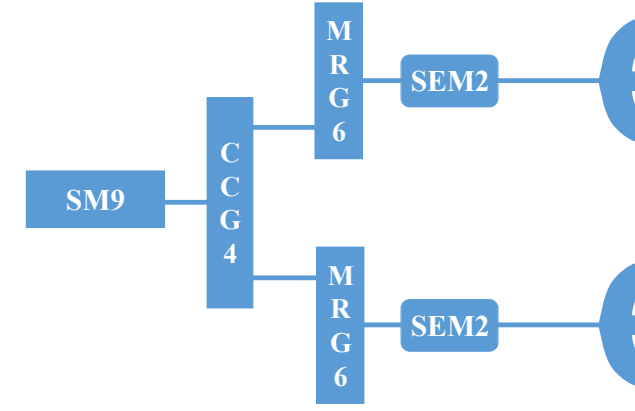
CODOG-CC



CODAG-CC



CODLOG-CC



CODLAG-CC

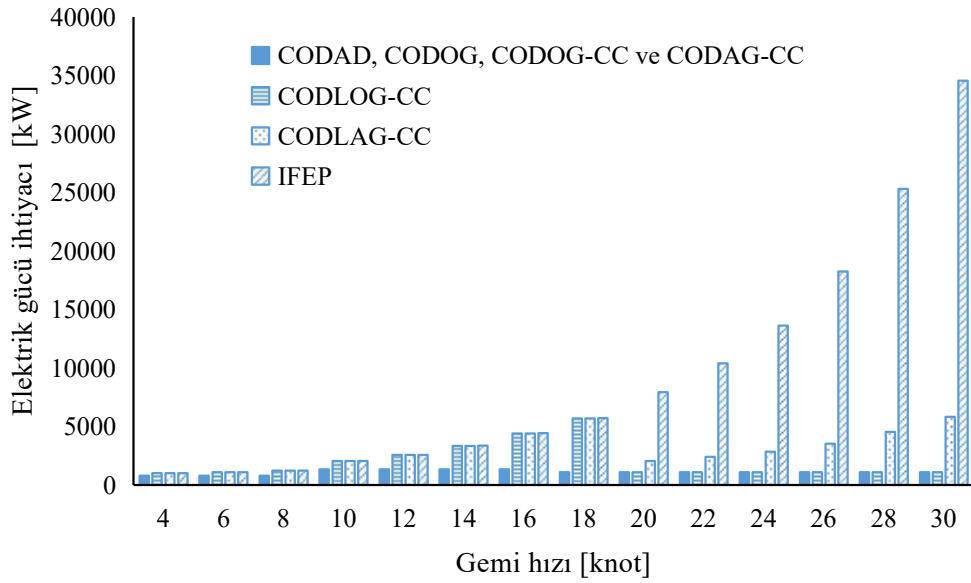


IFEP

CCG# : Çapraz bağlama devir düşürücü
 MRG# : Devir düşürücü
 SEM# : Sevk elektrik motoru
 SM# : (Isıl) sevk makinesi (dizel motor/gaz türbini)

Şekil 4.4 Jenerik fırkateyn için önerilen sevk sistemi seçenekleri [Cin ve Çelebi'den (2021b) uyarlanmıştır]

Şekil 4.4'te önerilen tüm seçeneklerin toplam elektrik yük ihtiyacı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Jenerik fırkateynin toplam elektrik gücü ihtiyacı

Dizel motorların, İkinci Bölüm'de belirtilen üstünlükleri nedeniyle, IFEP hariç diğer seçenekler için dizel motor tahrikli üreteç setleri kullanılmıştır.

IFEP seçeneğinde sevk, sevk elektrik motorları ile sağlandığından, sevk gücü ihtiyacının tamamı doğrudan elektrik güç sisteminden karşılanmaktadır. Gereken toplam elektrik gücünün büyüklüğü nedeniyle, bu seçenekte gaz türbini tahrikli üreteç setleri kullanılmıştır (Alexander, 2015; Voyce ve Wixey, 2019). Demirleme vb. durumlarda, elektrik güç ihtiyacının daha verimli olarak karşılanması maksadıyla ayrıca iki dizel tahrikli üreteç seti konulmuştur; bu üreteçler, düşük hızlarda elektrik sevk motorlarını beslemek için de kullanılabilir.

Şekil 4.5'e istinaden; yedeklenebilirlik, hassasiyet ve eniyilenmiş verimlilikle çalışma durumu ile yukarıda belirtilen kıstaslar dikkate alınarak, her bir seçenek için gereken üreteç setinin gücü hesaplanmış ve sayısı belirlenmiştir (Cin ve Çelebi, 2024). Bu işlemler için gerekli olan veriler ile setlerin seçiminde kullanılan bilgiler ve bunların alıntılandığı kaynaklar Ek-A'da yer almaktadır.

Jenerik fırkateyn için seçilmiş olan sevk makinelerinin ve üreteç setlerinin, görev profilindeki her bir hız kademesindeki güç ihtiyacına istinaden çalıştırılma durumu Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

IFEP seçeneği hariç olmak üzere, gemiye kurulacak dizel tahrikli üreteç setlerinin toplam sayısı, azami elektrik güç ihtiyacının karşılanması için belirlenmiş olan sayıdan bir fazla olacak şekilde seçilmiştir (MAN Diesel & Turbo, t.y.). Bu yaklaşım alanyazında “N+1” kuralı olarak adlandırılmaktadır (Kim ve ark., 2012; McCoy, 2015). Bu kural sayesinde yedek olarak bekletilen üreteç seti, diğer setlerden birinin herhangi bir sebeple devre dışı kalması durumunda devreye alınabilmektedir. Bu ilave set ile daha emniyetli görev yapma imkânı sağlanmış olmaktadır. Olağan durumlarda tüm setlerin birlikte kullanım kararı, gemi mürettebatına ve/veya geminin kullanıcı kurumuna bağlı olacaktır.

Tablo 4.2 Jenerik fırkateyn için seçilmiş olan sevk makinelerinin ve üreteç setlerinin çalıştırılma durumu

Hız Seçenek	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
CODAD	2xSM1											4xSM1		
	2xÜS1			3xÜS1				2xÜS1						
CODOG	2xSM2								2xSM3					
	2xÜS1			3xÜS1				2xÜS1						
CODOG-CC	2xSM4								1xSM5					
	2xÜS1			3xÜS1				2xÜS1						
CODAG-CC	2xSM6								2xSM6+1xSM7					
	2xÜS1			3xÜS1				2xÜS1						
CODLOG-CC	2xSEM1								1xSM8					
	1xÜS2				2xÜS2		3xÜS2		1xÜS2					
CODLAG-CC	2xSEM2								2xSEM2+1xSM8					
	1xÜS2				2xÜS2		3xÜS2		2xÜS2			3xÜS2		
IFEP	2xSEM3													
	1xÜS2				2xÜS2	1xÜS3						2xÜS3		

4.2 Jenerik ADKG'nin Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçenekleri

Jenerik ADKG için önerilen sevk sistemi seçenekleri, kullanılan makineler ve çalıştırılma durumları Cin ve Çelebi'den (2021a) uyarlanmış olup Şekil 4.6'da gösterilmiştir; bahse konu şekilde yer alan her bir seçenek ile ilgili açıklama ve incelemeler müteakip kısımlarda yapılmıştır. Jenerik fırkateynin aksine, ADKG'nin azami hızdaki güç ihtiyacı şaft başına birer dizel motordan karşılanabilmektedir. Bu kapsamda, birinci seçenek için bu tekil motor yapısı öngörülmüştür.

Bu bölümün başında, sevk gücünün bölünmesinin gerekçeleri açıklanmış olup, bu gerekçelere istinaden jenerik ADKG'nin sevk gücü, diğer üç seçenek için farklı sevk makinelerine bölünmüş/ayrılmıştır. Görev profiline istinaden, ADKG'nin yıllık görev süresinin önemli bölümü 10 knot ve altında kullanılmaktadır. Mekanik ve melez tahrikli sevk sistemi seçenekleri için sevk gücünün bölünmesi işlemi, bu hız kademesine istinaden yapılmıştır. Başka bir ifadeyle, sevk gücünün 10 knot ve altı ile 10 knot üzeri olmak üzere ikiye bölünecek şekilde sevk makinelerinin seçimi yapılacaktır.

Seçeneklerde yer alan sevk makinelerinin sahip olması gereken asgari fren gücü değerleri Üçüncü Bölüm'de açıklanan yöntem ve Şekil 3.9 kullanılarak hesaplanmış ve bu değerlere istinaden makineler seçilmiştir (Cin ve Çelebi, 2021a). Bu hesaplamaların yapılabilmesi amacıyla gerekli olan veriler ile makine seçiminde kullanılan bilgiler ve bunların alıntılandığı kaynaklar Ek-A'da yer almaktadır.

İkinci seçenek CODOD olarak adlandırılmış olup, bu seçenekte her şaft için ayrı olacak şekilde, farklı güçte ikişer dizel motor bulunmaktadır. Düşük hız kademeleri için şaft başına birer küçük güçlü dizel motor (SM3) kullanılmaktadır; bu durumda gemiye 10 knot hız yaptırılabilir. Yüksek hız kademeleri için küçük güçlü dizel motorlar devre dışı bırakılmakta ve şaft başına birer daha yüksek güçlü dizel motor (SM2) devreye alınmaktadır.

Üçüncü seçenek CODAD olarak adlandırılmış olup şekilsel yapısı jenerik fırkateynin birinci seçeneği ile benzerlik göstermektedir. Bu seçenekte her şaft için ayrı olacak şekilde, ikişer eş dizel motor bulunmaktadır. Düşük hız kademeleri için şaft başına birer dizel motor kullanılmaktadır. Yüksek hız kademeleri için dört dizel motor birlikte devreye alınmaktadır.

Dördüncü seçenek CODELOD olarak adlandırılmış olup, bu seçenek CODOD ile benzerlik göstermektedir; düşük güçlü dizel motorlar yerine sevk elektrik motorları konulmuştur. Bu motorlar, yukarıda belirtildiği üzere daha sessiz kullanım için devir düşürücünün kışına, “şaft üzerine” konulacak şekilde tasarlanmıştır; bu sayede devir düşürücü kullanılmadan motorlar çalıştırılabilmektedir.

Düşük hız kademeleri için şaft başına birer sevk elektrik motoru kullanılmaktadır; bu durumda gemiye 10 knot hız yaptırılabilir. Bu hızdan yüksek hız kademeleri için sevk elektrik motorları devre dışı bırakılmakta ve şaft başına birer dizel motor devreye alınmaktadır.

Sevk makinelerinin kullanım durumlarının belirlenmesinden sonra üreteç setlerinin özelliklerinin ve sayılarının belirlenmesi gerekmektedir.

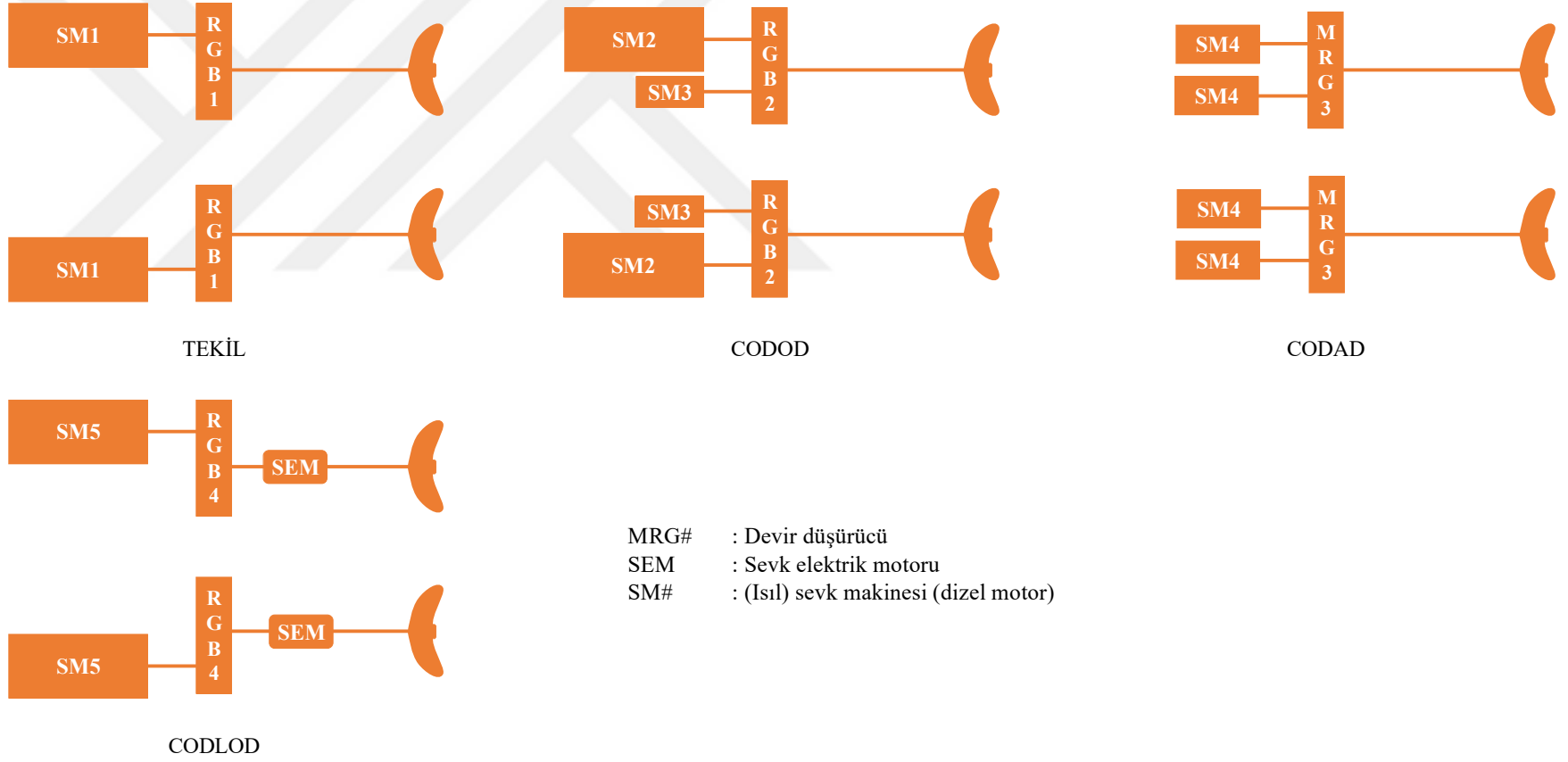
Mekanik tahrikli olan seçeneklerin elektrik güç ihtiyacının belirlenebilmesi amacıyla Şekil 1.10’da bulunan değerler kullanılmıştır. Elektrikli tahrik seçeneğinde bütünleşik mimari kullanılmış olup; bu kapsamda, CODELOD seçeneği için Şekil 1.10’da bulunan değerlere, sevk elektrik motorlarını beslemek maksadıyla her bir hız kademesi için ihtiyaç duyulan (ilave) elektrik gücü değerleri eklenmiştir. Şekil 4.6’da önerilen tüm seçeneklerin toplam elektrik yük ihtiyacı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Dizel motorların, İkinci Bölüm’de belirtilen üstünlükleri nedeniyle dizel motor tahrikli üreteç setleri kullanılmıştır.

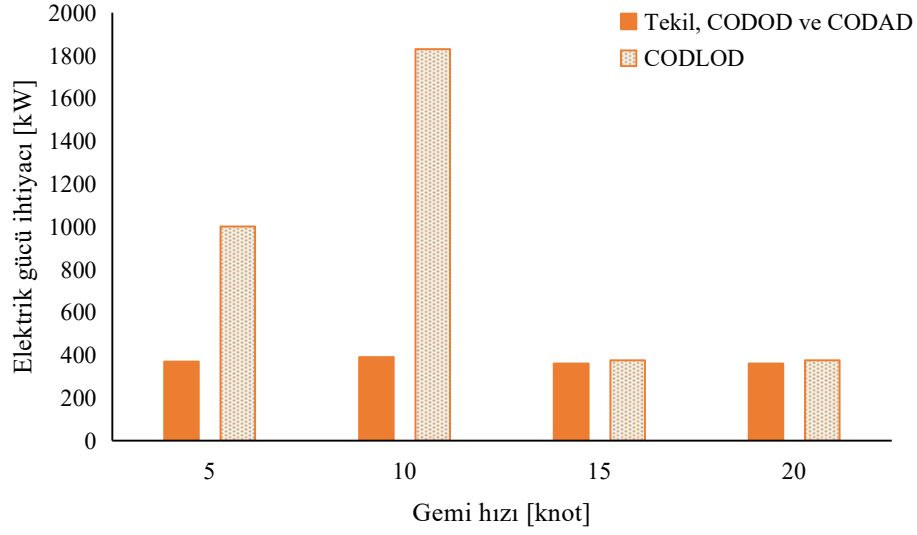
Şekil 4.7’ye istinaden; yedeklenebilirlik, hassasiyet ve eniyilenmiş verimlilikte çalışma durumu ile yukarıda belirtilen kıstaslar dikkate alınarak, her bir seçenek için gereken üreteç setinin gücü hesaplanmış ve sayısı belirlenmiştir. Bu işlemler için gerekli olan veriler ile setlerin seçiminde kullanılan bilgiler ve bunların alıntılandığı kaynaklar Ek-A’da yer almaktadır.

Jenerik ADKG için seçilmiş olan sevk makinelerinin ve üreteç setlerinin, görev profilindeki her bir hız kademesindeki güç ihtiyacına istinaden çalıştırılma durumu Tablo 4.3’te gösterilmiştir.

Jenerik fırkateyn için açıklanan ve uygulanan “N+1” kuralı, jenerik ADKG için de uygulanmıştır.



Şekil 4.6 Jenerik ADKG için önerilen sevk sistemi seçenekleri [Cin ve Çelebi'den (2021a) uyarlanmıştır]



Şekil 4.7 Jenerik ADKG'nin toplam elektrik gücü ihtiyacı

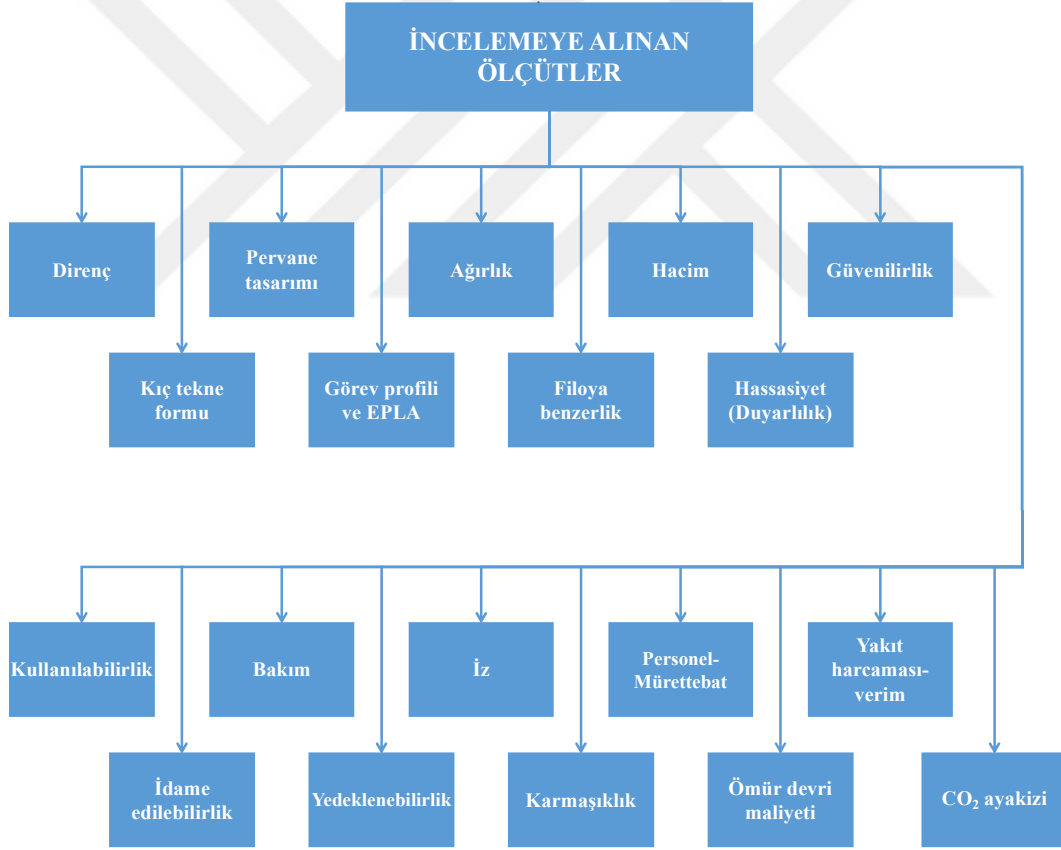
Tablo 4.3 Jenerik ADKG için seçilmiş olan sevk makinelerinin ve üreteç setlerinin çalıştırılma durumu [Cin ve Çelebi'den (2021a) uyarlanmıştır]

Hız Seçenek	5	10	15	20
TEKİL	2xSM1			
	1xÜS1			
CODOD	2xSM3		2xSM2	
	1xÜS1			
CODAD	2xSM4			4xSM4
	1xÜS1			
CODLAD	2xSEM		2xSM5	
	2xÜS2	3xÜS2	1xÜS2	

5

ÖLÇÜTLERİN BELİRLENMESİ, İNCELENMESİ VE HESAPLANMASI

Harp gemileri için sevk ve elektrik sistemi seçiminde, karar vericilerin değerlendirmelerini belirli ölçütlere istinaden yapmaları gerekmektedir. Bu kapsamda, bahse konu seçim için incelemeye alınan ölçütler Şekil 5.1’de gösterilmiştir (Cin ve Çelebi, 2021b; Engja, 2000; Molland ve ark., 2011; Schneekluth ve Bertram, 1998; Walsh ve Fletcher, 2004; Watson, 1998); inceleme için kullanılan kaynaklar sadece burada belirtilenlerle sınırlı olmayıp, ilgili ölçütün incelendiği kısımda atıfta bulunulmuş olan kaynaklardan da yararlanılmıştır.



Şekil 5.1 İncelemeye alınan ölçütler

Direnc, kıç tekne formu, pervane tasarımı, görev profili ve EPLA ölçütleri ile ilgili çözümler önceki bölümlerde ayrıntılı olarak yapıldığından bu bölümde tekrar incelenmemiştir. Bu ölçütlerin, yine önceki bölümlerde belirtildiği üzere, tüm

seçenekler için sabit tutulması nedeniyle bu tez çalışması kapsamı dışında kalması sonucu, bu tler seçim işlemlerine dâhil edilmemiştir.

Güvenilirlik, kullanılabilirlik, idame edilebilirlik, yedeklenebilirlik ve bakım ltlerinin i içe geçmiş bütünleşik ltler olması nedeniyle bu ltlere ilişkin çözümlleme tek başlık altında yapılmıştır. Aynı nedenlerle yakıt tüketimi-verim ve CO₂ ayak izi ltleri için de aynı usul uygulanmıştır.

5.1 Ağırlık

Güvenilir ağırlık tahmini gemi tasarımının başarıya ulaşmasında hayati önem taşımaktadır. Bu tahminde yapılan küçük hata geminin yetersiz performans göstermesine ve inşa programının aksatılmasına; tahminde yapılan büyük hatalar ise, en iyi durumda programda önemli gecikmelere en kötü durumda ise programdan vazgeçilmesine sebep olabilmektedir (Boze, 2003). Geminin ağırlığı ve kütle merkezi; maliyeti, tekne stabilite ve mukavemet özelliklerini, sevk gücünü, manevra kabiliyetini ve denizcilik özelliklerini etkilemekte veya bunlara bağlı olmaktadır. Ağırlık isterlerinin karşılanması diğer performans isterleri kadar önem teşkil etmektedir.

Ağırlık tahmini yapabilmek maksadıyla muhtelif yaklaşımlar kullanılmaktadır: parametrik, tasarımın başlangıç aşamasında elde bulunan belgeleme, gerçek ağırlık verileri veya bu yaklaşımların birleşimi (Boze, 2003). Bilginin sınırlı, zamanın ve bütçenin kısıtlı olduğu kavramsal tasarım aşamasında çoğunlukla parametrik yaklaşımlar daha uygun olmaktadır.

Edinilen tecrübeler, gemi tipinden bağımsız olarak boyut veya karmaşıklığın tasarım aşamasında artma eğiliminde olduğunu göstermiştir (Boze, 2003). Bunun sonucunda da LSW’de artış ve kütle merkezinde bir yükselme oluşacaktır. Tasarım sürecinin başında, müsaade edilen azami KG ile su çekiminin ve bunlarla ilgili olarak azami deplasmanın belirlenmesi gerekmektedir. Bu hayati derecede önemli karakteristikler, tekne formuna, su geçirmez blmelendirmeye, kompartımanlamaya ve hasarsız ile yaralı stabiliteye bağlıdır. Bu karakteristiklerin belirlenmesinden sonra, programa büyük bir zarar vermeden bu karakteristiklerde değişiklikler yapmak imkânsız hâle gelmektedir. Her ne kadar, tahmini ağırlık

karakteristikleri, tasarım ve inşaa süreçlerinde yakından izlense de bu tahminlerin doğrulanması geminin tesliminden hemen önce yapılabilmektedir.

Bir kısım kaynakta (örneğin Rolls-Royce, 2018 ve Sulligoi ve ark., 2012) elektrikli tahrikli sistemlerin ağırlık azaltımı sağladığı belirtilmiş olmakla birlikte, farklı kaynaklarda (örneğin Hodge ve Mattick, 1996 ve Tortarolo, 2000) ise elektrikli tahrikin ağırlık artışına neden olduğu bildirilmiştir. Ağırlık çözümlemesinin her bir gemi ve seçenek için ayrı olacak şekilde yapılmasının karar verme süreçleri için daha uygun ve doğru olacağı değerlendirilmektedir.

Tasarım aşamasında askerî gemiler için yapılan ağırlık çözümlemelerinde genel olarak belirli bir ağırlık artışı payının hesaplamalara katılması istenmektedir (Boze, 2003). Bu tez çalışması, sadece Dördüncü Bölüm’de belirtilen seçeneklerdeki bileşenleri kapsadığından, ağırlık hesaplamalarına bu tür bir ilave artış payı uygulanmamıştır.

Dördüncü Bölüm’de belirtilen seçeneklerde yer alan ısı sevk makinelerinin (dizel makineler ve gaz türbinleri) ve üreteç setlerinin ağırlık hesaplamaları için genel ağda mevcut üretici verileri kullanılmış, SEM’lerin ağırlık bilgileri, Dördüncü Bölüm’de belirtildiği üzere FFX-II fırkateyn programında kullanılan motorun üreticisinden alınmıştır; ilgili bilgiler Ek-A’da verilmiştir.

Devir düşürücülerin ve dönüştürücülerin ağırlıkları van Es’te (2011) yer alan yaklaşımla hesaplanmıştır. Bu kapsamda devir düşürücülerin ağırlıkları; tek veya çift giriş durumuna göre, sevk makinelerinden düşürücüye giren en yüksek güce sahip makinenin azami gücüne ve azami pervane şaftı devrine istinaden sırasıyla (5.1-5.2) eşitlikleri vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$Ağırlık_{devir\ düşürücü, tek\ giriş} = 0,293 \cdot \left(\frac{P_{in}}{N_{out}} \right), \quad [ton] \quad (5.1)$$

$$Ağırlık_{devir\ düşürücü, çift\ giriş} = 0,627 \cdot \left(\frac{P_{in}}{N_{out}} \right), \quad [ton] \quad (5.2)$$

N_{out} : azami pervane şaft devri [rpm]

P_{in} : sevk makinelerinden düşürücüye giren en yüksek güce sahip makinenin azami gücü [kW]

Dönüştürücülerin ağırlıkları (5.3-5.4) eşitlikleri vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$Ağırlık_{dönüştürücü} = 1500 + 750 \cdot S, [kg] \quad (5.3)$$

$$S = P_{SEM} / (\eta_{SEM} \cdot \eta_{dönüştürücü}) \quad (5.4)$$

P_{SEM} : SEM'in azami gücü [kW]

S : görünen güç [MVA]

η_{SEM} : SEM'in verimi [-]

$\eta_{dönüştürücü}$: dönüştürücünün verimi [-]

5.2 Filoya Benzerlik

Bir kurumun (filonun) farklı gemilerinde ortak parça ve/veya bileşenlere sahip sistem/cihazların kullanımı “filoya benzerlik” olarak tanımlanmaktadır. Filoya benzerlik, yedek parçaların depolanması ve personelin sistem/cihazlara aşinalığı ile ilgili bir husus olmaktadır (Cin ve Çelebi, 2021b).

Donanmalar farklı birimlerinde daha fazla ortak sistem kullanmaya çalışmaktadır (Wood, 2014). Bu durum, denizde ve kıyı tesislerinde çok sayıda platformda benzer donanım ve sistemin kullanılmasını sağlamaktadır. Donanım ve sistemlerin bu ortak özelliği, mürettebatın bir gemi sınıfından diğerine daha kolay geçişini sağlayarak farklı birimlerdeki eğitim yükünü de azaltabilmektedir.

Yeni tedarik edilen gemilerde kullanılan ve mevcut olan gemilerde kullanılmakta olan ortak ve/veya benzer sistem/cihazlarda ortak parçaların olması tedarik ve depolamayı kolaylaştırmaktadır.

Filoya benzerlik özelliği; lojistik, eğitim ve bakım açısından önemli bir kazanım ve üstünlük sağlamaktadır; bununla birlikte bu özellik, belirli üreticilere bağlı kalmayı da beraberinde getirmektedir.

Filoya benzerlik ölçütü kapsamında, önerilen seçeneklerde yer alan bileşenlerin özelliklerinin, bir filoda (kurumda) mevcut diğer sistem/cihazlarla benzerliğinin incelenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, bu tez çalışması herhangi bir kurumla ilişkili olmadığından ve/veya herhangi bir kurumu esas almadığından karşılaştırma

yapma imkânı bulunmamaktadır; bu nedenle bu ölçüt değerlendirmeye katılamamıştır.

5.3 Hacim

Havacılık (hava araçları) donanımı, makine hava emiş ve egzoz devreleri ve füze (güdümlü mermi) rampaları gemi boyuna etki eden ana unsurlar olmaktadır (Bricknell ve Partridge, 2007).

Dördüncü Bölüm’de belirtilen seçeneklerde yer alan ısı sevk makinelerinin (dizel makineler ve gaz türbinleri) ve üreteç setlerinin hacim hesaplamaları için genel ağda mevcut üretici verileri kullanılmış, SEM’lerin ağırlık bilgileri, Dördüncü Bölüm’de belirtildiği üzere FFX-II fırkateyn programında kullanılan motorun üreticisinden alınmıştır; ilgili bilgiler Ek-A’da verilmiştir.

Sevk makineleri ve üreteç setleri dışında kalan devir düşürücülerin ve dönüştürücülerin hacimleri van Es’t e (2011) yer alan yaklaşımla hesaplanmıştır. Bu kapsamda devir düşürücülerin hacimleri; tek veya çift giriş durumuna göre, sevk makinelerinden düşürücüye giren en yüksek güce sahip makinenin azami gücüne ve azami pervane şaftı devrine istinaden (5.5-5.7) eşitlikleri vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$Uzunluk_{devir\ düşürücü} = 0,5417 \cdot \left(\frac{P_{in}}{N_{out}} \right)^{0,3715}, \quad [m] \quad (5.5)$$

$$Genişlik_{devir\ düşürücü} = \sum_{i=1}^n 0,8412 \cdot \left(\frac{P_{in}}{N_{out}} \right)_i^{0,2723}, \quad [m] \quad (5.6)$$

$$Yükseklik_{devir\ düşürücü} = 0,9762 \cdot \left(\frac{P_{in}}{N_{out}} \right)^{0,2694}, \quad [m] \quad (5.7)$$

n : tek giriş için 1, çift giriş için 2

n_{out} : azami pervane şaft devri [rpm]

P_{in} : sevk makinelerinden düşürücüye giren en yüksek güce sahip makinenin azami gücü [kW]

Dönüştürücülerin hacimleri (5.4, 5.8-5.10) eşitlikleri vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$Yükseklik_{dönüştürücü} = 2,3 \text{ m} \quad (5.8)$$

$$Derinlik_{dönüştürücü} = 0,7 + 0,075 \cdot S, \quad [\text{m}] \quad (5.9)$$

$$Genişlik_{dönüştürücü} = \frac{7,5 + 1,35 \cdot S}{2,3 \cdot (0,7 + 0,075 \cdot S)}, \quad [\text{m}] \quad (5.10)$$

S : görünen güç [MVA]

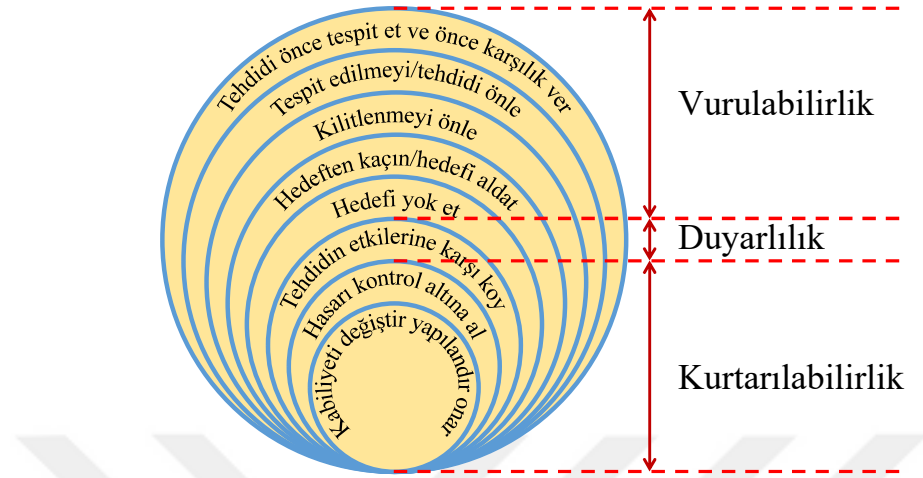
5.4 Hassasiyet (Duyarlılık)

Bir geminin, gemide mevcut kritik görev sistemlerinin ve gemi mürettebatının kendilerine verilen muharebe görevlerini yerine getirme ve mürettebatın ağır yaralanmasını veya kaybını önlemek maksadıyla mürettebata sağlanan koruma yeteneği “hayatta kalma (beka) kabiliyeti” olarak tanımlanabilmektedir (Department of the Navy, 2017). Bu yetenek; muharebe sırasında karşılaşılan riskin yanında, muharebe ile doğrudan ilgili olmayan bir olay (örneğin karaya oturma, çatma, yangın) için de kullanılabilir. Bu yeteneğin üç ana unsuru bulunmaktadır: geminin vurulabilirliği/algılanabilirliği (susceptibility), yara alma/zarar görme duyarlılığı/hassasiyeti (vulnerability) ve geri kazanabilirlik/kurtarılabilirlik (recoverability) (Department of the Navy, 2017; Turner ve ark., 2006; Worthington, 2015).

Beka kabiliyeti tüm gemiyi ilgilendiren ve kapsayan bütünsel bir kavramdır (Woolley ve ark., 2016). Bu hâliyle, daha yaygın bir şekilde “bütünleşik beka kabiliyeti” olarak adlandırılmaktadır. Bütünleşik beka kabiliyeti, bir tehdidi saptırmak ve bu tehdidin etkilerinin üstesinden gelmek maksadıyla belirlenen savunma katmanlarına dayanmaktadır. Bu katmanlar basit bir “soğan” benzeşimi kullanılarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Bu katmanlarda meydana gelen bozulma, beka kabiliyetini azaltabilmekte ve geminin gelen tehditlere karşı daha hassas olmasına sebep olabilmektedir.

Vurulabilirlik, geminin bir tehdidi tespit etme ve ona yanıt verme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır (Woolley ve ark., 2016). Bu kabiliyet, muharebe tehditlerini (füze, torpido vb.) ve barış dönemi tehditlerini (karaya oturma, çatma, yangın vb.) kapsamaktadır. Geminin bir tehde karşı vurulabilirliğini azaltmaya yönelik

önlemler, gemi savunmasının ilk katmanını oluşturmaktadır. Bu kabiliyet; operasyonel taktiklerin, iz azaltımının, karşı tedbirlerin, kendini savunma imkânının etkinliğinin bir fonksiyonu olmaktadır (Department of the Navy, 2017).

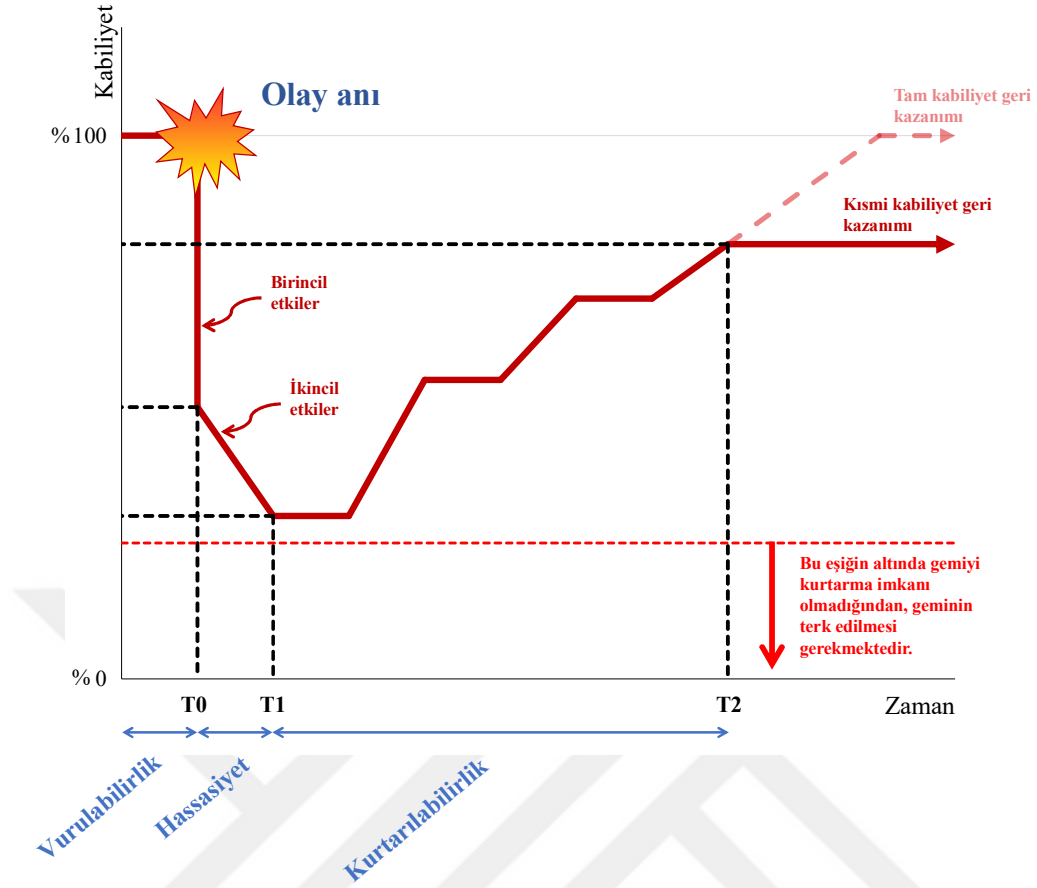


Şekil 5.2 Bütünleşik beka kabiliyetinin “soğan” benzeşimi [Woolley ve arkadaşlarından (2016) uyarlanmıştır]

Hassasiyet; geminin birincil (infilak, karaya oturma sonucu tekne hasarı vb.) ve ikincil (yangın, su basması vb.) hasar etkilerine dayanma/karşı koyma, gemiden istenen birincil muharebe görevlerini yerine getirme ve mürettebatın ağır yaralanmasını veya kaybını önlemek amacıyla mürettebatı koruma kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır (Department of the Navy, 2017; Woolley ve ark., 2016). Bu kabiliyet geminin tasarımının bir fonksiyonu olmaktadır (Woolley ve ark., 2016).

Kurtarılabirlik, geminin, ilk hasar etkilerinden sonra, hasarı kontrol altına almak, geminin kaybını önlemek, mürettebat kayıplarını en aza indirmek ve birincil görev yeteneklerini geri yüklemek ve sürdürmek amacıyla acil hareket etme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır (Department of the Navy, 2017). Bu kabiliyete etki eden en önemli husus mürettebatın davranışı olmaktadır (Woolley ve ark., 2016).

Bir geminin veya gemideki herhangi bir sistem/cihazın aldığı darbe/hasarın, meydana gelen bir infilakın veya oluşan yangın benzeri tehlikeli bir olayın başlangıcından itibaren, geminin kabiliyetinin zamana bağlı olarak genel değişimi yukarıda açıklanan üç unsur da dikkate alınarak Şekil 5.3’te gösterilmiştir (Gamble ve ark., 2014; Turner ve ark., 2006; Worthington, 2015).



Şekil 5.3 Alınan darbe/hasarın, meydana gelen bir infilakın veya oluşan yangın benzeri tehlikeli bir olayın başlangıcından itibaren, geminin kabiliyetinin zamana bağlı olarak genel değişimi [Gamble ve arkadaşlarından (2014), Turner ve arkadaşlarından (2006); Worthington'dan (2015) uyarlanmıştır]

T0 anında darbe/hasar, infilak veya tehlikeli olay meydana gelmektedir. Bu anda, birincil etkiler oluşmakta ve bu etkilere bağlı olarak kabiliyette ani bir düşüş meydana gelmektedir. T0-T1 arasındaki zaman diliminde ikincil etkiler oluşmakta ve bu etkiler, kabiliyetin daha da azalmasına neden olmaktadır. Bu azalma, ilgili kabiliyete ilişkin geminin sahip olduğu "hassasiyet" ile bağlantılı olmaktadır. T1 anından itibaren onarım, yapılandırma, değiştirme vb. "kurtarıcı" faaliyetler başlamaktadır; gerçek durumlarda bu faaliyetler, meydana gelen olayın durumuna, geminin tasarımına ve mürettebatın durumuna bağlı olarak T0 ile T1 arasında bir anda başlamış olmaktadır. Geri kazanım (kurtarma) faaliyetleri T2 anında sona ermektedir; bu anda azalan kabiliyet kısmen veya tamamen geri kazanılmış olmaktadır.

Kabiliyetteki azalma ve kabiliyette kaybolan miktarın geri kazanılması geminin bu kabiliyetle ilgili tasarımına ve mürettebatın bu kabiliyetle ilgili bilgi ve becerilerine

bağlı olmaktadır. Kaybedilen kabiliyetin miktarı, belirli bir eşğin altında olması durumunda, gemi ve/veya hasar alan sistem/cihaz kullanılamaz duruma gelmektedir. Geminin duruş kabiliyetinin belirli bir eşğin altına düşmesi durumunda, geminin terk edilmesi gerekmektedir. Kuramsal olarak geminin duruş kabiliyetinin “0” olması, geminin batmış olduğu anlamını taşımaktadır. Şekil 5.3’te gösterilen T0 anından önceki zaman dilimi, vurulabilirlik kabiliyetine karşılık gelen süreci temsil etmektedir.

Savaş hasarı veya kazalardan kaynaklanacak gemi görev performansındaki bozulmanın, tasarım esnasında yapılan dengeleme tahlili ve etkinlik değerlendirmelerinde dikkate alınması gerekmektedir (Department of the Navy, 2017). Bu kapsamda, hassasiyetin azaltılmasına yönelik tedbirlerin tasarım sürecinin başlangıcında (kavramsal tasarım aşamasında) alınması büyük önem teşkil etmektedir (Heywood ve Lear, 2006). Hassasiyetin azaltılması ile ilgili alınması gereken temel tedbirlerin maliyetleri daha ileriki tasarım aşamalarında yüksek olmaktadır. Tedbir alınması gereken hususlar; su geçirmez bölmeler, makinelerin yerleşimi, cephanelikler, yakıt depolama mahalleri, malzeme saklama mahalleri olarak sıralanabilmektedir (Heywood ve Lear, 2006). Yapılan çalışmalar esnasında, hassasiyetin azaltılması ile ilgili alınacak tedbirlerin, maliyetleri arttıracak hususunun dikkate alınması gerekmektedir (Kimber ve Thorne, 2013).

Sevk makinelerinin ve üreteç setlerinin gemi bünyesinde farklı mevkilere konumlandırılması hassasiyetin azaltılmasına fayda sağlamaktadır (Doerry ve Fireman, 2006; Schofield ve Wright, 2018; Terry ve Dullag, 1992). Dördüncü Bölüm’de belirtildiği üzere geleneksel mekanik tahrikli sevk sistemlerinde, sevk makineleri ve devir düşürücüler şaft hattı ile hizalanacak şekilde geminin alt bölmelerine konumlandırılmaktadır. Bu durum, hasar anında (özellikle su basması) sevk sisteminin bileşenlerinin çalışmasını olumsuz etkileyebilmektedir. Elektrikli tahrikli sistemlerde ise üreteç setleri geminin dikey ekseninde muhtelif bölgelerine (su kesiminin yukarısına) ve boyuna farklı bölmelere konumlandırılabilirler. Bu durumda, hasar almayan bölgede bulunan üreteçler tarafından belirli oranda elektrik enerjisi SEM’lere ve diğer kullanıcılara sağlanarak gemi hareket ettirilebilmekte ve hayati işlevleri yerine getirilebilmektedir. Bu hâliyle elektrikli tahrikli gemilerin hasara karşı hassasiyeti azaltılabilmektedir. Bununla birlikte, gemi bünyesine elektrik güç sisteminin bileşenlerini dağıtmanın getirebileceği

olumsuz stabilite etkisi, ilave maliyetler, ek ağırlık vb. olumsuz hususların da tasarım esnasında dikkate alınması gerekmektedir.

Sevk ve elektrik güç sistemi bileşenlerinin yedeklenmesi hassasiyetin azaltılmasına önemli katkı sağlayacaktır, bununla birlikte yukarıda da belirtildiği şekilde maliyetlerde artış oluşabilecektir. Yedekleme ile ilgili olarak sınıflandırma kurumlarının belirlemiş oldukları kurallara istinaden tasarım yapmak uygun olacaktır.

Hassasiyet kabiliyeti ile ilgili olarak seçenekleri değerlendirmek maksadıyla, asgari görev hızı olarak belirlenmiş olan hız kademeleri (fırkateyn için 14 knot ve ADKG için 10 knot) için Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te belirtilen makineler dışında kalan ve shaft hattına doğrudan bağlı olmayan, bu hâliyle geminin uygun herhangi bir mevkiye konumlandırılabilir olan makinelerin sayısı, hassasiyet kabiliyetinin ölçeği olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, 1-5 Likert tipi ölçek kullanılmış olup en düşük makine sayısı (0) için "1" ve en yüksek makine sayısı için "5" rakamı atanmıştır.

Bu tez çalışmasında örnek alınan gemi tipleri için önerilen sevk ve elektrik sistemi seçeneklerine ilişkin vurulabilirlik kabiliyetinin iyileştirilmesine yönelik iz azaltımı ile ilgili yapılan ayrıntılı değerlendirme bu bölümün "İz" başlığı altında verilmiştir.

Şekil 5.3'te gösterilen zaman akışı ve yukarıda yapılan tanımlamalar dikkate alındığında kurtarılabilirlik kabiliyetinin, seçeneklerin seçiminde bir ölçüt olarak dikkate alınamayacağı değerlendirilmiş olduğundan bu kabiliyet bu tez çalışması kapsamına alınmamıştır.

5.5 Güvenilirlik, Kullanılabilirlik, İdame Edilebilirlik, Yedeklenebilirlik ve Bakım

Bir harp gemisinde olması en çok istenen özellik güvenilirliktir (Kim ve ark., 2015). Genel anlamda güvenilirlik, bir ögenin belirli bir süre boyunca belirli koşullar altında gerekli bir işlevi yerine getirme yeteneği olarak tanımlanabilmektedir (Teixeira ve Guedes Soares, 2012). Teknik açıdan güvenilirlik, bir sistemin veya bileşenin belirli çalışma koşulları altında belirli bir zaman aralığında arıza yaşanmadan çalışma olasılığı ile ölçülmektedir. Güvenilirlik, matematiksel olarak

basit bir şekilde (5.11) eşitliği (Carazas ve de Souza, 2012; Dhillon, 2002) ile gösterilmektedir.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (5.11)$$

$R(t)$: t anında güvenilirlik

$F(t)$: birikimli arıza dağılım fonksiyonu (t anındaki arıza olasılığı)

$f(t)$: arıza olasılık yoğunluk fonksiyonu

Karmaşık bir sistemin güvenilirliği, sistemi oluşturan bileşenlere bağlı olmaktadır. Bu nedenle bileşenlerin sahip olduğu düşük güvenilirliklerin, sistemin güvenilirliğini nasıl etkilediğinin belirlenmesi gerekmektedir. Güvenilirlik çözümlemesinin sonucu genel olarak arızaya kadar geçen ortalama süre (mean time to failure-MTTF) olmaktadır. MTTF'nin matematiksel olarak basit bir şekilde (5.12) eşitliği (Rausand ve Høyland, 2004) ile gösterilmektedir.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (5.12)$$

$$MTTF < \infty$$

“ t_i ” zaman sonra görevini yapamaz duruma gelen “n” adet bileşenden oluşan bir sistemin MTTF'si (5.13) eşitliği ile hesaplanabilmektedir (Carazas ve de Souza, 2012).

$$MTTF = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \quad (5.13)$$

Her bir bileşenin güvenilirliğini çözümlemenin önemi, bileşenlerin güvenilirliği ile sistem kullanılabilirliği arasındaki yakın ilişkiden kaynaklanmaktadır (Carazas ve de Souza, 2012).

Tatmin edici çalışma süresi güvenilirlikle temsil edilirken, onarım süresi boyunca sistem davranışı da idame edilebilirlik ile temsil edilmektedir (Carazas ve de Souza, 2012). İdame edilebilirlik, arızalı bir ögenin kabul edilebilir çalışma durumuna döndürülme (onarılma) olasılığı olarak tanımlanabilmektedir (Dhillon, 2002). Bu kapsamda, idame edilebilirlik, bir ögenin belirli bir süre boyunca onarımının yapılma olasılığıdır. İdame edilebilirlik çözümlemesinin bir unsuru olan ortalama

onarım süresi (mean time to repair-MTTR) matematiksel olarak basit bir şekilde (5.14) eşitliği ile gösterilmektedir (Teixeira ve Guedes Soares, 2012).

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) dt \quad (5.14)$$

$m(t)$: onarım süresi yoğunluk olasılık fonksiyonu

i. arızadan sonra onarım süresi “ t_{ri} ” olan “ n_r ” adet onarım için MTTR, genellikle (5.15) eşitliği ile hesaplanabilmektedir (Carazas ve de Souza, 2012).

$$MTTR = \frac{1}{n_r} \cdot \sum_{i=1}^{n_r} t_{ri} \quad (5.15)$$

Arızalı bir ögenin onarımı veya değiştirilmesi için gereken süre MTTF'ye kıyasla çok kısa olduğunda, MTTF aynı zamanda arızalar arası ortalama süreyi (mean time between failures-MTBF) de temsil etmektedir; onarım veya değiştirime süresinin ihmal edilememesi durumunda MTBF, MTTF ile birlikte MTTR'yi de içermektedir (Rausand ve Høyland, 2004).

Güvenilirliğin ve idame edilebilirliğin bir fonksiyonu olan “kullanılabilirlik” (Tupper, 2013), belirlenen koşullar altında kullanılan ögenin herhangi bir zamanda çalıştırılabilir ve devreye alınabilir durumda olma olasılığı olarak tanımlanmakta (Dell'Isola ve Vendittelli, 2015) ve genellikle (5.16) eşitliği ile hesaplanabilmektedir (Carazas ve de Souza, 2012)

$$A = \frac{MTTF}{MTTR+MTTF} \quad (5.16)$$

Westwod ve arkadaşları (1989), güvenilirlik ve kullanılabilirlik arasındaki ilişkiyi, bir sevk sisteminin şaft başına çift (örneğin CODAD) veya tek makineli olma durumunu esas alarak açıklamıştır. Çift sevk makineli kurulumda, tek makineli kurulumla göre bir makinede arıza meydana gelme olasılığı iki kat fazla olmaktadır; bununla birlikte, bir makinenin kullanılamaması durumunda, çift sevk makineli kurulumda tüm şaft hattı gayri faal kalmayacağından, bu kurulumda sevk gücünün kullanılabilirliği daha yüksek olmaktadır.

Güvenilirlik tahmini; ilgili makinenin üreticileri tarafından ve/veya makinenin kullanımı esnasında toplanan veriler kullanılarak (Matika ve Mihanović, 2011; Russom ve ark., 2004) yapılabilmektedir (Carazas ve de Souza, 2012). Bununla

birlikte, sistem/cihazların güvenilirliği ile ilgili bilgiler üreticiler tarafından çoğunlukla paylaşılmamaktadır (Doerry ve Fireman, 2006). Dördüncü Bölüm’de önerilen seçeneklerin tüm bileşenlerinin güvenilirlik çözümlemelerine ilişkin bilgi açık kaynaklarda bulunamadığından ve bu bileşenlerin çalıştırılarak veri toplanması mümkün olmadığından, bu tez çalışmasında güvenilirlik-kullanılabilirlik-idame edilebilirlik kapsamında ölçütler değerlendirmeye alınamamıştır.

Bir ögenin ömür devri boyunca gerekli işlevi yerine getirebileceği bir durumda tutulması veya bu duruma geri getirilmesi amacıyla yapılan tüm teknik, idari ve yönetsel eylemlerin birleşimi “bakım” olarak adlandırılmaktadır (EN 13306:2017). Bu tanımdan hareketle; gerekli işlevini yerine getiremeyen bir ögenin, ilgili işlevi tekrar yerine getirebileceği duruma geri getirilmesi, başka bir ifadeyle, ögenin düzeltici bakımının (onarımının) yapılması ile ilgili kavramlar yukarıda açıklanmış ve bu kavramların bu tez çalışması kapsamına dâhil edilememelerinin gerekçesi belirtilmiştir.

Arıza onarımı haricinde yapılan diğer bakımlar, bir bileşenin işlevini yerine getirebileceği durumu belirli seviyede tutmak, başka bir ifadeyle, ilgili bileşenin arıza görme olasılığını düşürmek (güvenilirliği arttırmak) maksadıyla yapılmaktadır. Bu bakımlar esnasında oluşan “ortalama duruş süresi-OSD” (5.17) eşitliği ile hesaplanabilmektedir (Dhillon, 2002).

$$OSD = OBS + OLBS + OİBS \quad (5.17)$$

OBS : ortalama bakım süresi

OLBS : ortalama lojistik bekleme süresi

OİBS : ortalama idari bekleme süresi

Bahse konu bakımların ısı makinelere uygulanmasına yönelik muhtelif yaklaşımlar bulunmaktadır. Dizel motorlar için uygulanan en önemli bakım, motorun bileşenlerinin sökülerek temizlendiği, ölçüldüğü, değiştirildiği, işlendiği bakım olan “ana bakımdır”. Ana bakımlar yerinde veya ilgili motorun gemi dışına çıkarılması suretiyle atölye ortamında yapılabilmektedir. İki ana bakım arasında geçen süre TBO (time between major overhauls) olarak adlandırılmaktadır. TBO, dizel motorun kullanılacağı çalışma koşullarına göre üreticiler tarafından belirlenmektedir. Gaz türbinleri için de benzer yaklaşımlar mevcuttur. Gaz

türbinleri genel olarak emiş devreleri içine kurulan özel donanımlar vasıtasıyla gemi dışına çıkarılarak ana bakımları (veya büyük arıza onarımları) yapılabilmektedir. Gemiden çıkarılmak istenen gaz türbinlerinin kıyada bulundurulmuş yedek gaz türbinleri ile değiştirilmesi sayesinde gemiler çok kısa süre içinde görevlerine döndürülebilmektedir. Isıl makinelerin ana bakımları haricinde olan diğer bakımları (ara bakımlar), gemilerin görev planlamaları aksatılmadan seyir esnasında ve/veya gemilerin limanda bulundukları dönemde yapılabilmektedir.

Yukarıda yapılan çözümlemelere istinaden Dördüncü Bölüm’de önerilen sevk makinelerinin ana bakımları kapsamında; gaz türbinleri hava emiş devrelerinden çıkarılarak değiştirilebildiğinden (Rolls-Royce, 2021) ve bu değişimin süresi ihmal edilebilecek kadar kısa olduğu değerlendirildiğinden, bu makineler için TBO, “0” olarak; dizel motorlar için üreticiler tarafından verilen ve Ek-A’da bulunan değerler TBO değeri olarak; diğer bileşenlere uygulanacak bakımların, gemilerin görev planlamalarını aksatabilecek bakımlar olmadığı değerlendirildiğinden, bahse konu bileşenler için TBO, “0” olarak belirlenmiştir. TBO değerleri, gemilerin yıllık seyir süreleri dikkate alınarak “yıl” birimine dönüştürülmüştür. Belirtilen bu değerler, bakım ölçütü için oluşturulan ve Tablo 5.1’de gösterilen Likert tipi ölçek ile ilişkilendirilerek kullanılmıştır. Bu yaklaşım, doğrudan duruş süresini verememekle birlikte, iki ana bakım arasında geçecek süreyi temsil etmektedir.

Bu alt bölümde yapılan çözümlemeler de dikkate alındığında, özellikle güvenilirlik açısından sistem/cihazların yedeklenmesi vazgeçilmez bir gerekliliktir (Kim ve ark., 2015). Yedeklenebilirlik, bir bileşenin aynı veya muadil başka bir bileşen tarafından görevinin yerine getirilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Hassasiyet kabiliyeti alt bölümde yapılan çözümlemelerde, yedeklemenin, gemilerin hassasiyet kabiliyetini arttırdığı değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, her bir seçenek için asgari görev hızını (fırkateyn için 14 knot ve ADKG için 10 knot) tek başına yapabilecek makinelerin sayısı, yedeklenebilirlik ölçütünün ölçeği olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, Tablo 5.2’de gösterilen Likert tipi ölçek kullanılmıştır.

Tablo 5.1 Bakım ölçütü için önerilen ölçek

TBO	Ölçek
TBO>40 yıl	5
30<TBO≤40	4
20<TBO≤30	3
10<TBO≤20	2
TBO≤10	1

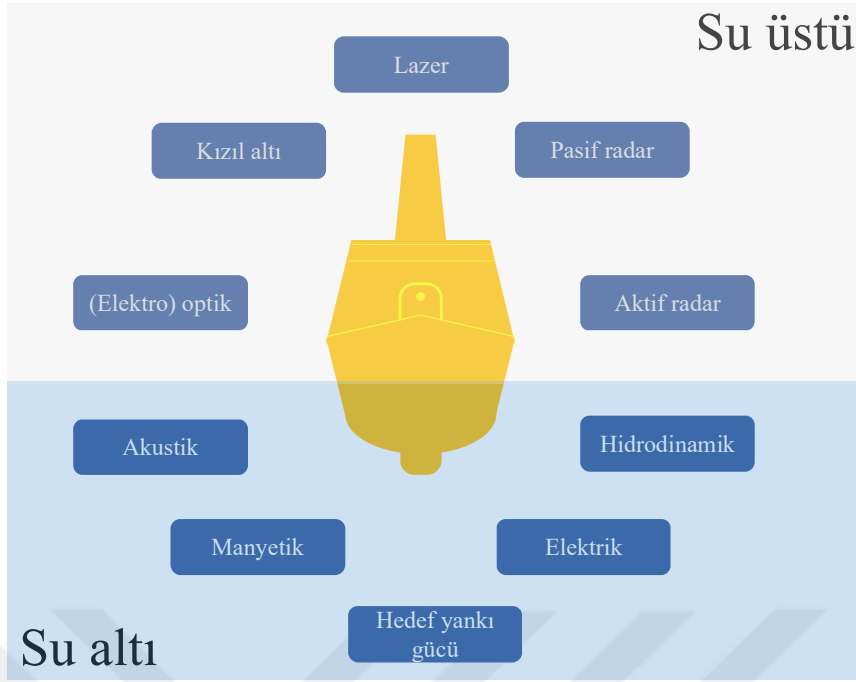
Tablo 5.2 Yedeklenebilirlik ölçütü için önerilen ölçek

Asgari görev hızını tek başına yapabilecek makinelerin sayısı	Ölçek
4	4
3	3
2	2
1	1

5.6 İz

Harp gemileri görevleri esnasında muhtelif tehditlere maruz kalmaktadır. Bu tehditler muhtelif algılayıcılar ve silahlardan gelmektedir (Galle, 2002). Gemilerin bu tehditlere algılanabilirliğini/tespit edilebilirliğini en aza indirecek ve dengeli bir “görünmezlik” sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu nedenle gemilerin izlerini mümkün olduğunca tespit edilemeyecek ya da geç tespit edilecek şekilde tedbir alınması gerekmektedir. Gemilerin izleri Şekil 5.4’te gösterilmiştir (Galle, 2002). Bu izlerden görünür, lazer, radar, akustik, manyetik (elektrik), kızıl altı izler makine sistemleri kapsamına girmektedir.

Görünür, lazer ve radar izleri makinelerin baca yapıları ve hava emiş devreleri ile ilişkilendirilebilmekle birlikte, gemi gövdesinin/binasının tasarımı bu tez konusu kapsamı dışında olduğundan bahse konu izler değerlendirmeye alınmamıştır. Belirtilen diğer izlerle ilgili çözümleme müteakip kısımlarda yapılmıştır.



Şekil 5.4 Gemi izleri [Galle'den (2002) uyarlanmıştır]

5.6.1 Manyetik iz

Gemilerin yapısı ve üzerindeki sistem/cihazların neden olduğu elektromanyetik alandaki değişim veya bozulma ile tetiklenen mayınlar, harp gemileri için hayati tehlike oluşturmaktadır. Bu tehditlere karşı gemilerin korunması gerekmektedir.

Deniz suyunda elektromanyetik alanların yayımında yaşanan kayıplar nedeniyle gemilerin elektromanyetik izi ile ilgili genel olarak dikkate alınan frekans bölgeleri ULF (~0-3 Hz) ve ELF'nin (3 Hz-3 kHz) alt bölgeleridir (Holmes, 2006/2022). ULF bandında gemi kaynaklı dört ana manyetik alan kaynağı bulunmaktadır:

- Gemi gövdesinin, makine sistemleri ve donanımın yapımında kullanılan ferromanyetik çeliğin mıknatıslanması,
- Girdap akımları,
- Gemi gövdesinin içinde ve çevresinde akan korozyon akımları,
- Elektrik motorlarında, üreteçlerde, dağıtım kablolarında, devre kesicilerde ve gemide bulunan diğer aktif devrelerde dolaşan akımlar.

Gemilerin yukarıda belirtilen manyetik izlerinin azaltılmasına yönelik muhtelif tedbirler alınabilmektedir. Bunlar arasında ferromanyetik çelik nedeniyle oluşan kalıcı manyetik alanın sönmülmesi için uygulanan “deperming” (İm ve ark.,

2021), indüklenen manyetik alanın sönümlenmesi için uygulanan “degaussing” (Bekers ve Lepelaars, 2013) ve korozyon akımlarına karşı uygulanan “aktif şaft topraklaması” (Thompson ve ark., 2000) yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemler tüm gemiyi kapsayacak şekilde uygulandıklarından, manyetik iz ölçütü bu tez çalışması kapsamına alınamamıştır.

5.6.2 Akustik (Gürültü) İz

Gemilerden yayılan gürültü, sonar veya gürültüye duyarlı su altı silahları tarafından algılanabilmekte ve gemilere hayati tehlike oluşturabilmektedir (de Jong, 2009). Bu gürültünün genel olarak üç kaynağı bulunmaktadır: iç kaynaklardan (makinelere ve donanımları) yayılan gürültü, hidrodinamik gürültü ve pervane gürültüsü (Mer ve ark., 2006).

Makinelerin neden olduğu gürültünün büyüklüğü, makinenin tipine, gemideki konumuna ve gemi tasarımıyla ilgili diğer etkenlere bağlı olarak değişmektedir (Spence ve Fischer, 2017). Makineler bağlı oldukları gemi gövdesinde titreşim ve bulundukları mahale hava vasıtasıyla gürültü yaymaktadır. Bu yayımlar çeşitli yollar boyunca ilerleyerek gürültü olarak suya yayılmaktadır.

Gürültü tahmini için sistem/cihaz üreticileri tarafından gerekli verilerin sağlanması gerekmektedir (Liwång ve ark., 2000; Palomo, 2014). Üreticilerden elde edilen verilere istinaden, geminin yapısal incelemesi de yapılmakta ve gerekli görülen gürültü azaltma tedbirleri uygulanmaktadır (Ishii ve ark., 2020). Bu tedbirler arasında, makineleri gemi gövdesine sönümleyiciler vasıtasıyla irtibatlamak ve/veya makineleri sesi azaltan kapsüller içerisine koymak yer almaktadır (IMO, 2019). Jenerik gemilerin gövdelerinin yapısal verileri ve seçeneklerin bileşenlerinin gürültü ile ilgili verileri bulunmadığından, gürültü ölçütü değerlendirmeye alınamamıştır.

5.6.3 Kızıl Altı İz

Kızıl altı güdümlü mermiler deniz, hava ve kara harp ortamlarında önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu tehditlere karşı koymak amacıyla teknikler geliştirilmesi, askerî platformları korumak için büyük önem teşkil etmektedir (Gray ve ark., 2012).

Kızıl altı güdümlü sistemleri pasif sistemlerdir; hedefin tespiti ve takibi amacıyla hedeften yayılan radyasyonu kullanmakta olduklarından aktif sistemlerde olduğu

şekilde ayrıca hedefe herhangi bir radyasyon göndermelerine gerek bulunmamaktadır (Choudhary ve ark., 2022). Bu durum da bu tehditlerin tespit edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, gemilerin, algılamayı geciktiren ve bu sayede tespit edilebilirliklerini azaltan iz baskılama (küçültme) sistemleriyle donatılması esastır. Daha küçük bir iz, daha küçük bir algılama (kilitlenme) aralığı ve dolayısıyla, “Hassasiyet” başlığı altında belirtildiği üzere bir tehdit belirlendikten sonra karşı tedbirleri uygulamaya koymak için daha fazla zaman sağlamaktadır. Birçok modern güdümlü mermi, ilk kitleme sağladıktan ve izleme başladıktan sonra kendilerini sahte kilitlenmelere karşı koruyabildiğinden, gelen tehditlerin gemiden önce aldaticılara kilitlenmesinin sağlanması, geminin bekası için hayati önem teşkil etmektedir (Choudhary ve ark., 2022; Thompson ve ark., 2000).

Bir kızıl altı güdümlü mermi arayıcısının bir hedefe (gemiye) kilitlenebilmesi için geminin, arka planından (deniz, gökyüzü, kara kütlesi veya bunların herhangi bir birleşimi) ayırt edilebilmesi, başka bir ifadeyle geminin kızıl altı emisyonları ile arka planın izi arasında bir kontrastın oluşması gerekmektedir (Galle ve Schleijpen, 1998; Menaka ve ark., 2020; Thompson ve ark., 1998). Kontrast izi, arayıcıda alınan hedef sinyalinden arka plan parlaklığının çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Kontrast azaldıkça, kilitlenme mesafesi de azalmaktadır (Menaka ve ark., 2020).

Mutlak sıfırın üzerinde sıcaklığa sahip tüm nesneler, aşağıda açıklanmış olan Planck Dağılımı’na istinaden elektromanyetik ışınım yaymaktadır (Driggers ve ark., 2012). Elektromanyetik ışınım, frekans ve dalga boyu ile tanımlanmaktadır (Harris, 1999). Spektral dağılımda 0,75-1000 μm dalga boyları arasında kalan bölge “kızıl altı bölge” olarak tanımlanmaktadır (Choudhary ve ark., 2022; Galle ve Schleijpen, 1998). Bu bölge Tablo 5.3’te gösterildiği şekilde alt bölgelere ayrılmaktadır (Choudhary ve ark., 2022; Galle ve Schleijpen, 1998). Tablo 5.3’te belirtilenlerden farklı bölge tanımları da yapılmış olup, bu konuyla ilgili bakınız Driggers ve arkadaşları (2012).

Atmosfer, kızıl altı ışınımın dalga boyuna bağlı olarak, ışınımın bir kısmını geçirmekte, bir kısmını ise yutmaktadır (Galle ve Schleijpen, 1998). Kızıl altı spektrumunda, atmosferik yutmanın düşük ve kızıl altı ışınım geçirgenliğinin yüksek olduğu sadece birkaç bölge bulunmaktadır; bu bölgeler genellikle “atmosferik pencereler” olarak tanımlanmaktadır (Rao ve Mahulikar, 2005).

Tablo 5.3 Kızıl altı bölgenin alt bölgeleri (Choudhary ve ark., 2022; Galle ve Schleijpen, 1998)

Kızıl altı alt bölge adı	Azami dalga boyu [μm]	Kaynak sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$]
Yakın kızıl altı (NIR)	0,75-3,00	3600-700
Orta kızıl altı (MIR)	3,00-6,00	700-200
Uzak kızıl altı (FIR)	6,00-15,00	200- (-)100
Çok uzak kızıl altı (xIR)	15,00-1000	(-)100-(-)270

Işının yayılması genellikle siyah cisim kavramı ile ele alınmaktadır. Siyah cisimden yayılan ışının (spektral yayma) gücü, “Planck Dağılımı” olarak bilinmekte ve (5.18) eşitliği ile hesaplanmaktadır (Harris, 1999; Incropera ve DeWitt, 1996). Farklı sıcaklıklar ve dalga boyları için bu eşitliğin aldığı değerler Şekil 5.5’te gösterilmiştir (Incropera ve DeWitt, 1996).

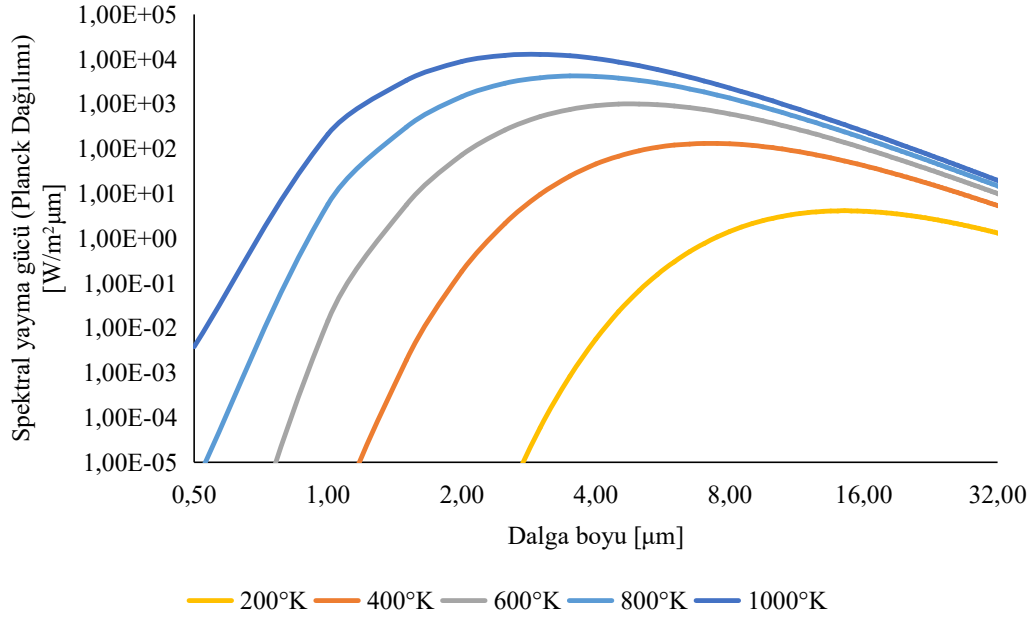
$$M_{\lambda} = \frac{3,74177487 \cdot 10^8}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{1}{e^{(1,43876866 \cdot 10^4 / \lambda \cdot T_t)} - 1} \right) \quad (5.18)$$

M_{λ} : siyah cisimden yayılan ışının (spektral yayma) gücü (Planck Dağılımı)
[W/m² μm]

T_t : mutlak sıcaklık [$^{\circ}\text{K}$]

λ : dalga boyu [μm]

Şekil 5.5 incelendiğinde; spektral yayma gücünün dalga boyuna göre sürekli değişim gösterdiği, belirli bir dalga boyunda bu gücün sıcaklıkla arttığı, sıcaklığın artmasıyla göreceli olarak daha kısa dalga boylarında daha fazla ışının yayıldığı gözlemlenmektedir (Incropera ve DeWitt, 1996). 100 $^{\circ}\text{K}$ üzerindeki sıcaklıklar için belirli bir sıcaklıkta en yüksek güce sahip dalga boyu (5.19) eşitliği ile verilen Wien Yer Değiştirme Yasası ile hesaplanabilmektedir (Harris, 1999; Mann, 2009). Bu eşitliğe istinaden, en yüksek gücün gerçekleştiği dalga boyu, artan sıcaklıkla birlikte kısa dalga boylarına kaymaktadır (Incropera ve DeWitt, 1996).



Şekil 5.5 Siyah cisimden yayılan ışınımın (spektral yayma) gücü [Incropera ve DeWitt'ten (1996) uyarlanmıştır]

$$\lambda_{R,max} \cdot T_t = 2898 \quad (5.19)$$

$\lambda_{R,max}$: en yüksek gücün gerçekleştiği dalga boyu [μm]

T_t : mutlak sıcaklık [$^{\circ}\text{K}$]

Bir geminin kızıl altı izi, dâhilî ve haricî olmak üzere iki ana bileşenden/kaynaktan oluşmaktadır (Thompson ve ark., 1998). Dâhilî kaynaklar; makinelerden ve diğer ekipmanlardan atılan ısıyı, makinelerden çıkan egzoz ürünlerini, havalandırma sistemlerinden gelen atık havayı ve ısıtılmış iç alanlardan kaynaklanan ısı kayıplarını içermektedir. Birincil dâhilî kızıl altı kaynağı, gemideki makineler, özellikle sevk makineleri ve elektrik üreteçleridir. Bu makinelerden yayılan atık ısı ve yanma ürünleri dâhilî kaynakların en önemlisidir.

Gemide kullanılan dizel motorlardan yayılan egzoz gazlarının sıcaklıkları 250-600°C iken, gaz türbinlerinden yayılan egzoz gazı sıcaklıkları 500-600°C olmaktadır (Galle ve Schleijpen, 1998). Bu makinelerden yayılan egzoz gazı dumanı üç ana kızıl altı ışınım kaynağı oluşturmaktadır: CO₂, karbon parçacıkları (kurum) ve yanmamış yakıt. Egzoz gazı dumanı tarafından yayılan ışınım, dumanın sıcaklığına, makine gücüne, kimyasal içeriğe ve sistemin yakıtı tamamen yakma kabiliyetine bağlı olmaktadır.

Yukarıda belirtilen dizel motorlarının ve gaz türbinlerinin sıcaklıklarından kaynaklı azami kızıl altı ışınının dalga boyları, Wien Yasası'na istinaden MIR bölgesine denk gelmektedir (Galle ve Schleijpen, 1998). Diğer bir MIR yayıcısı, sıcak egzoz gazlarının taşınmasıyla ısıtılan bacadır. Egzoz devresinin üst kısmı, özellikle gemi yalpa hareketi yaptığında, yataya yakın noktalarda görülebilmektedir.

MIR bölgesi, esas olarak, “sıcak noktaların” tespiti/izlenmesi için basit MIR dedektörlerinin mevcudiyeti nedeniyle genellikle güdümlü mermi arayıcı başlıkları için kullanılmaktadır (Galle ve Schleijpen, 1998). Bu hâliyle, egzoz dumanı ve görünür egzoz devresi, kızıl altı güdümlü mermiler için mükemmel hedeflerdir (Choudhary ve ark., 2022).

Dumanın kendisinin doğrudan kızıl altı kaynağı olmasının yanında; egzoz dumanı, direkleri ve direklerde monte edilmiş elektronik cihaz/aksamını 100-200°C'a kadar ısıtabilmekte, bu ısınma da su seviyesinden çok yüksekte çok büyük bir sıcak nokta oluşmasına neden olmaktadır. Bu sıcaklıklar, ayrıca, direğe monte edilmiş olan hassas elektronik cihaz/aksamın arızalanmasına da neden olabilmektedir (Thompson ve ark., 1998).

Haricî kızıl altı iz kaynakları, çevreden alınan ışınımı yutan ve/veya yansıtan geminin gövde ve üst yapısının yüzeyleridir. (Thompson ve ark., 1998). Genel olarak FIR bölgesindeki izin en önemli kaynağı olan bu yüzeyler; makine bölmelerinin dış gövde/üst yapı kaplamasının; makine ve/veya HVAC sistemleri tarafından içten; güneşin ışınımıyla dışarıdan ısıtılmaktadır. Belirtilenlerin dışında diğer iz kaynakları: ısıtmalı köprüüstü pencereleri, silah ısıtıcıları ve emici havalandırma sistemleridir (Galle ve Schleijpen, 1998).

Yukarıda belirtildiği üzere gemiden yayılan kızıl altı ışınının, geçirgenliğin yüksek olduğu iki atmosferik pencereye (3-5 µm aralığındaki MIR ve 8-14 µm aralığındaki FIR) denk gelmesi nedeniyle, güdümlü mermi arayıcılarının, bu bölgeler içinde çalışacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Örneğin Penguin benzeri kızıl altı güdümlü mermilerin arayıcıları (Type IV), MIR bölgesinde çalışmaktadır (Thompson ve ark., 2000).

Baca çıkışı, egzoz dumanı ve egzoz gazının ısıttığı direk kısmından kaynaklı kızıl altı izi azaltmanın en etkili yöntemi egzoz gazlarının baskılanmasıdır (Thompson ve ark., 1998, Thompson ve ark., 2000).

Baskılamanın türüne ve seviyesine bağlı olarak, geri basınca bağlı özgül yakıt tüketimi (specific fuel consumption-sfc) artışı (Hiscoke, t.y.), baskılama donanımının ağırlığına bağlı olarak stabilitenin olumsuz etkilenmesi (Galle ve Schleijpen, 1998) benzeri olumsuzluklar oluşabilmektedir.

Bu tez çalışmasında kızıl altı iz incelemesinin, seçeneklerde yer alan ısı sevk makinelerinin azami güçteki verilerinin kullanılarak yapılması esas alınmıştır. Yukarıda da belirtildiği üzere, kızıl altı iz, yayılan ışıının (spektral yayma) gücü ile ilgili olduğundan; azami hız için devrede olan ısı sevk makinelerinden (IFEP için gaz türbini tahrikli üreteç setlerinden), azami güçte en yüksek egzoz sıcaklığına sahip olanının egzoz gazı sıcaklıkları kullanılarak her bir seçenek için yayılan ışıının (spektral yayma) gücü, (5.19) eşitliği vasıtasıyla hesaplanmış ve iz ölçütü olarak kullanılmıştır.

5.7 Karmaşıklık

Karmaşıklığın tanımı ile ilgili birçok yaklaşım bulunmakla birlikte; pek çok tanım, karmaşıklığın bir sistemdeki çok sayıda ögenin durumunu ve ögeler arasındaki çok sayıda ilişki biçimini ifade ettiğini varsayma veya kabul etme durumunda olmaktadır (Caprace ve Rigo 2011). Aynı zamanda karmaşıklık ve basitlik göreceli kavramlardır ve bu kavramlar zamanla değişebilmektedir.

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere harp gemileri, oldukça karmaşık sistemlerin sistemidir. Bu sistemler arasında bulunan sevk ve elektrik güç sistemi bileşenleri oldukça yüksek sayıda ve birbiri ile etkileşimde olan alt bileşen/parçadan oluşmaktadır. Bu sistemlerdeki tüm bileşenlerden çevre bileşenlerle uyumlu bir şekilde görevlerini yerine getirmesi istenmektedir. Hem bileşenlerin hem de bu bileşenlerin oluşturduğu sevk ve elektrik güç sisteminin tasarım ve üretimi karmaşık işlemler sürecidir.

Mekanik kısmının yanında elektronik bileşenler de karmaşık donanım ve yazılımlara sahip olmaktadır. Çağdaş askerî gemilerde kullanılmakta olan makinelere kumanda eden kumanda birimlerinde ve gelişmiş otomasyona sahip bütünleşik platform yönetim sistemlerinde (integrated platform management system-IPMS) (Miners ve Arikkat, 2018), elektronik donanım ve yazılımlar yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu donanım ve yazılımlar binlerce veriyi algılamakta ve

işlemektedir. Yapılan her eklenti sistemi daha da karmaşıklarıştırmakta ve yönetimini güçleştirmektedir. Gelinek teknoloji seviyesinde bu tür karmaşıklıkların beraberinde getireceğı risklerin uygun şekilde değerkendirilmesi ve ilgili tedbirlerin alınması gerekmektedir. Elektronik donanımlar çoğunlukla modüler yapıda olduğundan, meydana gelen bir arızada ilgili bileşeni (örneğin işlem kartı) değıştirmek ve uyumlandırmak suretiyle arıza genellikle tam veya kısmi olarak giderilebilmektedir. Mekanik sistemlerde/bileşenlerde ise meydana gelen mekanik arızanın tespit ve giderilmesi uzun zaman alabilmekte ve hasar alınmış olması durumunda sistem/bileşen kullanılamaz hâle gelebilmektedir.

Yukarıda belirtildiğı üzere, sistemler için karmaşıklık tanımı yapmak oldukça zor bir olgudur. Dördüncü Bölüm’de önerilen seçenekleri, karmaşıklık kavramı için birbiriyle karşılaştırılabilecek ölçek için de aynı durum geçerli olmaktadır.

Bu tez çalışmasında karmaşıklık ölçütü için, gemide mevcut en büyük ve hantal cihaz olan ve ayrıca oldukça karmaşık mekanik aksama sahip olan devir düşürücüler esas alınmıştır. Düşürme oranı ve hız kademesi sayısı devir düşürücülerin karmaşıklığını belirleyen iki önemli etkidir. Bu kapsamda, seçeneklerde önerilen devir düşürücülerin devir düşürme oranı ve hız kademesi sayısı, karmaşıklık ölçütü için ölçek olarak belirlenmiştir.

5.8 Personel-Mürettebat

Gemi boyutlarını ve maliyetleri doğrudan etkilediğinden, insan gücü ile ilgili çözümlerlerin gemilerin tasarımlarının erken safhasında yapılması gerekmektedir (Scofield ve Brown, 2007). Mürettebat bir geminin en önemli maliyet kalemi olduğundan, mürettebat sayısının mümkün olduğunca az olması istenmektedir. Bununla birlikte, maliyeti düşürmek için ihtiyaç duyulan en düşük mürettebat sayısı, “enişilenmiş mürettebat sayısı” anlamına gelmemektedir; insan performansının, dinlenmenin, güvenliğın ve eğitimin de dikkate alınarak mürettebat sayısının enişilmesi anlamını taşımaktadır (Vince, 2020). Bu yaklaşım biçimi, lojistik, eğitim ve diğerk her türlü mürettebatla ilgili hususların ayrı ayrı olarak ele alınmamasını, bunun yerine bütünsel tek bir işlev olarak dikkate alınmasını gerektirmektedir.

“Eniyilenmiş mürettebat sayısı”; bir geminin insan performansı ve güvenlik gereksinimleri, teknoloji kullanılabilirliği, satın alınabilirlik ve risk ile uyumlu olarak görevini başarıyla yerine getirmesi için gerekli olan asgari mürettebat sayısıdır (Baker ve ark., 2001). Teknolojinin seviyesini ve uygulanabilirliğini değerlendirebilmek amacıyla, insan yetenekleri ve sınırlamalarını ele alan “insan mühendisliğinin” tasarım sürecine dâhil edilmesi gerekmektedir (Spindel ve ark., 2000). Bu çalışma yapılmadan herhangi bir teknoloji uygulamasının mürettebat sayısında büyük bir azalmaya faydası olmayacaktır.

Teknolojinin gemideki uygulamalarından biri olan otomasyon, daha önce bir insan tarafından gerçekleştirilen bir işlevin bir aracı makine (genellikle bir bilgisayar) tarafından yürütülmesi olarak tanımlanmaktadır (Parasuraman ve Riley, 1997). Bu işlev dağılımının seviyesi (Endsley ve Kaber, 1999; Fitts, 1951; Sheridan ve Verplank, 1978), azaltılacak mürettebat sayısını belirlemektedir (Chilcott ve Kennedy, 2018). Sevk sistemi, elektrik güç sistemi, yardımcı sistemler ve hasar kontrol sisteminin bütünleşik olarak kontrolünü ve izlenmesini sağlayan IPMS, mürettebat sayısının azaltılmasında en önemli etkidir. IPMS, insan-makine arayüzü (human computer interface-HCI) ve insan-bilgisayar arayüzü (human machine interface-HMI) unsurları ile insanı ve makineyi birleştirmekte ve bütünleştirmektedir.

Her ne kadar otomasyon önemli olanaklar sunsa da muhtelif araştırmalar, otomasyonun; güvensizlik, kayıtsızlık, beceri bozulması, düşük durum farkındalığı, kontrolü geri kazanma sorunları ve zihinsel faaliyetlerin bozulması benzeri çeşitli sorunları ortaya çıkardığı gerçeğini vurgulamaktadır (de Winter ve Dodou, 2014). Mürettebat sayısının azaltılmasına izin veren tüm teknolojik gelişmeler, büyük olasılıkla daha vasıflı bir mürettebat ve personel temin ve eğitim politikasında değişiklik gerektirecektir (Nascetti ve Giuliano, 2004; Strain ve Eason, 2000). Mürettebat sayısının az olması, mürettebatın daha üst düzey kabiliyetlere sahip olmasını gerektirecektir (Strain ve Eason, 2000; Vince, 2020). Bu durumda, eğitim ihtiyaçları da değişecek/artacaktır (Vince, 2020); bunun sonucu olarak da maliyetler artabilecektir (Nascetti ve Giuliano, 2004).

Yukarıda belirtilenlerin yanında eniyilenmiş mürettebat, kurum genelinde önemli düzenlemelerin yapılmasını/değiştirilmesini gerektirmektedir; tedarik ve sistem

tasarımından, muharebe kabiliyetine, personel teminine, bakım yöntemlerine ve kıyı desteğine kadar her bir işlevi doğrudan etkilemektedir (Spindel ve ark., 2000).

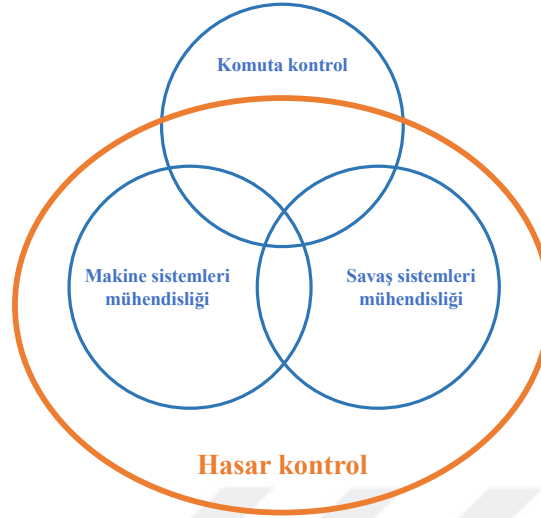
Mürettebat üyelerinin bir harp gemisinde belirli branş görevleri olmasına rağmen, tüm mürettebatın iştirak etmesi gereken birçok branş dışı ortak görev de bulunmaktadır (Strain ve Eason, 2000). Bu tür görevler arasında; yangınla mücadele-hasar kontrol, temizlik, misafir ağırlama, törenler yer almaktadır. Bu görevler, teknolojinin sayıyı azaltmada katkı sağlayamayacağı görevlerdir. Bu nedenle bu görevlerin ifası amacıyla gemide yeterli sayıda personelin istihdam edilmesi gerekmektedir; bunun yapılmaması durumunda, özellikle geminin emniyeti ile ilgili önemli olumsuz etkiler oluşabilecektir.

Hasar kontrol, bir harp gemisinin maruz kaldığı hasarı belirleme, yönetme ve bastırma ile ilgili yapılan faaliyetler bütünüdür (Torenvliet ve ark., 2008). Şiddetli hasar durumunda, o esnada diğer kritik görevlerle meşgul olmayan tüm mürettebat üyeleri; yangınla mücadele, teknenin onarımı veya su geçirmez perdelerin desteklenmesi gibi hasar kontrol görevlerine verilmektedir. Bekanın idamesi, mürettebatın ve yolcuların güvenli bir şekilde tahliyesine indirildiği sivil gemilere kıyasla, harp gemilerinde daha fazla mürettebat gerektirmektedir.

Gemide hasar kontrol teşkilatı Şekil 5.6'da gösterildiği üzere komuta ve kontrolü, makine sistemleri mühendisliğini ve savaş sistemleri mühendisliğini kapsamakta/içermektedir (Torenvliet ve ark., 2008). Bu nedenle sevk ve elektrik güç sistemini işletecek olan personelin sayısının, eğitim ve tecrübe düzeyinin özellikle geminin hasar kontrol teşkilatında alacağı görevler de dikkate alınarak belirlenmesi gerekecektir. Bu da aslında kurum kültürüne, bu kültür sonucunda şekillenen gemi görev organizasyonuna ve en nihayetinde de bu görevleri icra edebilmek için uygulanacak eğitim politikasına bağlıdır.

Makine sistemlerinin, zorunlu olanlar dışında, sahip olması istenen otomasyon seviyesinin de kullanıcı kurum tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Bakım politikası da yine kurum kültürüne bağlı diğer bir husustur. Sonuç olarak mürettebat-personelle ilişkin tasarımla ilgili hususlar, kullanıcı kurumun tercih ve kararlarına bağlı olmaktadır. Birinci Bölüm'de belirtildiği üzere, bu tez çalışması herhangi bir kurumla ilişkili olmadığından ve/veya herhangi bir kurumu esas

almadığından, ayrıca gemilerdeki mürettebat organizasyon usullerini kapsamadığından; personel-mürettebat hususu değerlendirmeye katılamamıştır.



Şekil 5.6 Hasar kontrol teşkilatının kapsamı [Torenvliet ve arkadaşlarından (2008) uyarlanmıştır]

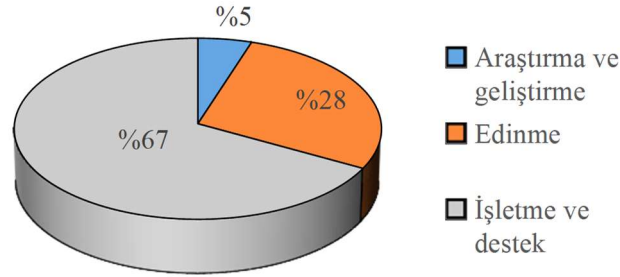
5.9 Ömür Devri Maliyeti

Silah sistemleri için ömür devri maliyeti (life cycle cost-LCC) dört bileşenden oluşmaktadır: araştırma ve geliştirme, edinme, işletme ve destek, elden çıkarma (Defense Acquisition University, 2013). Bir harp gemisi için, elden çıkarma bileşeni hariç tutulduğunda, diğer bileşenlerin LCC'ye yaklaşık oranı Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

Bir geminin maliyetine etki eden başlıca unsurlar; savaş ve komuta kontrol sistemleri, beka kabiliyeti ve sevk sistemidir (Naval Sea Systems Command, 2005). Savunma harcamaları dikkate alındığında, düşük maliyetli askerî gemiler tedarik etmeye yönelik bir talep oluşmaktadır (Hodge ve Mattick, 1996). Bu talep, bir gemiyi oluşturan her bileşeni etkilemekle birlikte; silah sistemlerinin maliyetinin düşürülmesinin çok zor olması nedeniyle, platformların ve bunların sevk bileşenlerinin maliyetlerini düşürmeye yönelik olarak artmaktadır.

Birinci Bölüm'de belirtildiği üzere, maliyetle ilgili yapılan araştırmalar, bir silah sisteminin işletme ve destek maliyetlerinin yaklaşık %85'inin, ömür devri maliyetinin %10'dan azının harcanmış olduğu isterlerin tespit edilmesi sürecinde belirlendiğini göstermektedir (United States Government Accountability Office [GAO], 2003). Her ne kadar bu tespitler genelleştirilmiş olsa da belirtilen rakamlar,

bir gemi programının erken safhalarında tüm ömür devri maliyetlerine dikkat edilmemesi durumunda; program ilerledikçe bütçe ve performans sorunlarından kaynaklanan büyük gecikmelere ilişkin önemli bir riskin ortaya çıkacağını göstermektedir (BMT Defence Services, t.y.).



Şekil 5.7 Bir harp gemisi için, elden çıkarma bileşeni hariç tutulduğunda, diğer bileşenlerin LCC'ye yaklaşık oranı [Defense Acquisition University'den (2013) uyarlanmıştır)

İşletme ve destek maliyetlerinin en büyük kısmını personel maliyetleri oluşturmaktadır. Bu maliyetler %50'nin üzerine çıkabilmektedir (Zivi, 2005). Dünya donanmalarının bir kısmı, bütçelerinin %50'sinden fazlasını personel giderlerine kullanmaktadır (Wood, 2014).

Mürettebat sayısını azaltmak, ek ve önemli maliyet tasarrufları sağlamaktadır (Anderson ve ark., 1998). Ayrıca bu azaltım, geminin boyutunun küçültülmesine, böylece tedarik ve destek maliyetlerinin düşürülmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte mürettebat sayısının azaltılması hususunda dikkatli olunması gerekmektedir. Tasarım aşamasında mürettebat sayısının fazla tahmin edilmesi durumunda, mürettebat yaşam yerlerinin maliyetleri yüksek olacağından inşa maliyetleri de artacaktır (Vince, 2020). Mürettebat sayısının az tahmin edilmesi durumunda ise gemi, harekât isterlerinin yerine getirilmesinde yetersiz kalabilecek ve bu yetersizliklerin giderilmesi maliyetleri yükseltecektir. Bu nedenlerle, mürettebat sayısının tasarım sürecinin ilk safhalarında doğru olarak tespit edilmesi gerekmektedir.

Sarfedilebilir kalemler LCC'nin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Trappe'ye (2001) istinaden; işletme ve destek maliyetlerinin %25'ini sarf edilebilir kalemler oluşturmaktadır; bu kalemlerin yarısını akaryakıt ve diğer yarısını ise yedek parça,

servis desteği ve eğitim teşkil etmektedir. Surko ve Osborne (2005), akaryakıt maliyetinin LCC'nin %8'ine karşılık geldiğini belirtmiştir. Verilen bu bilgiler, gemilerde kullanılacak ısı makinaların yůksek verime sahip olmasının LCC'yi dűřürmeye katkı sağlayacağını göstermektedir.

Bakım maliyetleri bařka bir LCC kalemidir. Uygun bakım politikalarının uygulanması durumunda maliyetlerde önemli dűřűřler sađlanmaktadır (New ve Gay, 2012).

Tasarımın erken ařamalarında yapılan maliyet tahminleri $\pm\%40$ oranında oldukça geniř sayılabilecek bir yelpazede hataya sahip olabilmektedir; bu bűyűk oran, tahminlerin fazla ya da dűřűk yapılması riskini barındırmaktadır (Peer, 2012).

Sevk ve elektrik gűç sistemi bileřenleri ile ilgili maliyet bilgileri kurum ve/veya üreticiler tarafından paylaşılmak istenmeyen veriler arasında yer almaktadır (BMT Defence Services, t.y.; Hodge ve Mattick, 1996). LCC'ye bűyűk etkisi olan personel-műrettebat ve bakım politikaları hususları dođrudan kullanıcı kurumları ilgilendirmektedir; buna karřın Birinci Bűlűm'de belirtildiđi üzere, bu tez çalıřması bir kurumla iliřkili olmadıđından ve/veya herhangi bir kurumu esas almadıđından bu hususlar deđerlendirmeye alınamamıřtır. Yukarıda belirtilen nedenlerle ve maliyet özűmlmesinde mevcut olan yůksek hata riskinin sađlıklı tahmin yapılmasını engellemesi hususu da dikkate alındıđında bu ۆlűt deđerlendirmeye katılamamıřtır.

5.10 Yakıt Tűketimi-Verim ve CO₂ Ayak İzi

Verim, basit bir ifadeyle bir makineye verilen yakıtın enerjiye dűnűřűm oranını tanımlamakta ve (5.20) eřitliđi ile hesaplanabilmektedir (Heywood, 1988). Bu tez çalıřmasında, (5.20) eřitliđinde yer alan alt ısı deđer, 42,7 MJ/kg olarak kullanılmıřtır (Cin ve elebi, 2024).

$$\eta_f = \frac{3600}{sfc \cdot Q_{HV}} \quad (5.20)$$

Q_{HV} : alt ısı değer [MJ/kg]

sfc : ۆzğűl yakıt tűketimi [g/kWsaat]

η_f : yakıt verimi [-]

(5.20) eşitliğinde yer alan “sfc” özgül yakıt tüketimidir ve bir makinenin belirli bir çalışma durumunda, birim güç için birim zamanda kullanmış (yakmış) olduğu yakıt miktarını tanımlamakta ve genellikle g/kWsaat veya kg/kWsaat birimleriyle ifade edilmektedir. Sfc, hesaplamalarda yaygın olarak makine yükünün bir fonksiyonu olarak işlem görmektedir.

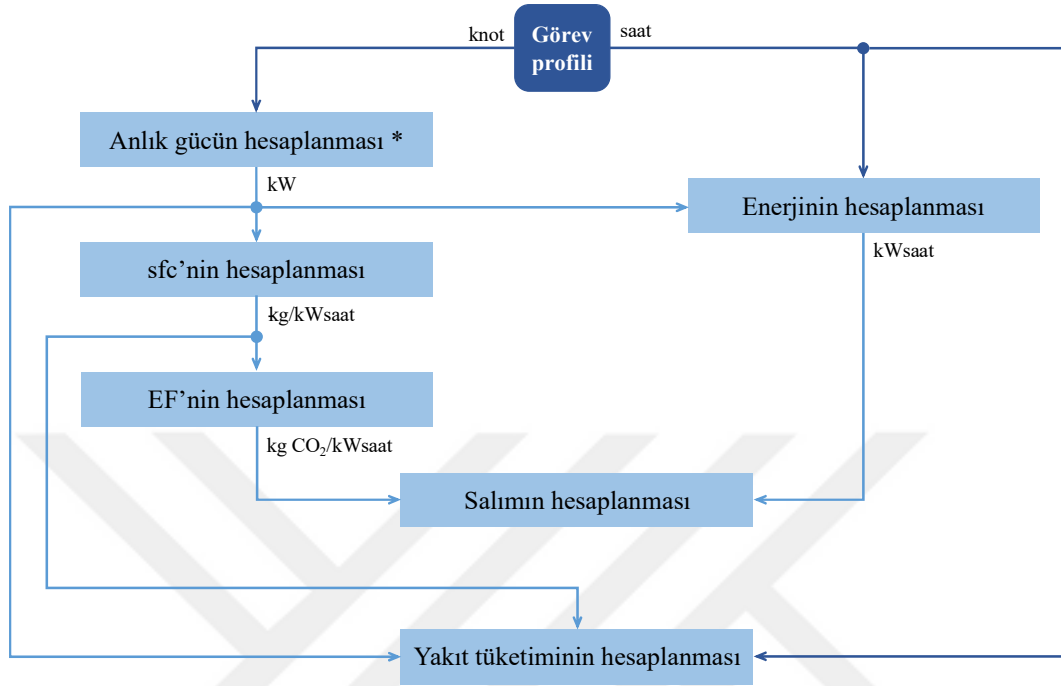
Verim incelemesinin yapılması esnasında, yukarıda verilen tanımlamalara istinaden; az yakıt yakan bir makinenin her zaman için verimli olduğu anlamına gelmeyeceğinin dikkate alınması gerekmektedir (Cin ve Çelebi, 2024).

Verimli makineler kullanılarak yakıt tüketimini azaltmak operasyonel ve stratejik bir zorunluluktur ve muharebe etkinliğinin artırılması üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Doerry ve ark., 2010). Yakıt verimi aynı zamanda; menzili arttırmak, harekât esnekliği sağlamak, ileri noktalarda varlık gösterimini desteklemek suretiyle deniz kuvvetinin kabiliyetlerini genişletmektedir.

Muharebe sahnesinde, gemiler için sürekli olarak yakıt ikmalinin sağlanması muharebenin etkinliği anlamında da büyük önem taşımaktadır (Buckingham, 2017). Bu kapsamda, daha verimli makinelere sahip gemilerin menzili de daha büyük olacaktır. Ayrıca, bu gemilerin makinelerinden yayılan egzoz gazlarının sıcaklıkları daha düşük olacağından bu gemiler daha düşük kızıl altı ize sahip olacaktır.

Sıvı fosil yakıt tüketen gemi makinelerinden yayılan egzoz gazında bulunan bileşenler arasında yer alan CO₂, sera etkisiyle dünya yüzeyini ısıtarak iklim değişikliğine neden olan en önemli gazdır (Nunes ve ark., 2017). Gemilerin makinelerinden kaynaklı CO₂ salımlarının miktarı, kullanılan yakıt miktarı ile orantılıdır (Eyring ve ark., 2005). Belirli rota, alan, bölge, liman ve belirli gemiler için muhtelif CO₂ salım tahminleri yayımlanmıştır. Bu tahminlerde oldukça fazla sayıda yöntem kullanılmıştır. Yapılan tahminlerde kullanılan verilere ve/veya yöntemlere ilişkin muhtelif belirsizliklerin olduğu bildirilmiştir. Bu belirsizliklerden kaynaklı olumsuzlukları azaltmak maksadıyla çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bahse konu yöntemler ve bu yöntemlerde bulunan belirsizlikleri azaltmak maksadıyla kullanılmış olan yaklaşımlarla ilgili ayrıntılı inceleme için bakınız Cin ve Çelebi (2024).

Cin ve Çelebi (2021a) tarafından kullanılan model Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Bu modelde enerji yaklaşımı ile hesaplama yapılmıştır (Environmental Protection Agency [EPA], 2020).



* Isıl SM : fırkateyn için Şekil 3.8 ve Çizelge 4.2, ADKG için Şekil 3.9 ve Çizelge 4.3
 ÜS : fırkateyn için Şekil 4.5 ve Çizelge 4.2, ADKG için Şekil 4.7 ve Çizelge 4.3

Şekil 5.8 Yakıt tüketimi ve CO₂ salım hesaplama modeli [Cin ve Çelebi’den (2021a) uyarlanmıştır]

Şekil 5.8’de gösterilen yaklaşımın her bir hız kademesi ve her bir makine için ayrı yapılması gerekmektedir. İlk adım olarak makine yükü belirlenmektedir; bu kapsamda yük, her bir makinenin üreticisinin verilerinden alınan azami fren gücü (MCR) ve ilgili hız kademesine karşılık gelen ve Üçüncü Bölüm’de belirtilen yöntemle (fırkateyn için Şekil 3.8, Şekil 4.5 ve Tablo 4.2; ADKG için Şekil 3.9, Şekil 4.7 ve Tablo 4.3 vasıtasıyla) hesaplanan anlık fren gücü kullanılarak (5.21) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$LF = \frac{P_{instant.}}{P_{MCR}} \quad (5.21)$$

LF : makine yükü [-]

P_{instant.} : anlık fren gücü [kW]

P_{MCR} : azami devamlı (MCR) fren gücü [kW]

(5.21) eşitliği ile hesaplanmış olan yük değeri kullanılarak ilgili makinenin üreticisinin verilerinden hesaplanan sfc değeri, anlık fren gücü değeri ve ilgili hız kademesi için görev profilinden (fırkateyn için Şekil 1.9 ve ADKG için Şekil 1.10) alınan seyir süresi kullanılarak (5.22) eşitliği ile yakıt tüketimi hesaplanmaktadır.

$$FC = P_{instant.} \cdot AD \cdot sfc \quad (5.22)$$

FC : yakıt tüketimi [kg]

$P_{instant.}$: anlık fren gücü [kW]

AD : seyir süresi [saat]

sfc : özgül yakıt tüketimi [kg/kWsaat]

CO₂ salımı, (5.23) eşitliğinde verilen EF kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$EF = sfc \cdot CF \quad (5.23)$$

EF : salım etkeni [kg CO₂/kWsaat]

sfc : özgül yakıt tüketimi [kg/kWsaat]

CF : yakıt tüketiminden CO₂ salımına dönüşüm etkeni [kg CO₂/kg]

Bu eşitlikte yer alan CF, yakıt tüketiminden CO₂ salımına dönüşüm etkenidir ve yakıtın türüne göre farklılık göstermektedir.

IMO, hem iklim değişikliği ile mücadeleye katkıda bulunmak ve hem de denizcilik sektörünü daha verimli duruma getirmek amacıyla kavramsal tasarım ve inşa esnasında (Wang ve ark., 2021) daha iyi enerji verimliliği sağlamak maksadıyla Energy Efficiency Design Index (EEDI) (IMO, 2011) adı verilen bir enerji verimliliği tasarım göstergesi belirlemiştir (Cin ve Çelebi, 2024). EEDI basit olarak, kapasite-deniz mili başına CO₂ salımı olarak tanımlanmıştır. MEPC.364(79)66'nın kararında (IMO, 2022), EEDI hesaplaması için uygulanması gereken formülü belirlenmiş olup, bu formülün basitleştirilmiş ve temel şekli (su çekimi vb. düzeltme katsayıları hariç olmak üzere) (5.24) eşitliği ile gösterilmektedir (Jacobs ve ark., 2018; Wang ve ark., 2021).

$$EEDI = \frac{P_{instant.} \cdot sfc \cdot CF}{Kapasite \cdot v} \quad (5.24)$$

Kapasite	: yolcu gemileri ve kruvaziyerler için grosstonnage [ton] konteyner gemileri için DWT'in %70'i [ton] diğer gemiler için DWT [ton]
CF	: yakıt tüketiminden CO ₂ salımına dönüşüm etkeni [ton CO ₂ /ton yakıt]
EEDI	: enerji verimliliği tasarım göstergesi [ton CO ₂ /ton yük deniz mili]
P _{instant.}	: anlık fren gücü [kW]
sfc	: özgül yakıt tüketimi [ton/kWsaat]
v	: gemi hızı [knot]

EEDI, gemi tipi ve büyüklüğüne göre belirlenmekte olup belirli yük türü taşıyan gemiler, yolcu gemileri ve kruvaziyerler için zorunlu tutulmuştur (Sou ve ark., 2022). Gösterge ile ilgili muhtelif eleştiri/itirazlar yapılmıştır. van de Ketterij ve arkadaşları (2009), EEDI hesaplamasında hız ve yük esas alındığından göstergenin yük taşımayan ve/veya iki nokta arasında seyir yapmayan gemileri ölçemediğini ve ayrıca örneğin tarama gemilerindeki pompaları tahrik eden dizel motorları da kapsamadığını belirtmiştir. Jacobs ve arkadaşları (2018), sondaj gemileri, römorkörler, küçük yolcu araçları vb. gemiler için göstergenin yeterli olmadığını ifade etmiştir. Benzer bir durum, IMO'nun CO₂ emisyon düzenlemelerinin kapsamı dışında olmakla birlikte, harp gemileri için de geçerlidir; bu gemiler değişken ve benzersiz görev profillerine sahiptir ve ilaveten gemiler herhangi bir yük taşımamakta, ayrıca bu gemilerin su çekimi değerleri neredeyse sabit kalmaktadır (Cin ve Çelebi, 2024).

Schulten ve arkadaşlarına (2017) göre Michalchuk ve Bucknall (2014), (5.25) eşitliği ile gösterildiği şekilde harp gemileri için bir gösterge (warship EEDI-WEEDI) öneren ilk araştırmacılar olmuştur. Bununla birlikte Schulten ve arkadaşları (2017), bu göstergenin sadece seçilen tek hız değeri (v_{ref}) için verimliliği tanımladığını ve görev profilini dikkate almadığını belirtmiştir. Bu olumsuzluk da Stapersma (2016) tarafından (5.26) eşitliği ile gösterildiği şekilde giderilmiştir. Bu yeni gösterge “integral warship EEDI-IWEEDI” olarak adlandırılmıştır.

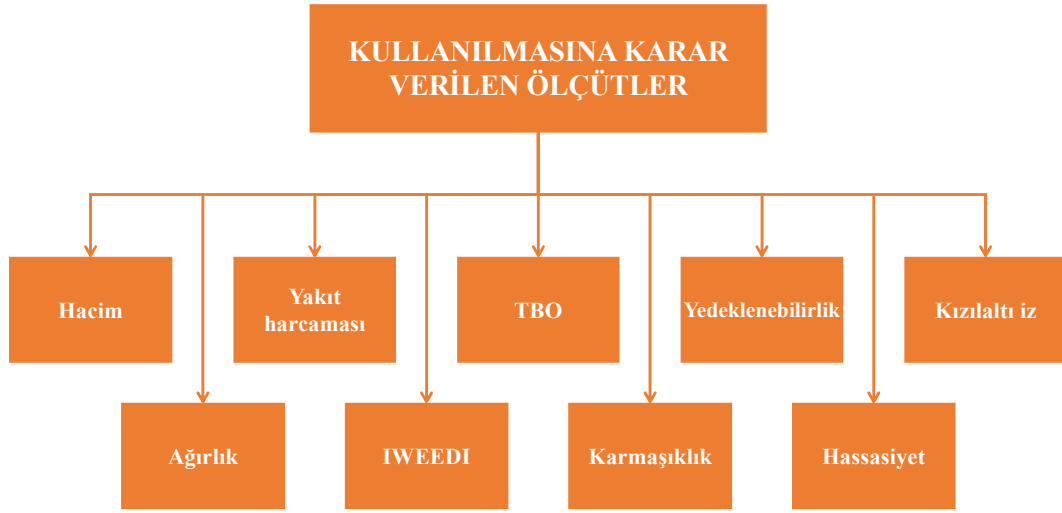
$$WEEDI = \frac{CF \cdot (sfc_{PE} \cdot P_{PE \text{ instant.}} + sfc_{GS} \cdot P_{GS \text{ instant.}})}{\Delta \cdot v_{ref.}} \quad (5.25)$$

$$IWEEDI = \frac{CF \cdot \sum_i (sfc_{PE,i} \cdot P_{PE \text{ instant},i} + sfc_{GS,i} \cdot P_{GS \text{ instant},i}) \cdot wf_i}{\Delta \cdot \sum_i v_i \cdot wf_i} \quad (5.26)$$

CF	: yakıt tüketiminden CO ₂ salımına dönüşüm etkeni [ton CO ₂ /ton yakıt]
i	: hız kademesi [-]
IWEEDI	: tümleşik harp gemisi enerji verimliliği tasarım göstergesi [ton CO ₂ /ton deplasman deniz mili]
P _{GS instant.}	: üreteç seti anlık fren gücü [kW]
P _{PE instant.}	: sevk makinesi anlık fren gücü [kW]
sfc _{GS}	: üreteç seti özgül yakıt tüketimi [ton/kWsaat]
sfc _{PE}	: sevk makinesi özgül yakıt tüketimi [ton/kWsaat]
v _i	: i. hız kademesinde gemi hızının değeri [knot]
v _{ref}	: gemi intikal hızı [knot]
WEEDI	: harp gemisi enerji verimliliği tasarım göstergesi [ton CO ₂ /ton deplasman deniz mili]
wf _i	: i. hız kademesinde seyir yapılan sürenin toplam yıllık seyir süresine oranı [-]
Δ	: deplasman tonajı [ton]

Kavramsal tasarım aşamasında harp gemilerinin sevk ve elektrik güç sistemi seçenekleri için IWEEDI'yi uygulayan, karşılaştıran ve çözümleyen ilk çalışma Cin ve Çelebi (2024) tarafından yapılmıştır. Dördüncü Bölüm'de verilen seçenekler için IWEEDI hesaplaması bu çalışmaya istinaden gerçekleştirilmiş ve bu gösterge, seçeneklerde yer alan ısı makinalarının verimlilik ölçeği olarak kullanılmıştır.

Şekil 5.1'de gösterilen ölçütlerle ilgili yukarıda yapılan çözümlemeler neticesinde, bu tez çalışmasında kullanılmasına karar verilen ölçütler Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Belirlenmiş olan bu ölçütlerle ilgili ihtiyaç duyulan veri/bilgiler Ek-A'da verilmiştir; gerekli hesaplamalar ve diğer işlemler bu veri/bilgiler kullanılarak yapılmış ve sonuçları Yedinci Bölüm'de değerlendirilmiştir.



Şekil 5.9 Tez çalışmasında kullanılmasına karar verilen ölçütler

SEÇİM İŞLEMİNDE BULANIK HİYERARŞİ SÜRECİ VE YAPAY SİNİR AĞLARININ UYGULANMASINA YÖNELİK ÖNERİLEN MODEL

Karar verme çok genel ve temel bir yaklaşımla belirli seçenekler arasından en uygununu seçebilmek maksadıyla yapılan bir yargı (değerlendirme) işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Bu yargı işlemi aslında bir seçim sürecidir. Karar verme süreci bir ihtiyacın giderilmesini amaçlamaktadır.

Birinci Bölüm’de de belirtildiği üzere bir silah sisteminin seçimine yönelik yapılan değerlendirme birbiriyle etkileşim içinde olan karmaşık bir işlemler sürecidir. İhtiyaçları karşılayan bir silah sisteminin tedarikine karar vermek, iyi bir silah performansı ve asgari maliyet gerektirmektedir; performans ve maliyet, bilim, teknoloji ve ekonomik imkânların geliştirilmesine; teknoloji, fikirlere ve kaynaklara; fikirlerin kabulü ve desteklenmesi bu husustaki politikalara bağlı olmaktadır (Cheng ve ark., 1999). Bu kadar karmaşık etkenlerin bulunduğu bir ağ içinde, ilk nedenler ve nihai etkiler kolaylıkla tespit edilememektedir. Bu etkenler doğrudan karar vericinin beklentilerine ve ilave karmaşık alt etkenlere bağlı kalmaktadır. Bu tür karmaşıklığı yüksek süreçlerde, insan zihni bu nihai ilişkileri açıkça görebileceğimiz ve önemli sorunları kolayca çözebileceğimiz kadar gelişmemiştir.

Başta silah sistemlerinin seçimine yönelik değerlendirmeler olmak üzere bu tür askerî hususlara ilişkin sorunların çözümü maksadıyla çok ölçütlü karar verme (multi-criteria decision making-MCDM) yöntemleri kullanılmaktadır (Cheng, 1999; de Araújo Costa ve ark., 2022; dos Santos ve ark., 2021; Mon, 1995; Sánchez-Lozano ve Rodríguez, 2020; Sánchez-Lozano ve ark., 2022). de Araújo Costa ve arkadaşları (2022) tarafından çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin askerî uygulamalarına ilişkin Scopus ve Web of Science (WoS) veri tabanlarında yapılan taramada 1980-2021 yılları aralığında 685 eser tespit edilmiştir. Tek ölçütün olduğu karar verme süreçleri nispeten daha basit olurken; çok ölçütlü süreçlerde ise ölçütlerin ağırlıklandırılması, ölçütlerin birbiri ile olan çelişkileri/çatışmaları vb. sorunlar nedeniyle karar verme işlemi karmaşık hâle gelmekte ve bunun sonucu

gelişmiş karar destek yöntemlerine ihtiyaç duyulmaya başlanmaktadır (Tzeng ve Huang, 2011).

MCDM, karar vericilerin, birbiriyle çelişen çok sayıda seçenekle ilgili en uygun kararı vermelerini desteklemeyi amaçlayan bir disiplindir (Tzeng ve Huang, 2011). Bu amaca ulaşabilmek maksadıyla karar vericilerin tercih yapısının ve ölçütlerin doğru ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. MCDM; birbiriyle uyumsuz ve çelişen çoklu ölçütlerin olduğu durumlarda, insanların değerlerine (tercihlerine) uygun seçimler yapmalarına yardımcı olmak için tasarlanmış hem bir yaklaşım hem de bir teknikler (yöntemler) bütünü olarak da tanımlanmaktadır (Bogetoft ve Pruzan, 1997).

MCDM'lerin gruplandırılmasına ilişkin alanyazında muhtelif yaklaşımlar bulunmakla birlikte, genel olarak MCDM'ler iki alana ayrılmaktadır (Chen ve Hwang, 1992; Ho ve ark., 2006; Ramirez-Atencia ve ark., 2020; Kumar ve ark., 2017; Liou ve Tzeng, 2012): tasarım sorunlarına odaklanan çok amaçlı karar verme (multi-objective decision making-MODM) ve değerlendirme (seçim) sorunlarına odaklanan çok özellikli karar verme (multi-attribute decision making-MADM) (Chen ve Hwang, 1992; Ramirez-Atencia ve ark., 2020). Bu yöntemler; ölçütler arasındaki çatışmanın, karşılaştırılamayan birimlerin ve seçeneklerin seçimindeki zorlukların ortak özelliklerini paylaşmaktadır (Pohekar ve Ramachandran, 2004).

MODM, eş zamanlı ulaşılamayan ve birbiri ile çatışma içerisinde olan bir dizi hedeften oluşmaktadır (Yang ve Hung, 2007). MODM genellikle amaçlar ve özellikler (nitelikler) arasındaki ilişkilerle ve karar vericinin amaçlarına ilişkin tercihleriyle ilgilidir. MODM'de seçenekler açıkça bilinmemekte, bunları bulabilmek maksadıyla matematiksel modeller kullanılmaktadır (Ramirez-Atencia ve ark., 2020). Çoğu durumda sonsuz (veya çok fazla sayıda) seçenek mevcut olmaktadır. Önceden belirlenmiş kısıtlamalara tabi bir dizi amaç fonksiyonu bu sonsuz sayıdaki seçenek için eniyilenmektedir; en tatmin edici ve etkin çözüm aranmaktadır (Pohekar ve Ramachandran, 2004). Bu çözümde, en az bir farklı amacın performansı düşürülmeden herhangi bir amacın performansını arttırmak mümkün olmamaktadır. MODM'nin kısıtlarla tanımlanan sonsuz sayıda seçeneğin değerlendirildiği karar durumunu ifade etmesi nedeniyle bu tür yöntemler seçim sorunlarından ziyade tasarım sorunlarını ele alınmasına uygun olmaktadır (Chen ve Hwang, 1992).

MADM’de ise, önceden belirlenmiş ve sayıları sınırlı olan seçenekler, genellikle ölçülmesi zor ve/veya birbiriyle çatışan ölçütlere göre değerlendirilmektedir (Pohekar ve Ramachandran, 2004; Ramirez-Atencia ve ark., 2020). Bu değerlendirmede, karar verici tarafından ölçütlere ağırlıklar/önem dereceleri verilerek (başka bir ifadeyle sıralama yapılarak) en uygun (eniyeilenmiş) seçeneğin seçilmesine destek olunmaktadır (Ramirez-Atencia ve ark., 2020; Taho ve Hung, 2007). MADM ile ilgili sorunları çözmek için kullanılan yöntemler, çok ölçütlü fayda kuramı (multiple attribute utility theory-MAUT) ve sıralama (outranking) yöntemleri olmak üzere iki temel gruba ayrıştırılabilmektedir (Tzeng ve Huang, 2011).

MAUT’ta, seçenekleri değerlendirmek için tüm ölçütler belirli bir boyutta (fayda fonksiyonunda) toplanmaktadır (Liou ve Tzeng, 2012). Karar verici fayda fonksiyonunu değerlendirerek en büyük fayda değerine sahip en iyi seçeneği belirleyebilmektedir (Tzeng ve Huang, 2011). MAUT’un uygun fayda fonksiyonunu belirlemek için birçok kaynak önerilmiş olmasına rağmen (Fishburn, 1970’ten aktaran Tzeng ve Huang, 2011), MAUT’a yönelik ana eleştiri, “tercihsel bağımsızlığın” gerçekçi olmayan varsayımı üzerinde yoğunlaşmaktadır (Grabisch, 1995 ve Hillier, 2000’den aktaran Tzeng ve Huang, 2011). Fayda fonksiyonunun karmaşık yapısı nedeniyle MAUT’a alması olarak sıralama (outranking) yöntemleri önerilmektedir.

6.1 Analitik (Çözümlemeli) Hiyerarşi Süreci

Tez konusu olan harp gemileri için sevk ve elektrik sistemi seçiminin, Birinci Bölüm’de de belirtildiği üzere, birbiri ile iç içe geçmiş (çatışan), doğrudan veya dolaylı olarak birbirini etkileyen ve farklı nicel veya nitel özellikleri olan birçok ölçütün değerlendirilerek yapılması gerekmektedir. Bu hususlar dikkate alındığında, bahse konu seçim de yukarıda silah sistemleri için belirtilmiş olan MCDM sorunu kapsamına girmektedir. Bu durumda sevk ve elektrik sistemi seçimine ilişkin değerlendirmenin yapılabilmesi maksadıyla karar vermeye yönelik yönteminin belirlenmesi gerekmektedir.

Karar verme sorunlarında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri analitik (çözümlemeli) hiyerarşi sürecidir (Analytical Hierarchy Process-AHP) (Ho, 2008; Dong ve ark., 2015; Goossens ve Basten, 2015; Mon, 1995; Lee ve ark., 2008;

Skalna ve ark., 2015). AHP hem akademik hem de endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır (Goossens ve Basten, 2015). AHP birçok gerçek karar durumuna başarıyla uygulanmıştır (Deng, 1999). Geniş olarak uygulanabilir olması; basitliği, kullanım kolaylığı ve büyük esnekliğinden kaynaklanmaktadır (Ho, 2008). Niteliksel ve niceliksel etkenlerin yanında bir kısım gerçek dünyadaki kaynak sınırlamalarını da dikkate almak için matematiksel programlama benzeri diğer tekniklerle bütünleştirilebilmektedir.

de Araújo Costa ve arkadaşları (2022) tarafından çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin askerî uygulamalarına ilişkin Scopus ve WoS veri tabanlarında yapılan taramada 1980-2021 yılları aralığında tespit edilen 685 eserde en çok kullanılan yöntemin %43,80'lik oranla AHP olduğu, ikinci sırada ise %22,17'lik oranla TOPSIS'in olduğu tespit edilmiştir. Santos ve arkadaşları (2021) tarafından harp gemilerine ilişkin çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile ilgili yapılan alanyazın taramasında en çok kullanılan yöntemin AHP olduğu bildirilmiştir. Bunun nedeninin muhtemelen AHP'nin (yukarıda da belirtildiği üzere) dünya genelinde en çok bilinen yöntem olması ve askerî kültüre özgü hiyerarşi kavramıyla çalışması olduğu belirtilmiştir. Askerî alanlara uygulanabilirliği, kendini ispatlamış olması, basitliği özellikleri ile bu tez çalışmasının konusu olan seçim süreçlerine uyumlu olduğu değerlendirildiğinden; bu tez çalışmasında AHP'nin kullanımı benimsenmiştir.

AHP yöntemi, Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiş olup çok önemli sayıda kaynakta bu yönteminin ilk ortaya çıkışının Saaty'nin 1980 yılında yayımlanan "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation" adlı kitap (Saaty, 1980) ile gerçekleştiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, aynı kitapta Saaty tarafından, bu yöntemle ilişkin çalışmaların 1970'li yılların başına kadar uzandığı yazılmış bulunmaktadır.

AHP, birbirine göre farklı ağırlığa sahip çeşitli ölçütlere istinaden değerlendirilen birçok seçenek arasından en uygun olanını seçme sorununun karmaşıklığını basit hiyerarşi düzenine dönüştürerek ikili karşılaştırma yoluyla önceliklendirme yapmaktadır (Cheng ve ark., 1999). Karşılaştırma hem nicel hem de nitel özellikler için yapılabilir. Bu karşılaştırmayı gerçekleştirebilmek maksadıyla bir ölçeğe ihtiyaç duyulmaktadır. Karar vericilerin kullanacağı ölçeğin tüm önem derecelendirmelerinden aynı anda farkında olması istendiğinden ve Miller (1956)

tarafından yapılan psikolojik deneyler sonucunda gözlenen “bir bireyin 7 ± 2 ’den fazla nesneyi karıştırmadan aynı anda değerlendiremeyeceği olgusu” da dikkate alındığında, değerlendirme için 9’lu bir ölçeğin kullanımı benimsenmiştir (Saaty, 1977). Müteakip kısımlarda açıklandığı üzere yapılan değerlendirmelerin tutarlılığı, karşılaştırma işleminin sağlıklı olarak yapıldığının kabulü için önemli bir etkidir. Daha büyük sayıları içeren derecelendirme ölçeklerinin kullanılması durumunda tutarsızlığın büyük ölçüde artacağı hesaplanmıştır. Bu kapsamda, AHP’de karşılaştırma işlemi için Tablo 6.1’de gösterilen 9’lu önem derecelendirme ölçeği kullanılmaktadır (Saaty, 1977; Saaty 1994).

Tablo 6.1 AHP’de 9’lu karşılaştırma işlemi için kullanılan önem derecelendirme ölçeği [Saaty’den (1977) ve Saaty’den (1994) uyarlanmıştır]

Önem yoğunluğu	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemde	İki faaliyet amaca eşit katkıda bulunur
3	Zayıf derecede önemli	Deneyim ve yargı bir faaliyeti diğerine göre biraz daha tercih ettirir
5	Güçlü derecede önemli	Deneyim ve yargı bir faaliyeti diğerine göre kuvvetli tercih ettirir
7	Çok güçlü derecede önemli	Deneyim ve yargı bir faaliyeti diğerine göre çok kuvvetli tercih ettirir
9	Aşırı derecede önemli	Deneyim ve yargı bir faaliyeti diğerine göre mümkün olan en kuvvetli tercih ettirir

Karar verici 9’lu ölçeği kullanarak bir ölçütü başka bir ölçütle kıyaslamakta ve tüm ölçütler birbiri ile karşılaştırılana kadar bu işlemi tekrarlamaktadır. Bu karşılaştırma işlemi neticesinde elde edilen yargılar bir dizeye aktarılmakta ve (6.1) eşitliği ile gösterilen “A” karşılaştırma dizeyi oluşturulmaktadır. Bu dizeyde her bir ölçüt çifti için yapılan karşılaştırma işlemi sonucunda ölçeğe istinaden verilen yargı (yapılan değerlendirme) “ a_{ij} ” ile gösterilmiştir. “n” adet ölçüt için yapılan karşılaştırma işlemi sonucunda $n \times n$ boyutlarında bir dizey oluşmakta ve $n.(n-1)/2$ adet karşılaştırma yapılmış olunmaktadır (Goossens ve Basten, 2015).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Karşılaştırma düzeyinin oluşturulmasını müteakip ölçütlerin arasındaki göreceli ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. AHP’de bu ağırlıkların tespit edilebilmesi maksadıyla karşılaştırma düzeyinin temel özyöneği kullanılmaktadır (Chen ve Tzeng, 2004; Lu ve Wang, 2011). Bu karşılaştırma düzeyinin belirli bir tutarlılığa sahip olması istenmektedir (Chang ve ark., 2007). “A” düzeyinin tutarlılığının hesaplanmasında, (6.2) eşitliğinde gösterilen en büyük öz değere ihtiyaç duyulmaktadır.

$$A \cdot W = \lambda_{max} \cdot W \quad (6.2)$$

W : A düzeyinin en büyük özyöneği

λ_{max} : en büyük öz değer

Yapılan yargıların tutarlılığı sonucun sağlıklı olması bakımından önem teşkil etmektedir. Bu tutarlılığın hesaplanabilmesi maksadıyla, (6.3) eşitliği ile gösterilen tutarlılık oranı (CR) kullanılmaktadır.

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1) \cdot RI} \quad (6.3)$$

CR : tutarlılık oranı

n : ölçüt sayısı

RI : rassallık göstergesi

λ_{max} : en büyük öz değer

(6.3) eşitliğinde yer alan RI, ölçüt sayısına göre farklı değerler almaktadır. Bu değerler Tablo 6.2’de gösterilmiştir. CR’nin 0,1’den daha küçük bir değere sahip olması durumunda karşılaştırma düzeyi tutarlı kabul edilmektedir. CR’nin 0,1 üzerinde olması durumunda ise, karşılaştırma işleminin CR’nin 0,1 değerinin altına düşmesine kadar tekrar yapılması gerekmektedir.

Tablo 6.2 Ölçüt sayısına istinaden RI değerleri (Saaty, 1980)

Ölçüt sayısı	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI değeri	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Çok ölçütlü karar verme süreçlerinde, karar verme işlemini zor ve karmaşık hâle getiren belirsiz, kesin olmayan ve öznel veri genellikle mevcut olmaktadır (Deng, 1999).

6.2 Bulanık Kümeler Kuramı ve Buckley’in Geometrik Ortalama Yaklaşımını Esas Alan Bulanık AHP (fuzzy AHP-FAHP) Yöntemi

AHP'nin amacı karar vericinin bilgisini yakalamak olsa da geleneksel AHP insanın düşünme tarzını yansıtamamaktadır (Durán ve Aguilo, 2008); algıyı veya yargıyı ifade eden doğal dil her zaman öznel, belirsiz ve/veya muğlak olmaktadır (Wang ve Chang, 2007). 9’lu ölçek; basitlik ve kullanım kolaylığı sağlamasına rağmen, insanın algısının (ve de yargısının) bir rakama eşlenmesiyle ilgili belirsizliği dikkate almak için yetersiz kalmaktadır (Chan ve ark., 2008; Mon, 1995). AHP’de insan yargıları “kesin” olarak ifade edilmektedir; ancak birçok uygulamada (gerçek sorunda) insanın tercih modeli belirsiz (ve de öznel veya muğlak) olmakta ve karar vericiler karşılaştırma için kesin sayısal değerler kullanma konusunda isteksiz olabilmekte veya bunu yapamayabilmektedir (Durán ve Aguilo, 2008). Karar vericiler yargılamada kesin rakamlar yerine doğal dil ifadesini tercih etmektedir (Lee ve ark., 2009; Tzeng ve Huang, 2011).

Yukarıda belirtilen belirsizlik, muğlaklık ve öznelliğin üstesinden gelebilmek maksadıyla temel olarak olasılık kuramı ve/veya bulanık küme kuramı kullanılmaktadır (Deng, 1999). Olasılık kuramı karar verme sürecinin olasılıksal (stokastik) doğasına odaklanırken, bulanık küme kuramı insan davranışının belirsizliği, öznelliği ve muğlaklığı ile ilgilenmektedir. Chen ve Hwang (1992), Dubois ve Prade (1986) ve Zimmermann (1987, 1996) tarafından önerildiği şekilde, sayımlamalı çözümleme benzeri olasılıksal yöntemler, insanın karar verme sürecinin öznelliğini ve belirsizliğini yeterince ele alamamaktadır (Deng, 1999).

Skalna ve arkadaşları (2015), bir kısım araştırmacının, karar vericilerin yargılarının kesin olmaması nedeniyle, 9'lu ölçeğin bulanık hâle getirilmesinin daha iyi olduğunu iddia ettiğini ve karar vericilerin sabit değer yerine (bulanık küme kuramında kullanılan) aralıklı değerlendirme yapmasının daha uygun olacağını belirtmiştir. İnsanın karar verme sürecinde yukarıda açıklanan olumsuzluklardan kaynaklı bulanıklığın dikkate alınmaması durumunda sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir (Anojkumar ve ark., 2014; Lee ve ark., 2008). AHP ile birleştirilen bulanık küme kuramı, karar verme sürecinin daha doğru bir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır (Anojkumar ve ark., 2014).

Silah sistemleri ve benzeri karmaşık teknik sistemlerin tanımlamaları genellikle dilsel ve muğlak/bulanık olmaktadır (Cheng, 1999; Mon, 1995); bu tür karmaşık sistemlerde insanların deneyimleri ve yargıları dilsel ve belirsiz/muğlak kalıplarla temsil edilmekte ve niceliksel olarak uygun bir şekilde tanımlanamamaktadır (Cheng ve ark., 1999). Bu dilsel veriler/ifadeler, bulanık küme kuramıyla çok daha uygun bir şekilde temsil edilebilmekte ve böylece değerlendirme yöntemleri daha da geliştirilebilmektedir.

Silah sistemlerindeki bu dilsel ve belirsiz/muğlak tanımlamalar, bulanık karar vermedeki son gelişmelere kadar kolaylıkla çözülememiştir (Cheng, 1999). Silah sistemleri büyük ve karmaşık olduğundan çok seviyeli ve çok etkenli özelliklere sahiptir; bu nedenle, silah sistemlerinin performans değerlendirmesi ve eniyilenmiş tasarımı, bulanık MCDM sorunları olarak ele alınabilmektedir. Bulanık çok ölçütlü karar verme (fuzzy multi-criteria decision making-FMCDM) metodolojisi, bulanık kümeleri kullanarak karar verme sorununu araştıran Bellman ve Zade (1970) tarafından başlatılmıştır (Wang ve Chang, 2007). FMDCM, yukarıda belirtilen silah sistemleri de dâhil olmak üzere askerî konularda kullanım alanı bulmuştur (bakınız Sánchez-Lozano ve Rodríguez, 2020 ve Sánchez-Lozano ve ark., 2022).

Birinci Bölüm'de sistemlerin sistemi olarak tanımlanan su üstü harp gemilerinin karmaşıklığı incelenmiş ve bu gemilerin en önemli ve hayati sisteminin sevk ve elektrik güç sistemi olduğu belirtilmiştir. Bu özellikleri nedeniyle ve yukarıda yapılan çözümlemeye istinaden tez konusu olan bu sistemlerin seçim değerlendirmesinde Şekil 1.12'ye istinaden ölçütlerin ağırlıklandırılmasının yapılabilmesi amacıyla bir FMCDM metodolojisinin kullanılması gerekmektedir.

Bulanık küme kuramı/mantığı ile ilgili çalışmaların tamamına yakın kısmında, bu kuramın başlangıcı, Lütfe Zade'nin "Fuzzy Sets" isimli makalesi (Zade, 1965) ile ilişkilendirilmektedir. Negnevitsky (2005), bulanık mantık kuramının 1930'larda Łukasiewicz (1930) tarafından takdim edildiğini, ilk bulanık küme tanımının ise Black (1937) tarafından yapıldığını belirtmiştir. Negnevitsky'ye göre Zade, bu kuramı tekrar ortaya koymuş, kuramın yaygınlaşmasını sağlamış ve kuramda doğal dilsel ifadelerin kullanımını göstermiştir. Zade, olasılık kuramı üzerindeki çalışmasını, matematiksel mantığın resmî bir sistemine genişletmiş ve doğal dil ifadelerini uygulamak için yeni bir kavram tanıtmıştır. Bulanık ifadeleri temsil eden ve işleyen bu yeni mantığa "bulanık mantık" adı verilmiştir. Bulanıklık kavramı, bulanık küme kuramına dayanmaktadır; bulanık mantık bu kuramın sadece küçük bir parçası olarak kalmaktadır.

Zade tarafından önerilen bu kuramın kabulü başlangıçta yavaş ve zorlu olmuş (Negnevitsky, 2005), kuram çok ilgi görmemiş ve bilim çevrelerinden pek çok eleştiri almıştır (Merigó ve ark., 2015). Bu kurama duyulan şüphelerin ardından 1970'lerin ortalarında artan sayıda bilim insanı Zade'in çalışmalarını daha ciddi bir şekilde incelemeye başlamıştır.

Merigó ve arkadaşları (2015) tarafından WoS veri tabanında yapılan taramada Şubat 2013 itibarıyla "bulanık" anahtar kelimesini kullanan 115.000 eser tespit edilmiştir. Bu veri tabanında yalnızca dergi ve tarama makaleleri süzülerek yapılan taramada tespit edilen yayın sayısı 56.500 olmuştur. Castelló-Sirvent ve arkadaşları (2022), 1994-2022 yılları için WoS veri tabanında kayıtlı ve özellikle Science Citation Index-Expanded (SCIE) ve Social Science Citation Index'te (SSCI) taranan çalışmalarla ilgili yaptıkları incelemede ise 2086 makalenin FAHP ile ilgili olduğunu tespit etmiştir. Sánchez-Lozano ve Rodríguez'in (2020) askerî eğitim uçağı ve Sánchez-Lozano ve arkadaşlarının (2022) muharip uçak seçimine yönelik yaptıkları ve bulanık kümeleri kullandıkları çalışmalarının alanyazın taramasında askerî konularla ilgili FMCDM yöntemlerinin kullanılmış olduğu toplam 30 farklı makalenin bilgisi verilmiştir. Bu makalelerden 11 adedinde sadece AHP ve 9 adedinde ise AHP ile birlikte diğer yöntemler ortaklaşa kullanılmıştır. Yukarıdaki kaynaklarda belirtilen bu yüksek yayın sayısı hem genel olarak hem de AHP özelinde, bulanık kuramın kullanımının yaygınlığını ve bu kuramın geniş bir kabul gördüğünü açıkça göstermektedir.

Bulanık karşılaştırma dizeyleri ile işlem yapabilmek maksadıyla muhtelif yöntemler geliştirilmiştir (Wang ve ark., 2008): van Laarhoven ve Pedrycz (1983) üçgen bulanık karşılaştırma dizeyinden üçgen bulanık ağırlıklar elde etmek için bulanık logaritmik en küçük kareler yöntemini (logarithmic least squares method-LLSM), Wang ve arkadaşları (2006) değiştirilmiş bir bulanık yöntemini, Buckley (1985) bulanık ağırlıkları hesaplamak için geometrik ortalama yöntemini, Chang (1996) bulanık karşılaştırma dizeyleri için net ağırlıklar türeten bir genişletilmiş çözümleme yöntemini, Xu (2000) bulanık bir en küçük kareler öncelik yöntemini önermiştir.

Skalna ve arkadaşlarına (2015) göre FAHP'ye yönelik en yaygın yöntemler Buckley (1985) ve Chang (1996) tarafından önerilen yöntemlerdir. Bununla birlikte; Wang ve arkadaşları (2008) tarafından, Chang'ın genişletilmiş çözümleme yönteminin, hesaplama basitliği nedeniyle oldukça fazla sayıda uygulamada kullanıldığı, ancak böyle bir yöntemin bulanık veya kesin bir karşılaştırma dizeyinden gerçek ağırlıkları elde edemediğinin tespit edildiği, bu yöntemle belirlenen ağırlıkların, karar ölçütlerinin veya seçeneklerinin göreceli önemini “hiçbir şekilde” temsil etmediği ve bu nedenle bulanık ikili karşılaştırma dizeyinden öncelikleri tahmin etmek için bu yöntemin kullanılmaması gerektiği bildirilmiştir.

Bu bölümün yukarıdaki kısımlarında, tez konusu kapsamında olan seçim işlemleri için bir FMCDM yönteminin kullanımının gerektiği belirtilmiş ve gerekçesi açıklanmıştır. Bu kapsamda, bu bölümde yapılan tüm çözümlemelere istinaden ölçütlerin ağırlıklandırılmasına yönelik değerlendirmelerin yapılabilmesi maksadıyla, bulanık kümeler için Buckley'in (1985) önermiş olduğu geometrik ortalama yaklaşımını esas alan FAHP yöntemi kullanılmıştır.

Bulanık küme kuramı, kararlar üretmek için yaklaşık bilgi ve kesinliğin kullanılmasıyla insan muhakemesine benzemektedir (Anojkumar ve ark., 2014). Belirsiz değerlendirmeler altında dilsel değişkenleri bulanık sayılara dönüştürmek daha iyi bir yaklaşım olmaktadır.

Keskin ifadelerin (örneğin doğru-yanlış) kullanıldığı geleneksel iki değerli Boolean mantığından farklı olarak, bulanık mantık çok değerlidir (Negnevitsky, 2005); bulanık mantık, “0” (tamamen yanlış) ile “1” (tamamen doğru) arasındaki mantıksal

değerlerin sürekliliğini kullanmaktadır. Siyah-beyaz benzeşimi ile ele alındığında, bulanık mantık siyah ile beyaz arasındaki spektrumu kullanmakta ve bu şekilde değerlendirmelerin kısmen hem beyaz hem de siyah olduğunu, başka bir ifadeyle, değerlendirmelerin kısmen hem “doğru” hem de “yanlış” olduğunu belirtmektedir. Bulanık mantık, günlük hayatta da sık kullanılan bir olgudur; örneğin uzun, genç vb. benzeri kavramlar her birey için farklı anlamlar ve değerlendirmeler içerebilmektedir.

Ögeleri x ile gösterilen E evrensel kümesinin geleneksel (kesin) bir alt kümesi olan A , matematiksel olarak (6.4) eşitliği ile gösterilen “karakteristik fonksiyon” ile tanımlanmaktadır (Negnevitsky, 2005). Kesin küme kuramında, kümenin sınırları keskindir ve herhangi bir ögenin (x) bir kümeye (A) ait olması durumu ($x \in A$) “1”, ait olmaması durumu ($x \notin A$) ise “0” ile tanımlanmaktadır.

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \quad (6.4)$$

$$f_A(x): E \rightarrow \{0,1\}$$

Ögeleri x ile gösterilen E evrensel kümesinin bulanık bir alt kümesi olan $\tilde{A}$, matematiksel olarak (6.5) bağıntıları ile gösterilen “üyelik fonksiyonu” ile tanımlanmaktadır (Negnevitsky, 2005). $\tilde{A}$ genel olarak (6.6) eşitliği ile gösterilmektedir (Bai ve Wang, 2006). Bulanık küme kuramında, E evrensel kümesinin ögesi olan x için üyelik fonksiyonu, x 'in $\tilde{A}$ bulanık kümesinin bir ögesi olma derecesine eşittir; “0” ile “1” arasında bir değer olan bu derece, $\tilde{A}$ kümesindeki x ögesinin üyelik değeri olarak da adlandırılan “üyelik derecesini” tanımlamaktadır.

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}}(x) &= 1 & x \text{ tamamen } \tilde{A}'\text{nin içinde} \\ \mu_{\tilde{A}}(x) &= 0 & x \text{ tamamen } \tilde{A}'\text{nin dışında} \\ 0 < \mu_{\tilde{A}}(x) < 1 & x \text{ kısmen } \tilde{A}'\text{nin içinde} \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in E\} \quad (6.6)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x): E \rightarrow [0,1]$$

Bir bulanık sayı, gerçel $\mathfrak{R}$ doğrusu üzerinde tanımlanan ve dışbükeylik ve normallik özelliklerine sahip bir bulanık kümedir (Lima Junior ve ark., 2014; Kuo-Ping Lin ve Hung, 2011). Dong ve arkadaşları (2015) tarafından Zade (1965) ve Zimmermann'a (1991) atfen bir $\tilde{A}$ bulanık sayısının; normalliğinin sağlanabilmesi için (6.7) eşitliği ve (6.8) eşitsizliği ile, dışbükeyliğinin sağlanabilmesi için ise (6.9) ve (6.10) eşitlikleri ile belirtilen koşulların sağlanması gerektiği belirtilmiştir. Bu özellikleri sağlayan bir bulanık sayı örneği Şekil 6.1'de gösterilmiştir (Kaufmann ve Gupta 1991'den aktaran Chen ve ark., 2006).

$$Supp(\tilde{A}) = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) > 0, x \in \mathfrak{R}\} \quad (6.7)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda \cdot x_1 + (1 - \lambda) \cdot x_2) \geq \min\{\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)\} \quad (6.8)$$

$$\forall x_1 \in \mathfrak{R}, \forall x_2 \in \mathfrak{R}, \forall \lambda \in [0,1]$$

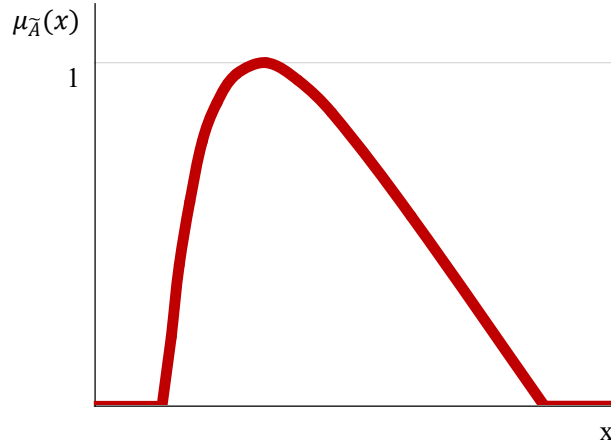
Supp : matrisin desteği

$$Hgt(\tilde{A}) = \max_{x \in \mathfrak{R}} \{\mu_{\tilde{A}}(x)\} \quad (6.9)$$

$$Hgt(\tilde{A}) = 1 \quad (6.10)$$

Hgt : matrisin yüksekliği

Yamuk ve üçgen bulanık sayılar en çok kullanılan bulanık sayı türleridir (Wang ve Elhag, 2006). Bulanık yamuk sayının üyelik fonksiyonu (6.11) eşitliği ile gösterilmektedir (Chen ve ark., 2006; Cheng ve Lin, 2002). n_2 'nin n_3 'e eşit olması hâlinde oluşan yeni sayı, üçgen bulanık sayı olarak tanımlanmakta (Chen ve ark., 2006; Cheng ve Lin, 2002) ve üyelik fonksiyonu (6.12) eşitliği ile gösterilmektedir (Chan ve ark., 2008; Wang ve Chang, 2007). Bu iki sayı sırasıyla Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir (Chen ve ark., 2006; Cheng ve Lin, 2002; Tzeng ve Huang, 2011; Wang ve Chang, 2007).



Şekil 6.1 Bir bulanık sayı örneği [Chen ve arkadaşlarından (2006) uyarlanmıştır]

(6.12) eşitliği ile gösterilen ve Şekil 6.3'te yer alan üçgen bulanık sayılar simetrik sayılardır (Cheng ve Mon, 1994; Durán ve Aguilo, 2008; Mon, 1995). Üçgen bulanık sayı, karar verme süreçlerinde en çok kullanılan bulanık sayı türüdür (Lima Junior ve ark., 2014); bu nedenle bu tez çalışmasında, yukarıda belirtilen değerlendirme işleminde kullanılması maksadıyla üçgen bulanık sayı tercih edilmiştir.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < n_1 \\ \frac{x - n_1}{n_2 - n_1} & n_1 \leq x \leq n_2 \\ 1 & n_2 \leq x \leq n_3 \\ \frac{x - n_4}{n_3 - n_4} & n_3 \leq x \leq n_4 \\ 0 & x > n_4 \end{cases} \quad (6.11)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < l \\ \frac{x - l}{m - l} & n_1 \leq x \leq n_2 \\ \frac{u - x}{u - m} & n_2 \leq x \leq n_3 \\ 0 & m > x \end{cases} \quad (6.12)$$

Tablo 6.3 Üçgen bulanık sayılar kullanılarak yapılan ikili karşılaştırmalar için önerilen dilsel değerlendirme ölçeği (Tzeng ve Huang, 2011)

Bulanık sayı	Tanım	(l, m, u) değeri (tasarımcı tanımlar)
$\tilde{1}$	Eşit önemde	(_, 1, _)
$\tilde{3}$	Kısmen önemli	(_, 3, _)
$\tilde{5}$	Önemli	(_, 5, _)
$\tilde{7}$	Çok önemli	(_, 7, _)
$\tilde{9}$	Aşırı önemli	(_, 9, _)

Tablo 6.4 Bulanık değerlendirme yapabilmek maksadıyla kullanılan üçgen bulanık sayı ölçeği (Sánchez-Lozano ve ark., 2015; Socorro García-Cascales ve ark., 2012)

Bulanık sayı	(l, m, u) değeri	(l, m, u) değerinin tersi
$\tilde{1}$	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
$\tilde{3}$	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
$\tilde{5}$	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
$\tilde{7}$	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
$\tilde{9}$	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

Tablo 6.5 Üçgen bulanık sayıların bulanık aritmetik işlemleri (Chen ve Tzeng, 2004)

Toplama işlemi $\oplus$:
$(l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$
Çıkarma işlemi $\ominus$:
$(l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2)$
Çarpma işlemi $\odot$:
$(l_1, m_1, u_1) \odot (l_2, m_2, u_2) \cong (l_1 \cdot l_2, m_1 \cdot m_2, u_1 \cdot u_2)$
Bölme işlemi $\oslash$:
$(l_1, m_1, u_1) \oslash (l_2, m_2, u_2) \cong (l_1 / l_2, m_1 / m_2, u_1 / u_2)$

Tablo 6.5 Üçgen bulanık sayıların bulanık aritmetik işlemleri (Chen ve Tzeng, 2004) (devamı)

Pozitif k sabiti ile çarpma işlemi $\odot$: $k \odot (l_2, m_2, u_2) = (k \cdot l_2, k \cdot m_2, k \cdot u_2)$
Ters alma işlemi: $(l_2, m_2, u_2)^{-1} = (1 / u_2, 1 / m_2, 1 / l_2)$

Bulanık üçgen sayılar kullanılarak oluşturulan yargılar bir dizeye aktarılmakta (Lee ve ark., 2008) ve (6.13) eşitliği ile gösterilen “ $\tilde{A}$ ” bulanık pozitif tersinir karşılaştırma dizeyi oluşturulmaktadır (Tzeng ve Huang, 2011). Bu dizeydeki her bir $\tilde{a}_{ij}$, Tablo 6.4’te yer alan üçgen bulanık sayılardan birine karşılık gelmektedir.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \cdots & \tilde{a}_{1j} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{a}_{i1} & \cdots & \tilde{a}_{ij} & \cdots & \tilde{a}_{in} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \cdots & \tilde{a}_{nj} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Tüm karar vericilerin bulanık pozitif tersinir karşılaştırma dizeyi birleştirilmektedir. Birleştirme işlemi karar vericilerin bireysel yargıların birleştirilmesi (aggregating individual judgments-AIJ) ve bireysel önceliklerin birleştirilmesi (aggregating individual priorities-AIP) olmak üzere iki yöntemle yapılabilmektedir (Forman ve Peniwati, 1998). Yöntemlerden kullanılacak olanının seçimi, karar vericilerin oluşturduğu grubun bir bütün olarak ya da ayrı bireyler olarak hareket etmeleri varsayımı ile ilgilidir. Grup üyeleri bir bütün olarak birlikte hareket ettiğinde (AIJ) geometrik ortalamanın kullanılması gerekmektedir. Grup üyeleri ayrı bireyler olarak hareket ettiğinde (AIP) ise hem geometrik ortalama hem de aritmetik ortalama kullanılabilir. Bu birleştirme işlemi ile ilgili olarak Saaty (2008) geometrik ortalamanın kullanımını önermiştir. Birleştirme esnasında karar vericilerin birbirine göre önem derecelendirmesi, diğer bir ifadeyle bir karar vericinin yargısının diğer karar vericilere kıyasla öneminin belirlenmesi hususunun, birleştirme esnasında işleme alınması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, tüm karar vericilerin yargılarının eşit önemde olduğu kabul edilmiş olduğundan, karar

vericiler arasında bu tür bir derecelendirme yapılmamıştır. Birleştirme işlemi ile ilgili olarak yukarıda yapılan çözümlemeye istinaden bu tez çalışmasında geometrik ortalamanın kullanılmasına karar verilmiştir; bahse konu yöntem matematiksel olarak (6.14) eşitliği gösterilmektedir (Forman ve Peniwati, 1998; Lee ve ark., 2008).

$$\bar{\bar{W}}_{ij} = \left(\prod_{k=1}^z \tilde{a}_{ij}^k \right)^{1/z} \quad (6.14)$$

$\bar{\bar{W}}_{ij}$: birleştirilmiş yargı

z : karar verici sayısı

Karşılaştırma dizeyinin oluşturulmasından sonra, Buckley'in (1985) önermiş olduğu geometrik ortalama yaklaşımını esas alan FAHP yöntemine istinaden, (6.15) eşitliği ile gösterildiği şekilde bahse konu dizeyin her bir satırının geometrik ortalaması alınmaktadır (Chen ve Tzeng, 2004; Tzeng ve Huang, 2011). Müteakiben, (6.16) eşitliği ile gösterildiği şekilde, tüm satırların geometrik ortalamaları birleştirilerek (toplanarak) her bir satır için düzleştirilmektedir; bu işlem sonucunda her bir ölçütün göreceli bulanık ağırlığı hesaplanmış olmaktadır.

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \odot \tilde{a}_{i2} \odot \dots \odot \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (6.15)$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \odot (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (6.16)$$

Bulanık sayıdan kesin sayıya dönüşüm (durulaştırma) işlemi için genellikle üç yöntem kullanılmaktadır: azamilerin ortalaması (mean of maximal-MOM), alan merkezi (center of area-COA) ve α -kesim (Chen ve Tzeng, 2004; Tzeng ve Huang, 2011). Bu yöntemler arasında COA basit bir yapıya sahiptir ve kullanımı için karar vericilere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu tez çalışmasında da durulaştırma işlemi için COA yöntemi tercih edilmiş olup, üçgen bulanık sayılar için yöntemin matematiksel formu (6.17) eşitliği ile gösterilmiştir.

$$COA = \frac{(u - l) + (m - l)}{3} + l \quad (6.17)$$

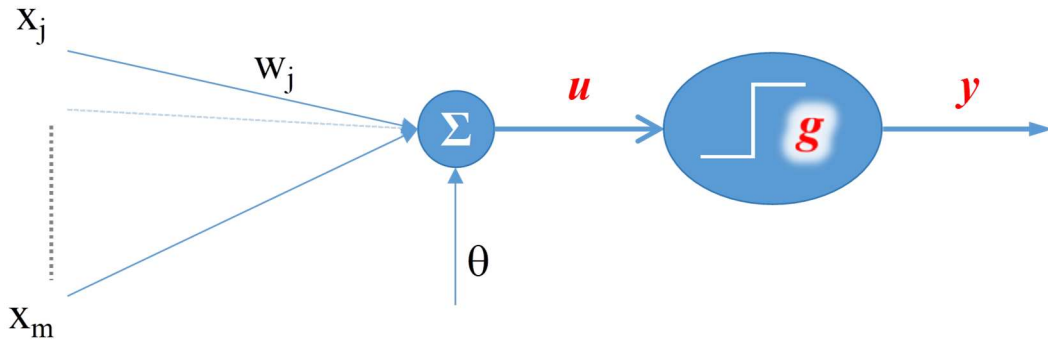
6.3 Yapay Sinir Ağları

Sinir ağı, insan beynini temel alan bir akıl yürütme (muhakeme) modeli olarak tanımlanabilmektedir (Negnevitsky, 2005). İnsan beyninin yaptığı bilgi işleme, düşünme ve öğrenme benzeri işlevlerin üretilmesi için çalışan biyolojik işlem bileşenleri tarafından gerçekleştirilmektedir (da Silva ve ark., 2017). Merkezi sinir ağının (sisteminin) temel işlem birimi olan hücre, “nöron” olarak adlandırılmaktadır. Nöron üç bölümden oluşmaktadır: akson, hücre gövdesi (soma) ve dendritler. Dendritin temel görevi diğer nöronlardan gelen uyarıları (sinyalleri) almak ve somaya iletmektir. Soma, dendritlerden gelen bilgilerin işlenmesinden sorumludur ve nöronun akson boyunca bir elektriksel “darbeyi” tetikleyip tetiklemeyeceğini gösteren bir aksiyon potansiyeli (eylem akımı) üretmektedir. Bu tetikleme, nöronun eşik potansiyeli ile ilişkilidir (McCulloch ve Pitts, 1943). Akson ise bu elektrik darbelerini (sinyallerini) diğer hücrelere iletmektedir. Nöronlar, sinaps olarak adlandırılan bağlantılar ile birbirine irtibatlanmaktadır. Sinapsta, nöronlar arasında fiziksel bir temas bulunmamaktadır; sinapsta sinyaller, karmaşık elektrokimyasal tepkimelerle bir nörondan diğerine yayılmaktadır. Bu yayım, sinapsta salınan sinir iletiler vasıtasıyla ağırlıklandırılmaktadır.

Her ne kadar yapay sinir ağlarının tarihçesi 1890’lı yıllara kadar uzansa da (Nelson ve Illingworth, 1990); sinirsel bilgi işleme (neurocomputing) ile ilgili ilk yayın olarak da kabul edilen, yukarıda açıklanan biyolojik nöronlardan ilham alan ve yapay nöron kavramını da oluşturan ilk matematiksel nöron modeli McCulloch ve Pitts’in (1943) tarafından önerilmiştir (da Silva ve ark., 2017; Negnevitsky, 2005). Minsky ve Papert (1969) tarafından yayımlanan ve yapay sinir ağlarının sınırlamalarını işleyen kitap nedeniyle bu alandaki çalışmalar önemli ölçüde azalmış olmasına rağmen, geçen zaman içinde yapılan birkaç çalışmanın da sayesinde 1980’li yılların sonundan itibaren bilim insanlarının bu alana olan ilgileri yeniden canlanmış ve yapay sinir ağlarının kesin geri dönüşü, gelişmiş işlem ve bellek yeteneklerine sahip bilgisayarların ve daha dayanıklı ve verimli eniyileme algoritmalarının geliştirilmesi ve son olarak biyolojik sinir sistemi ile ilgili yeni bulgular vb. farklı nedenler sonucu gerçekleşmiştir (da Silva ve ark., 2017).

McCulloch ve Pitts (1943) tarafından önerilen yapay nöron modeli Şekil 6.4’te gösterilmiştir (da Silva ve ark. 2017; Jain ve ark., 1996). Bahse konu model matematiksel olarak (6.18) eşitliği ile ifade edilebilmektedir (da Silva ve ark.,

2017). Bu matematiksel nöronda, her bir girdi sinyali (x_i) kendisine ait sinaptik ağırlık (w_i) ile çarpılarak tüm ağırlıklandırılmış sinyallerin toplamı alınmakta ve eşik değeri (θ) bu toplamdan çıkarılarak aksiyon potansiyeli elde edilmektedir. Bu aksiyon potansiyeline bir “ $g(u)$ ” etkinlik fonksiyonu uygulanarak “ y ” çıktı değeri hesaplanmaktadır. Bu çıktı değeri müteakip nöronlara girdi sinyali olarak iletilmekte ve yukarıda belirtilen işlemler tekrarlanarak tüm ağırlıklandırılmış toplamın belirli bir θ eşik değeri üzerinde olması hâlinde, çıktı olarak 1 rakamını, tersi durumunda ise 0 rakamını vermektedir (Jain ve ark., 1996). Gösterim kolaylığı bakımından eşik; “ x_0 ” ile gösterilen ve değeri 1 olan girdiye, değeri “ $-\theta$ ” olan ve “ w_0 ” ile gösterilen ağırlığının uygulanması ile de ifade edilebilmekte ve gösterilebilmektedir.



Şekil 6.4 McCulloch ve Pitts (1943) tarafından önerilen yapay nöron modeli [da Silva ve arkadaşlarından (2017) ve Jain ve arkadaşlarından (1996) uyarlanmıştır]

$$y = g(u) \quad (6.18)$$

$$u = \sum_{j=1}^m w_j \cdot x_j - \theta$$

Yapay sinir ağı yapıları yukarıda belirtildiği üzere biyolojik sinir sisteminden ilham alınarak (taklit edilerek) geliştirilmiştir (da Silva ve ark., 2017). Bu kapsamda, biyolojik nöron ile yapay nöronun basit benzeşimi Tablo 6.6’da gösterilmiştir. Bu benzeşimde, (yine yukarıda belirtildiği şekilde) bir nöronun çıktısının müteakip nöronun girdisi olduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Müteakip kısımda açıklanan ve bu tez çalışmasında önerilen seçim yönteminde kullanılan yapay sinir ağları mimarisinde bu benzeşim esas alınmıştır.

Tablo 6.6 Biyolojik nöron ile yapay nöronun basit benzeşimi

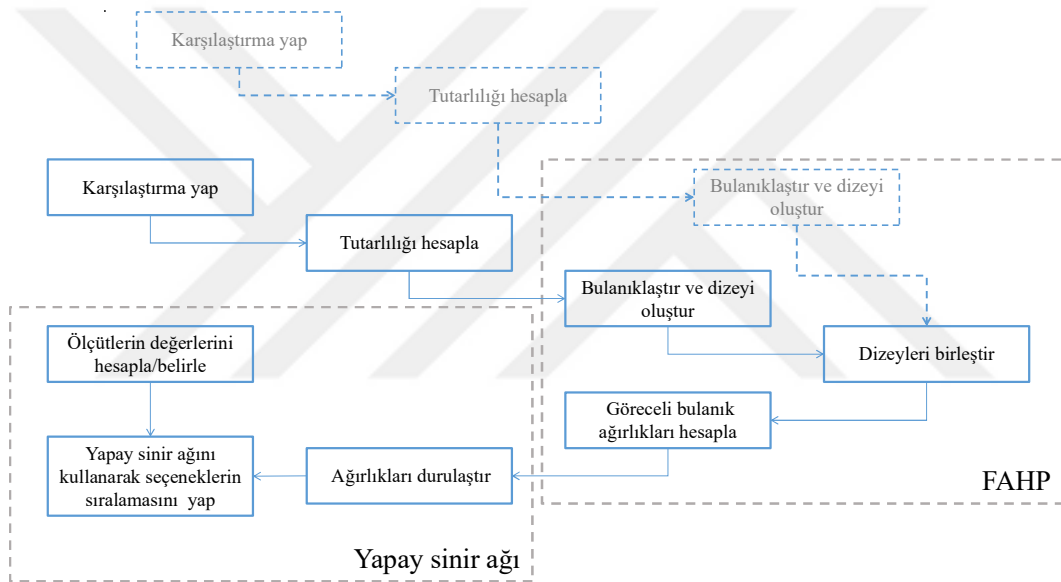
Biyolojik tanım	Yapay tanım
Sinaps	Ağırlık
Dendrit	Ağırlıklandırılmış girdi
Soma	Etkinlik fonksiyonu
Akson	Çıktı

6.4 Jenerik Gemilere Sevk ve Elektrik Güç Sistemi Seçimi için Önerilen Model

Birinci, İkinci ve Üçüncü Bölüm’de özellikleri belirtilen iki örnek muharip gemi için Dördüncü Bölüm’de belirlenen sevk ve elektrik sistemi seçenekleri arasından Beşinci Bölüm’de belirlenen ölçütlere istinaden yapılacak seçime yönelik önerilen FAHP ve yapay sinir ağlarından oluşan karar destek yöntemine ilişkin model, bu tez çalışmasının bundan önceki kısımlarında yapılmış olan çözümlemeler kapsamında, Şekil 6.5’te gösterilmiş olup bu modeldeki işlem adımları aşağıda açıklanmıştır:

- Karar vericiler tarafından ölçütlerle ilgili karşılaştırmalar yapılmaktadır.
- Yapılan karşılaştırmaların tutarlılıkları (CR) hesaplanmaktadır. Hesaplanan CR değerinin 0,1 üzerinde olması durumunda, ilgili karar verici tarafından karşılaştırma işlemi, CR değeri 0,1’in altına düşene kadar tekrar yapılmaktadır.
- Yapılan karşılaştırmalar, bulanık sayılara dönüştürülerek bulanık karşılaştırmalar dizeyi oluşturulmaktadır.
- Karar vericilerin karşılaştırmalar dizeyleri bulanık operatörler kullanılarak birleştirilmektedir.
- Birleştirilmiş karşılaştırmalar dizeyine Buckley’in (1985) FAHP yaklaşımı uygulanarak her bir ölçütün göreceli bulanık ağırlığı hesaplanmaktadır.

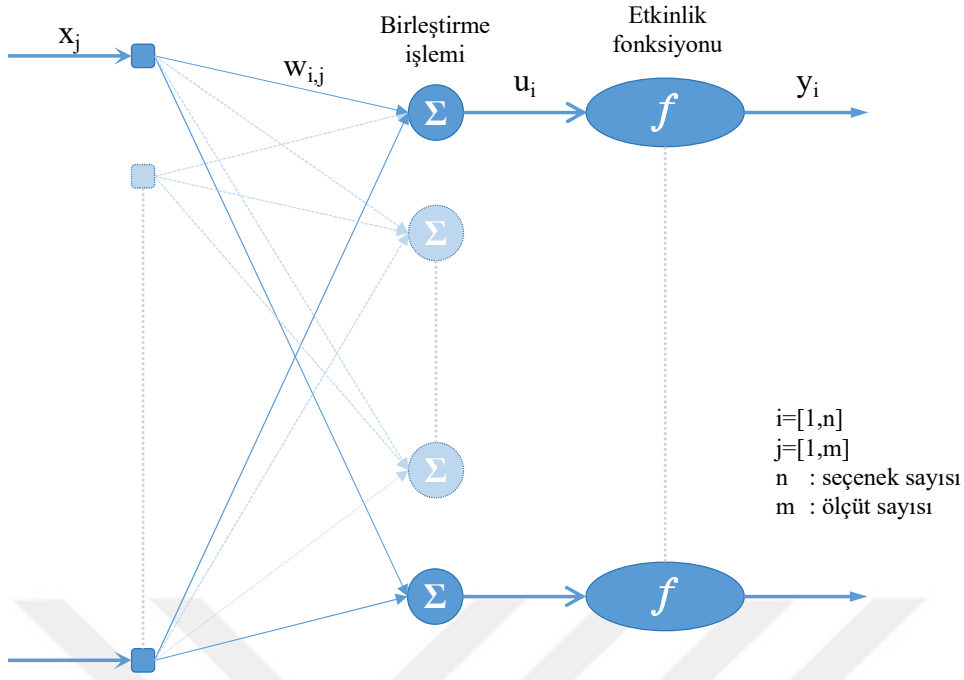
- Hesaplanan bu ağırlık değerleri durulaştırılmaktadır.
- Durulaştırılan ağırlık değerleri yapay sinir ağının girdi değerleri olarak kullanılmaktadır.
- Ölçütlerin değerleri hesaplanmakta/belirlenmektedir.
- Her bir ölçüt için, her bir seçeneğin diğer seçeneklere kıyasla hesaplanan ağırlıkları, yapay sinir ağının (sinaptik) ağırlık değerleri olarak atanmaktadır.
- Seçeneklerin sıralaması yapay sinir ağı tarafından yapılarak seçim işlemi tamamlanmaktadır.



Şekil 6.5 Bu tez çalışmasında sevk ve elektrik sistemi seçimi için önerilen FAHP ve yapay sinir ağlarından oluşan karar modeli

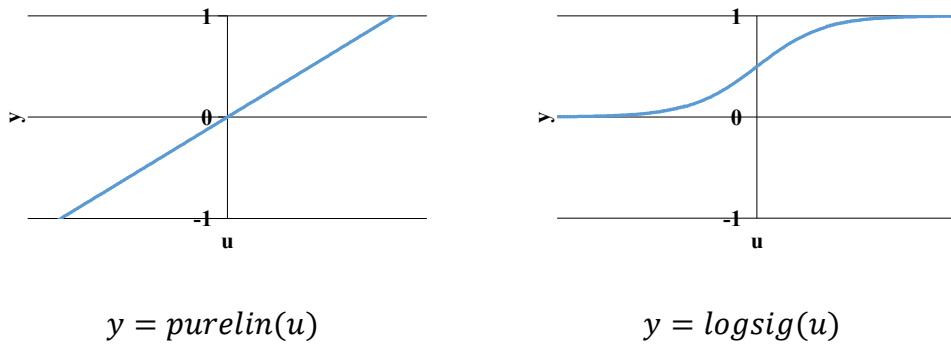
Yukarıda verilen işlem adımlarına istinaden, bu tez çalışmasında önerilen yapay sinir ağı mimarisi Şekil 6.6’da gösterilmiştir.

Yapay sinir ağının yapmış olduğu sıralamalara yönelik hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi maksadıyla, bu tez çalışmasında, MATLAB (R2022b) Simulink Deep Learning Toolbox™ Simulink Neural Network Simulink Block Library kullanılmıştır. Bu kapsamda, Şekil 6.6’da gösterilen ağ mimarisi MATLAB Simulink ortamına aktarılmış olup, jenerik gemiler için bu ortamda oluşturulan ağ mimarileri fırkateyn için Ek-Ç’de ve ADKG için Ek-D’de gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Önerilen yapay sinir ağı mimarisi

Alanyazında birçok farklı türde etkinlik fonksiyonu kullanılmaktadır. MATLAB Simulink Deep Learning Toolbox™'ta da muhtelif türde etkinlik fonksiyonları yer almaktadır. Doğrusal (purelin) ve lojistik sigmoid (logsig) en sık olarak kullanılan etkinlik fonksiyonlarıdır (Beale ve ark., 2024). Bu tez çalışmasında, yapay sinir ağları, sıralama için kullanılmış olduğundan bu fonksiyonların seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bahse konu fonksiyonların karakteristikleri Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 En sık kullanılan etkinlik fonksiyonları [Beale ve arkadaşlarından (2024) uyarlanmıştır]

ÖNERİLEN MODELİN UYGULANMASI SONUCU ELDE EDİLEN BULGULAR

Yapay sinir ağı mimarisinin oluşturulmasından sonra girdi ve (sinaptik) ağırlık değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir (Kalbande ve ark. 2011). Karar vericiler tarafından ölçütlere ilişkin değerlendirmelerin yapılmasını müteakip tutarlılık kontrolü yapılarak bu değerlendirmeler birleştirilmiş ve Buckley'in (1985) FAHP yaklaşımı uygulanarak ölçütlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu ağırlık değerleri, COA yöntemi ile durulaştırılmış ve elde edilen durulaştırılmış (kesin) değerler jenerik gemiler için Ek-Ç ve D'de gösterilen ağ mimarilerine girdi verileri olarak atanmaya hazır hâle getirilmiştir. Bahse konu değerler Tablo 7.1'de verilmiştir. Birleştirilmiş karşılaştırmalardan elde edilen bu değerler arasında en yüksek ağırlığa sahip ölçüt kızıl altı iz olmuştur.

Tablo 7.1 Ölçütlerin ağırlık değerleri

Toplam hacim	Toplam ağırlık	Yıllık yakıt tüketimi	IWEEDI	TBO	Karmaşıklık	Yedekleme	Hassasiyet	Kızıl altı iz
0,1417	0,1584	0,0668	0,1757	0,0467	0,0869	0,0391	0,0680	0,2831

Bahse konu ağların (sinaptik) ağırlık değerlerinin belirlenmesi ile ilgili olarak ise, ölçütlere Beşinci Bölüm'de belirtilen işlemler uygulanmış ve sonuçları Tablo 7.2 ve Tablo 7.3'te verilmiştir. Bu işlemler için gerekli veriler Ek-A'dan alınmıştır. Bahse konu tablolarda mevcut değerlere ilişkin değerlendirmeler müteakip kısımlarda yapılmıştır.

7.1 Jenerik Fırkateyn için Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi

Görev profili, makinelerin çalıştırılma durumları, EPLA, hız-direnç ilişkisi, yakıt depolanma hacmi, ağırlık, menzil, yakıt verimi, sfc ve IWEEDI birbiri ile ilişkili ve iç içe geçmiş olgulardır. Düşük sfc değerleri, yüksek verim değerlerine karşılık gelmektedir; aynı zamanda düşük sfc, tanımında da olduğu şekilde birim güç için daha az yakıt tüketimi sağlamaktadır. Bir enerji verimliliği göstergesi olan IWEEDI

da sfc'ye bağı olup yüksek sfc değerleri, IWEEDI'nın de yüksek değerler almasına neden olmaktadır.

Yüksek verimli makineler kullanmak aynı mesafeyi daha az yakıtla gidebilmeye katkı sağlamaktadır, ayrıca gemi üzerinde yakıt için daha az hacmin ayrılmasına ve bunun sonucu gemiye ilave donanım kurulabilmesine veya maliyetler için önemli bir çarpan olan gemi boyutlarının küçültülmesine imkân vermektedir. Benzer şekilde daha az yakıtın depolanması ağırlığın azaltılmasını da sağlamaktadır.

Şekil 7.1'de ısı makinaların; yük ve verim verileri, gemi hızına [çalıştırılma durumu (Tablo 4.2)] bağı olarak gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, dizel motorlar gaz türbinlerine kıyasla daha yüksek verim değerlerinde çalışmaktadır. Özellikle düşük yüklerde gaz türbinleri çok düşük verimlere sahiptir. Makinelerin devreye alındığı hız kademelerinde (örneğin CODAD için 26 knot'ta ikinci SM1'in devreye alınması) genellikle makineler düşük yükte çalışmakta, dolayısıyla sfc değerleri yüksek (verimleri düşük) olmaktadır. Yükleri arttıkça makineler, genellikle daha düşük sfc değerleri (daha yüksek verim) sağlamaktadır. Üçüncü Bölüm'de açıklandığı üzere dizel motorların ve gaz türbinlerinin çalışma ilkeleri dikkate alındığında, bu makinelerin her devirde ve her güçte yüksek verimde çalıştırılma imkânı bulunmamaktadır. Bu nedenle sevk makinelerinin seçimlerinin Üçüncü Bölüm'de belirtildiği üzere tasarım noktasına (Şekil 3.5) istinaden yapılması gerekmektedir. Şekil 7.1'de yer alan grafikler incelendiğinde, tasarım noktasındaki değerlerin yüksek olduğundan hareketle, bu gerekliliğin sağlanmış olduğu görülmektedir.

Dizel motorlar, gaz türbinlerine kıyasla daha verimli olmakla birlikte, bu motorların birim güç başına düşen birim ağırlıkları oldukça düşüktür. Örneğin CODOG-CC'de SM5'in ağırlık/güç oranı 0,833 ton/MW iken SM4 için bu oran 4,354 ton/MW'tır. Düşük verimleri nedeniyle gaz türbinleri, Birinci Bölüm'de de belirtildiği üzere, görev profilinde en az kullanılacakları fakat hayati önem taşıyabilen görece yüksek hız kademelerinde kısa süreler için kullanılmak üzere gemilere kurulmaktadır.

Tablo 7.2 Jenerik fırkateynin seçenekleri için belirlenmiş/hesaplanmış ölçüt değerleri

Ölçüt Seçenek	Toplam hacim [m ³]	Toplam ağırlık [ton]	Yıllık yakıt tüketimi [ton]	IWEEDI [ton CO ₂ /ton deplasman deniz mili]	TBO		Karmaşıklık [-]	Yedekleme Likert tipi	Hassasiyet Likert tipi	Kızıl altı iz [W/m ² µm]
					[yıl]	Likert tipi				
CODAD	402	296	3554	48	20,5	3	21,053	4	1	1188,355
CODOG	273	215	3935	54	12,0	2	57,312	4	1	5349,311
CODOG-CC	292	216	3798	52	12,0	2	54,154	3	1	2894,060
CODAG-CC	238	189	3720	51	10,0	1	67,839	3	1	3984,469
CODLOG-CC	392	280	3876	53	0,0	5	34,737	3	5	2894,060
CODLAG-CC	331	251	3818	52	0,0	5	37,895	3	5	3984,469
IFEP	511	395	4935	67	0,0	5	1	2	5	5349,311

Tablo 7.3 Jenerik ADKG'nin seçenekleri için belirlenmiş/hesaplanmış ölçüt değerleri

Ölçüt Seçenek	Toplam hacim [m ³]	Toplam ağırlık [ton]	Yıllık yakıt tüketimi [ton]	IWEEDI [ton CO ₂ /ton deplasman deniz mili]	TBO		Karmaşıklık [-]	Yedekleme Likert tipi	Hassasiyet Likert tipi	Kızıl altı iz [W/m ² µm]
					[yıl]	Likert tipi				
TEKİL	155	113	1139	46	12,0	2	8,333	2	1	975,798
CODAD	175	128	1120	45	22,8	3	16,667	4	1	975,798
CODOD	183	141	1075	44	13,3	2	24,593	2	1	975,798
CODELOD	260	183	1105	45	48,0	5	8,333	2	1	975,798

Ağırlık değerlerine ilişkin yukarıda yapılan çözümleme hacim için de geçerlidir; örneğin yine CODOG-CC dikkate alındığında, SM5'in hacim/güç oranı 2,639 m³/MW iken SM4 için bu oran 5,242 m³/MW'tır.

Dizel motorlarda motorun markasına, modeline ve varsa kullanıcısı tarafından istenen ilave donanım/özelliklere istinaden bu oranlar değişebilmektedir. Örneğin aynı marka olmakla birlikte farklı model ve tasarıma sahip olan SM1 (5,637 ton/MW ve 8,049 ile m³/MW) ile SM4 karşılaştırıldığında bahse konu oranlar farklılık gösterebilmektedir. Dizel motorlar için belirtilen bu durum gaz türbinleri için de geçerli olmaktadır.

Devir düşürücülerin ve dönüştürücülerin ağırlık ve hacim hesaplamaları Beşinci Bölüm'de verilen eşitlikler vasıtasıyla yapılmıştır. SEM'ler için gerekli veriler FFX-II firkateyn programında kullanılan motorun üreticisinden alınmış olup ilgili bilgiler Ek-A'da verilmiştir. Devir düşürücülerin ağırlık ve hacimleri, düşürücüye giren en yüksek güce sahip makine ile ilişkilendirilmiş olduğundan, gücü yüksek makinelerin bağlandığı devir düşürücüler de büyük hacimli ve daha ağır olmuştur. IFEP'te herhangi bir devir düşürücü kullanılmamış olmasına rağmen, SEM3'lerin ve ÜS3'lerin sahip olduğu yüksek ağırlık değerleri ve ilaveten, dönüştürücülerin kullanılmasının getirmiş olduğu ilave ağırlık artışı, bu seçeneği en ağır seçenek hâline getirmiştir. IFEP'in ağırlığı ile ilgili bu durum, hacim değerleri için de geçerli olmaktadır.

Sevk makinelerinin TBO değerleri, bakımları temsil eden ölçüt olarak belirlenmiştir. Beşinci Bölüm'de yapılan çözümlemeye istinaden sevk gaz türbinlerinin TBO değerleri "0" olarak belirlenmiştir. Sevk dizel motorları için, Ek-A'da yer alan kaynaklarda, makinelerin çalışma saati esas alınarak verilmiş olan değerler, yıllık görev (seyir) süresi ve görev profiline istinaden yıl birimine dönüştürülmüş ve TBO değeri olarak kullanılmıştır. Bu değerler, Tablo 5.1'de verilen Likert tipi ölçekle ilişkilendirilerek Tablo 7.2'de verilmiştir. Dizel sevk makinesi olmayan seçenekler, en yüksek ölçek değerini almıştır.

Seçeneklerde önerilen devir düşürücülerin devir düşürme oranı ve hız kademesi sayısı, karmaşıklık ölçütü için ölçek olarak belirlenmiştir. Gaz türbinlerinin, dizel motorlara kıyasla daha yüksek olan azami çalışma devirleri (bakınız Ek-A) bu makineler için kullanılacak devir düşürücülerin karmaşıklığını arttırmaktadır.

Seçenekler arasında CODAG-CC, birden fazla kademeye sahip tek devir düşürücüdür. Bu seçenekte, sadece dizel motorun kullanıldığı durumlar ve dizel motorun gaz türbini ile birlikte kullanıldığı durumlar için farklı düşürme oranları gerekmektedir. Bu nedenle, CCG2 iki kademeye sahiptir. IFEP’te SEM’ler doğrudan şafta bağlı olduğundan devir düşürücü kullanılmamıştır. Matematiksel olarak karşılaştırmaların yapılabilmesi maksadıyla, IFEP için karmaşıklık ltnn değeri simgesel olarak “1” alınmıştır.

Bu tez çalışmasında, fırkateynin her bir seçeneği için asgari görev hızını (14 knot) tek başına yapabilecek makinelerin sayısı, yedeklenebilirlik ltnn lği olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, Tablo 5.2’de gösterilen Likert tipi ölçek kullanılarak elde edilen değerler Tablo 7.2’de gösterilmiştir.

Asgari görev hızı olarak belirlenmiş olan hız kademesi (14 knot) için Tablo 4.2’de belirtilen makineler dışında kalan ve şaft hattına doğrudan bağlı olmayan, bu hâliyle geminin uygun herhangi bir mevkiye konumlandırılabilir olan makinelerin sayısı, hassasiyet ltnn lği olarak belirlenmiş ve Likert tipi ölçek ile ilişkilendirilmiştir. Elektrikli tahrike sahip olan seçeneklerde üreteç setleri geminin muhtelif bölmelerine konumlandırılabilir. Bu tez çalışmasında hassasiyet kabiliyetiyle ilgili ölçek sadece yukarıda belirtilen tanımla sınırlandırılmış olup bu durum, seçeneklerin bu kabiliyete ilişkin başka özelliklerinin olmadığı anlamını taşımamaktadır.

Kızıl altı iz lt için, ısı sevki makinelerin (IFEP için gaz türbini tahrikli üreteç setlerinin) tam yükte azami egzoz gazı sıcaklıkları kullanılarak her bir seçenek için hesaplanmış olan gazlardan yayılan ışınının (spektral yayma) gücünün değerleri kullanılmıştır. Düşük egzoz sıcaklığına sahip makineler daha düşük kızıl altı iz oluşturarak gemilerin ısı grnlebilirliklerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Tablo 7.2’de yer alan değerler, her bir seçenekte bulunan sevki makineleri için Ek-A’da yer alan egzoz gazı sıcaklık değerlerine istinaden hesaplanmıştır.

7.2 Jenerik ADKG için Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi

Fırkateyn için yukarıda yapılan çözümlerler, aşağıda belirtilen hususlar hariç olmak üzere, ADKG için de geçerli olduğundan ilave çözümler yapılmamıştır. Birinci Bölüm’de ayrıntılı olarak zmlandığı üzere ADKG’ler görece

“karmaşıklığı daha düşük” gemilerdir. Bu görecelik, sevk ve elektrik sistemi için de geçerli olmaktadır. ADKG için ölçütlerin değerleri Tablo 7.3’te verilmiş olup bu değerlerin hesaplanabilmesi maksadıyla ihtiyaç duyulan sayısal veriler Ek-A’da verilmiştir.

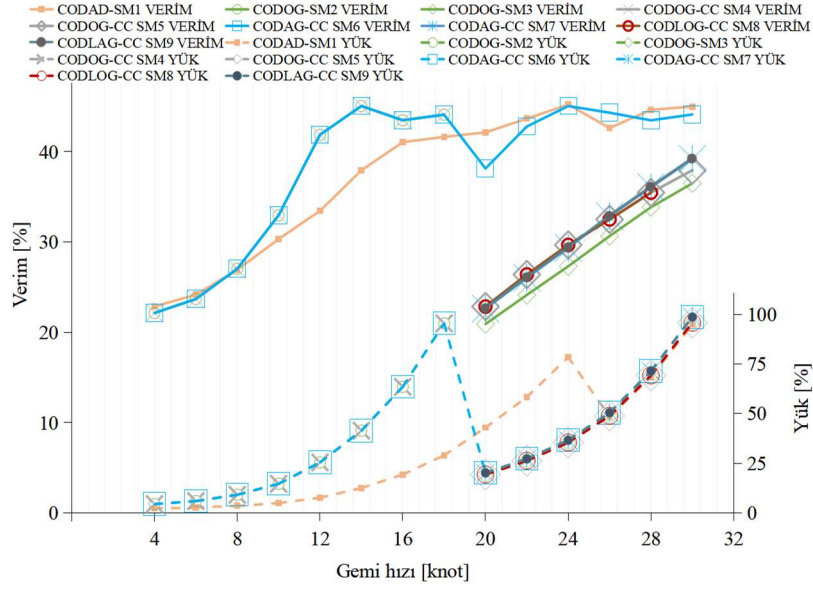
Devir düşürücülerin ve dönüştürücülerin ağırlık ve hacim hesaplamaları Beşinci Bölüm’de verilen eşitlikler vasıtasıyla yapılmıştır. SEM’ler için gerekli veriler FFX-II fırkateyn programında kullanılan motorun üreticisinden alınmış olup ilgili bilgiler Ek-A’da verilmiştir.

TBO, bakımları temsil eden ölçüt olarak belirlenmiştir. Beşinci Bölüm’de yapılan çözümlemeye istinaden sevk dizel motorları için, Ek-A’da yer alan kaynaklarda, makinelerin çalışma saati esas alınarak verilmiş olan değerler, yıllık görev (seyir) süresi ve görev profiline istinaden yıl birimine dönüştürülmüş ve TBO değeri olarak kullanılmıştır. Bu değerler, Tablo 5.1’de verilen Likert tipi ölçekle ilişkilendirilerek Tablo 7.3’te verilmiştir.

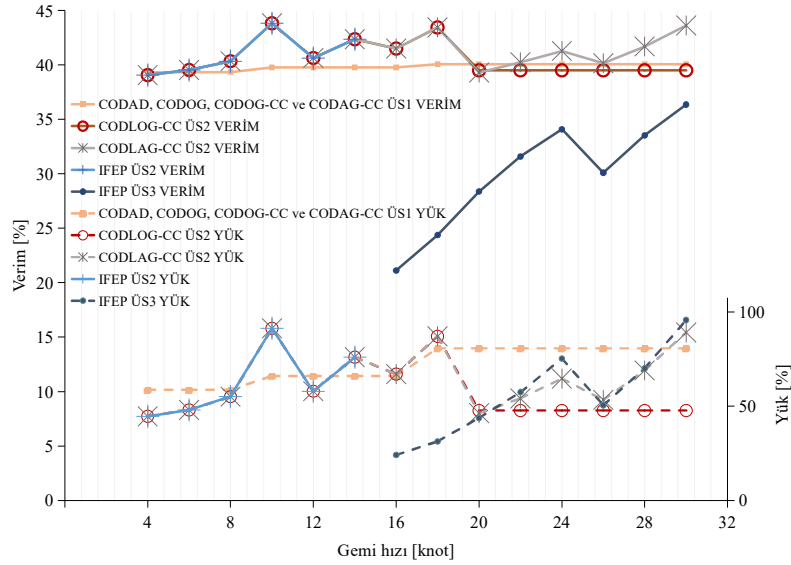
Seçeneklerde önerilen devir düşürücülerin devir düşürme oranı ve hız kademesi sayısı, karmaşıklık ölçütü için ölçek olarak belirlenmiştir. ADKG’nin tasarımında, fırkateynin CODAG-CC seçeneğine benzeyen, kademeli bir devir düşürücünün kullanımını gerektirecek bir zorunluluk bulunmadığından, bu ölçüt için sadece devir düşürme oranları dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, ADKG’nin her bir seçeneği için asgari görev hızını (10 knot) tek başına yapabilecek makinelerin sayısı, yedeklenebilirlik ölçütünün ölçeği olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, Tablo 5.2’de gösterilen Likert tipi ölçek kullanılarak elde edilen değerler Tablo 7.3’te gösterilmiştir.

Asgari görev hızı olarak belirlenmiş olan hız kademesi (10 knot) için Tablo 4.3’te belirtilen makineler dışında kalan ve shaft hattına doğrudan bağlı olmayan, bu hâliyle geminin uygun herhangi bir mevkiye konumlandırılabilen makinelerin sayısı, hassasiyet kabiliyetinin ölçeği olarak belirlenmiş ve Likert tipi ölçek ile ilişkilendirilmiştir. Bu tanıma uygun makine, seçeneklerde bulunmadığından, tüm seçenekler için Beşinci Bölüm’de belirtilen Likert tipi ölçeğe istinaden 1 değeri verilmiştir. Bu tez çalışmasında hassasiyet kabiliyetiyle ilgili ölçek sadece yukarıda belirtilen tanımla sınırlandırılmış olup bu durum, seçeneklerin bu kabiliyete ilişkin



Hız Seçenek	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
CODAD	2xSM1											4xSM1		
	2xÜS1		3xÜS1			2xÜS1								
CODOG	2xSM2								2xSM3					
	2xÜS1		3xÜS1			2xÜS1								
CODOG-CC	2xSM4								1xSM5					
	2xÜS1		3xÜS1			2xÜS1								
CODAG-CC	2xSM6								2xSM6+1xSM7					
	2xÜS1		3xÜS1			2xÜS1								
CODLOG-CC	2xSEM1								1xSM8					
	1xÜS2		2xÜS2		3xÜS2			1xÜS2						
CODLAG-CC	2xSEM2								2xSEM2+1xSM8					
	1xÜS2		2xÜS2		3xÜS2			2xÜS2		3xÜS2				
IFEP	2xSEM3													
	1xÜS2		2xÜS2		1xÜS3						2xÜS3			



Şekil 7.1 Jenerik fırkateynin seçeneklerinde yer alan ısı makinelerinin gemi hızına [çalıştırılma durumu (Tablo 4.2)] bağlı yük ve verim verileri

başka özelliklerinin olmadığı anlamını taşımamaktadır.

7.3 Jenerik Gemiler için Seçim İşleminin Yapılması

Altıncı bölümde belirtildiği üzere Tablo 7.2 ve Tablo 7.3'te yer alan ölçüt değerleri yapay sinir ağının (sinaptik) ağırlık değerleri olarak kullanılacaktır. Bu tablolar $n \times m$ formunda birer dizey yapısındadır. Yapay sinir ağında kullanılabilmesi maksadıyla, bu dizeyde yer alan değerlerin birbirine göre göreceli ağırlıklarının belirlenmesi, başka bir ifadeyle değerlerin düzgeleştirilmesi gerekmektedir. Bu ağırlıklandırma yapılmadan önce tüm ölçütlerin aynı esasa istinaden düzenlenmesi önem teşkil etmektedir. Bu kapsamda, Tablo 7.2 ve Tablo 7.3'te yer alan ve olumsuzluk içermesi nedeniyle yüksek değere sahip olması istenmeyen (örneğin ağırlık, hacim), başka bir ifadeyle yüksek değer alması durumunda daha düşük ağırlığa sahip olması gereken ölçütlerin değerleri için (7.1) eşitliği ile gösterilen dönüşüm yapılmıştır (Xu ve Chen, 2007). Bu dönüşüm sonucunda elde edilen değerler kullanılarak düzgeleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda oluşan ağırlık dağılımları Şekil 7.2 ve 7.3'te gösterilmiştir.

$$r_j = \frac{\frac{1}{a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_{ij}}} \quad (7.1)$$

r_j : i. seçenek (satır) için j. ölçütünün (sütununun) değeri

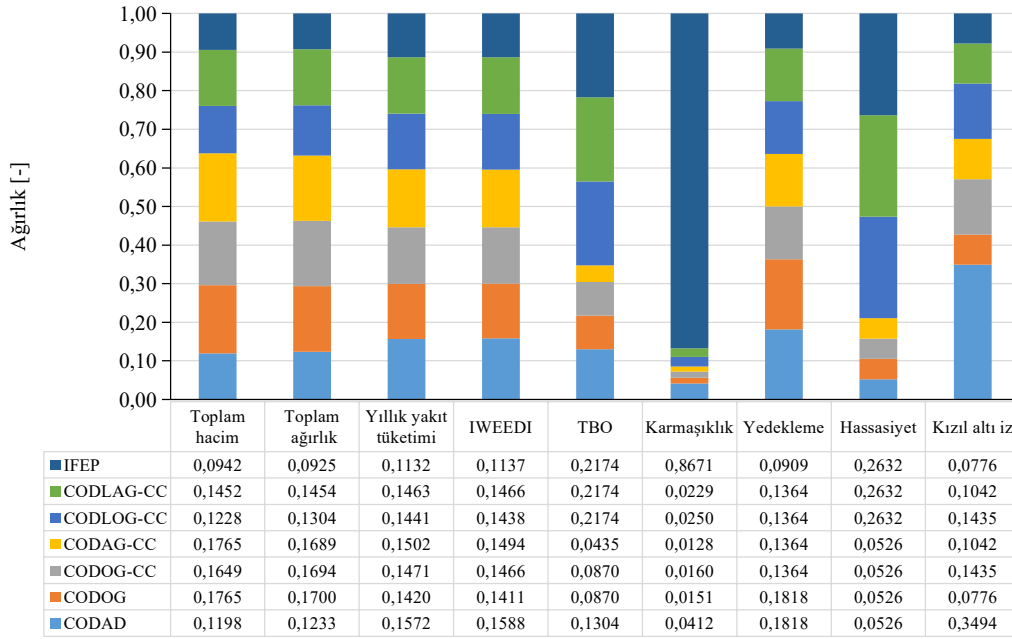
n : seçenek (satır) sayısı

Tablo 7.1'de yer alan değerler, girdi değerleri; Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'te yer alan değerler, (sinaptik) ağırlıklar olarak yapay sinir ağlarına uygulanmış ve her iki gemi için seçeneklerin sıralaması yapılmıştır. Bu sıralamalar Tablo 7.4 ve Tablo 7.5'te verilmiştir.

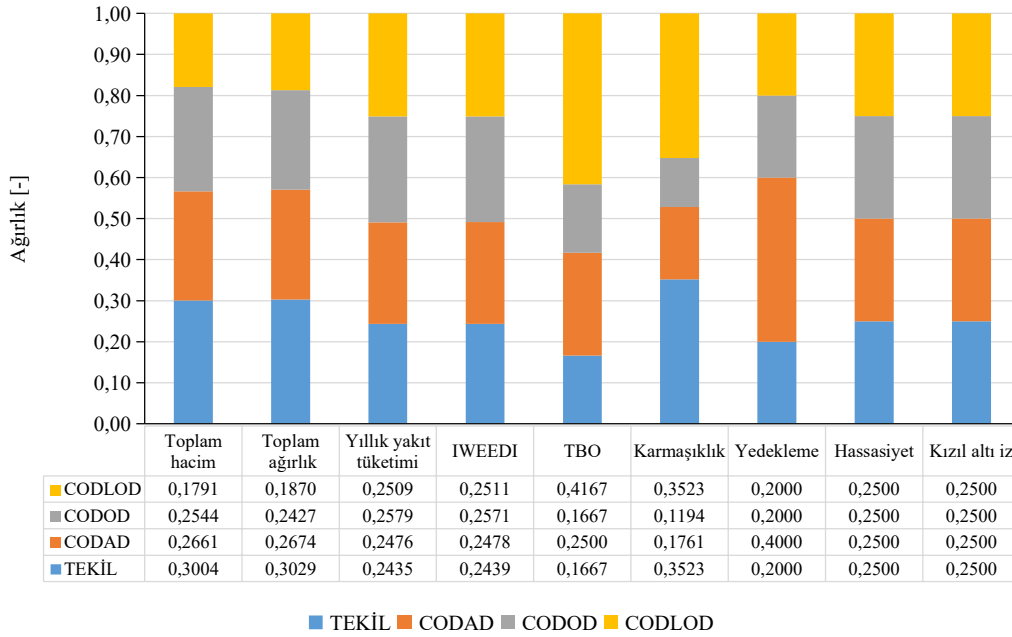
Jenerik firkateyn için elde edilen sonuca istinaden ilk sırada CODAD yer almıştır. Bu sonucun elde edilmesinde, Tablo 7.1'de en yüksek değeri alan ölçütün “kıızıl altı iz” olmasının ve Şekil 7.2'de bu ölçüt için CODAD'ın en yüksek değeri almasında belirleyici etken olduğu değerlendirilmiştir.

ADKG için elde edilen sıralamada, ilk sırada tekil seçeneği yer almıştır. Bu sonucun elde edilmesinde, Tablo 7.1'de en yüksek değere sahip ölçütler için bu

seçeneğin Şekil 7.3'te görüldüğü üzere yüksek değerlere sahip olmasının belirleyici etken olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 7.2 Jenerik fırkateyn için ölçütlerin birbirine göre göreceli ağırlıkları



Şekil 7.3 Jenerik ADKG için ölçütlerin birbirine göre göreceli ağırlıkları

Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 incelendiğinde, farklı seçeneklerin, muhtelif ölçütler için birbirinden farklı değerler aldığı görülmektedir. Bir ölçüt için yüksek değer almış olan bir seçenek, başka bir ölçüt için daha küçük değer almıştır. Bu olgu, seçim sürecini karmaşıktır ve bu durum da seçimin geleneksel yöntemlerle

yapılmasında büyük zorluklarla karşılaşılmasına veya yapılamamasına neden olmaktadır. Seçeneklerin sıralamasının yapılması için seçeneklerin ölçütlere göre almış olduğu değerlerin durumu yeterli olmayıp, ölçütlerin birbirine göre ağırlıkları da önemli bir etkiye sahiptir; sıralama bu iki olgunun birleşimi sonucu elde edilmektedir.

Tablo 7.4 Jenerik fırkateyn için seçeneklerin sıralaması

Seçenek	Sıra
CODAD	1
CODOG	7
CODOG-CC	5
CODAG-CC	6
CODLOG-CC	3
CODLAG-CC	4
IFEP	2

Tablo 7.5 Jenerik ADKG için seçeneklerin sıralaması

Seçenek	Sıra
TEKİL	1
CODAD	3
CODOD	4
CODELOD	2

Şekil 6.7’de yer alan her iki etkinlik fonksiyonu da iki geminin yapay sinir ağı mimarilerine ayrı ayrı uygulanarak elde edilen sıralamalar karşılaştırılmıştır. İki fonksiyon için de aynı sıralamalar elde edilmiştir. Bunun sebebinin girdi olarak kullanılan değerlerin pozitif olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir; fonksiyonların açılımları dikkate alındığında pozitif girdi değerleri için

fonksiyonlar da pozitif değerler üretmektedir. Bu nedenle, bu iki fonksiyonun bu tür uygulamalar için kullanımı uygun olmaktadır.



Harp gemileri, görevlerine yönelik olarak üzerinde bulunan sistem/cihazlar ile bunları kullanan ve aynı zamanda da geminin bekasını sağlayan insanı bütünleştirerek bünyelerinde barındıran karmaşık makinelerdir. Bu karmaşıklık, gemilerin tasarımlarının zorluğunu ve riskini arttırmaktadır. Tasarım sürecinin birinci aşaması kavramsal tasarım aşamasıdır. Bu sürecin erken aşamalarında mevcut bilgiler ve veriler oldukça sınırlı olmakla birlikte gemilerin bekasını ve ömür devrini etkileyecek en önemli kararlar da bu aşamalarda alınmaktadır. Sistemler sistemi olarak tanımlanan harp gemilerinde yer alacak tüm sistemlerin birbiriyle ve mürettebatla bütünleşik ve uyumlu çalışacak şekilde tasarlanması istenmektedir.

Sevk ve elektrik güç sistemi, gemideki diğer tüm donanım ve cihazlarla doğrudan bağlantısının olduğu da dikkate alındığında, gemilerin en hayati ve önemli sistemidir. Bu sistemlerin seçimi ile ilgili kararlar da kavramsal tasarım aşamasında verilmektedir.

Bu kararların verilebilmesi amacıyla geminin görevlerini yerine getirebilecek uygun sevk ve elektrik güç sistemi seçeneklerinin ve bu seçeneklere ilişkin seçim değerlendirmesinde kullanılacak uygun ölçütlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu tür sistemlerin seçim ölçütleri, iç içe geçmiş ve birbiriyle çatışan özellikler taşımaktadır. Bir ölçüt için yüksek değer alan bir seçenek veya seçeneğin bir bileşeni, başka bir ölçüt için daha düşük değer alabilmektedir. Bu durum bahse konu seçimlerin, insanın karar verme yetisi ile yapılamayacak kadar karmaşık ve zorlu hâle gelmesine sebep olmaktadır. Belirtilen bu hususlar ve ayrıca, sevk ve elektrik güç sisteminin seçiminin geminin tüm beka kabiliyetini ve ömür devrini doğrudan etkilemesi ve ilgilendirmesi nedeniyle, seçim için bir karar destek yönteminin belirlenmesi zorunluluğu ve ihtiyacı oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yukarıda belirtilen ihtiyaca istinaden, seçim sürecine destek olunması maksadıyla bir karar destek modeli önerilmiştir. Önerilen modelde, en yaygın olarak tercih edilen ve askerî uygulamalar için de geniş kullanımı bulunan AHP yöntemi, Buckley (1985) tarafından önerilen bulanık küme kuramını esas alan FAHP yaklaşımı ile birlikte kullanılmış ve yapay sinir ağları ile bütünleştirilmiştir.

Bu modelin uygulamasını gösterebilmek maksadıyla alanyazından firkateyn ve ADKG olmak üzere farklı iki tipte gemi, örnek olarak belirlenmiştir. Bu gemilerin özellikleri esas alınarak farklı çalışmalarda da kullanılmış olan Wageningen C4-40 serisi pervane, bu tez çalışmasında da sevk sisteminin en önemli belirleyici etkeni olan azami sevk gücünü hesaplamak amacıyla seçilmiştir. Bu hesaplama için Marin tarafından geliştirilmiş olan MC440 yazılımı kullanılmıştır.

Hesaplanan sevk gücü ihtiyacına istinaden firkateyn için yedi ve ADKG için dört farklı sevk sistemi seçeneği oluşturulmuştur. Bu seçenekler arasında konvansiyonel, melez ve tam elektrikli olmak üzere muhtelif tahrik yöntemlerine sahip sistem mimarileri yer almaktadır. Elektrikli tahrikli mimarilerde SEM'lerin elektrik güç sisteminden beslenmesi nedeniyle, bu sistem de tüm seçenekler için çözümlemelere dâhil edilmiştir.

Yukarıda belirtilen seçeneklerin değerlendirilmesi maksadıyla dokuz ölçüt belirlenmiştir. Önerilen model ile, karar vericilerin yargılarının doğrudan karar sürecine yansıtılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, karar vericilerin bu ölçütlerle ilgili karşılaştırma yapmaları istenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar, AHP'nin bulanık küme kuramının bir uygulaması olan Buckley'in (1985) geometrik ortalama yaklaşımı ile birleştirilerek insan düşünme sistematğinde doğal olarak bulunan belirsizliğin, öznelliğin ve muğlaklığın ele alınması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, elde edilen göreceli ağırlık değerleri yapay sinir ağında girdi değerleri olarak kullanılmıştır.

Girdi olarak kullanılan ağırlıkların, ağın içine nüfuz seviyesine sinaptik ağırlıklar etkili olmaktadır. Çıktıların alacağı değeri, yapay sinir ağının yapısının bir sonucu olarak girdi değerleri ile sinaptik ağırlıklarının birleşimi belirlemektedir. Bu nedenle değeri yüksek olan girdi, sinaptik ağırlıklarına bağlı olarak daha düşük oranda çıktıyı etkileyebilmektedir.

Önerilen model kullanılarak seçim sürecine yönelik yapılan işlemler neticesinde jenerik firkateyn için CODAD ve jenerik ADKG için tekil seçenek ilk sırayı almıştır.

Ölçütleri temsil edecek kavramlar ve bu kavramlara ilişkin ölçekler karar sürecinde büyük önem taşımakta ve çıktıları doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, sürece başlanılmadan önce ihtiyacı karşılayacak sistemin ölçütlerinin, seçimin

önceliklerini ve önemini ifade ve temsil edecek en uygun şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu hususla ilgili en dikkat çekici örnek, karmaşıklık ölçütünün jenerik fırkateyn seçenekleri için almış olduğu değerdir. Bu ölçüt için devir düşürücü düşürme oranı ve kademe sayısı, ölçek olarak belirlenmiş ve bunun sonucu düşürme oranı “1” olan ve kademesi olmayan IFEP seçeneği, çok büyük bir ağırlık değeri olan 0,8671’e sahip olmuştur. Bu ölçüt için farklı bir ölçek belirlenmesi durumunda bu ağırlık değişebilmektedir. Dolayısıyla, ölçütler için belirlenecek ölçek tüm süreci etkileyebildiğinden, bu hususta dikkatli ve hassas olunması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasının konusu ile ilgili ileriki dönemlerde yapılacak çalışmalarda, Beşinci Bölüm’de çözümlemesi yapılmış fakat çalışma kapsamına alınamayan ölçütlerin de kullanılması ve ilave ihtiyaç duyulan ölçütlerin çalışmalara eklenmesi ile daha geniş bir uygulama alanı bulunabilecektir. Kuramsal olarak sınırsız sayıda ölçüt belirlenebilmektedir; bununla birlikte, ölçüt sayısının çok fazla arttırılması karar vericilerinin, karşılaştırmalar esnasında dikkatlerinin dağılmasına ve odaklanmalarının bozulmasına ve ayrıca karşılaştırmaların sağlıklı yapılamamasına neden olabilecektir. Bu olumsuzlukların önüne geçebilmek amacıyla belirli ölçütleri, bir üst ölçüt altında (alt ölçüt olarak) kümelendirmek bir çözüm yaklaşımı olabilecektir.

Sevk sistemi için de çok sayıda seçenek oluşturmak mümkündür; bununla birlikte ölçütler için yukarıda belirtilen olumsuzlukların yaşanma olasılığının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, seçenekleri bir ön elemeye tabi tutmak bu olumsuzlukların etkilerini azaltabilecektir.

Bu tez çalışmasında, yapay sinir ağında sinaptik ağırlık olarak kullanılmış olan veriler, ölçütlerin seçeneklere istinaden hesaplanması/belirlenmesi ile elde edilmiştir. Müteakip çalışmalarda bu ağırlıklar, karar vericilere yaptırılacak karşılaştırmalar ile de belirlenebilecektir.

Gemilerin tasarımı, mühendislik faaliyetlerinin yanında, gemileri kullanacak kurumun kültür ve yapısına da bağlıdır. Kıyı destek imkânları, personel ve bakım politikaları, bütçe vb. birçok etken gemilerin tasarımlarını ve işletme ile destek faaliyetlerini etkileyebilmektedir. Bu etkenler de aslında yukarıda sistemler sistemi olarak tanımlanan bütünün birer parçalarıdır.

Geleneksel sistemlerin haricinde, elektrikli tahrik benzeri görece daha yeni teknolojilerin beraberinde getirdikleri ilave/farklı etkenlerin (artan soğutma yük ihtiyacı, büyüyen elektromanyetik iz, artan elektromanyetik etkileşim vb.) de tasarım ve karar sürecine dâhil edilmesi gerekecektir.

Menzili artırarak harekâta önemli fayda sağlamasının yanında, enerji verimliliğinin; boyutların/ağırlıkların azaltılmasına ve maliyetlerin düşürülmesine de önemli katkısı olmaktadır. Daha verimli makinelerin kullanılması ve/veya makinelerin verimli çalışacak şekilde uyumlandırılması, yakıt verimliliğinin yanı sıra daha küçük kızıl altı izin elde edilmesini sağlamaktadır; bu şekilde yapılan uyumlandırma ve kullanım sayesinde CO₂ ayak izi de daha küçük olmaktadır. Bu tez çalışmasında verimliliğin bir ölçüsü olarak geleneksel yaklaşımlar yerine, doğrudan gemiler ve makinelerin özelliklerini içeren ve görev profilini esas alan IWEEDI kullanılmıştır; bu kapsamda her bir seçenek için IWEEDI değerleri hesaplanarak seçeneklerin karşılaştırılması yapılmıştır. Geleneksel yaklaşımlarda yakıt tüketimi ve dolayısıyla CO₂ salım tahminleri için çoğunlukla genelleştirilmiş kabuller kullanılmaktadır; bu kabuller önemli tutarsızlıkları ve belirsizlikleri barındırmaktadır. Bu tez çalışmasında ise yakıt tüketimi için doğrudan gemi ve makine verileri ile gemilere özgü görev profillerine dayalı veriler kullanılmıştır; bu sayede, daha keskin yakıt ve salım hesaplamaları yapılmıştır.

Ticari gemilerin bir kısmına uygulanmakta olan ve özellikle yapılan tasarımın (veya kapsamlı değişikliğin) verimliliğini ölçen EEDI'da olduğu şekilde, IWEEDI'nın da harp gemilerinin tasarımının verimliliğini ve dolayısıyla CO₂ ayak izini gösterecek bir ölçek olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir (Cin ve Çelebi, 2024). Bu gösterge; uygulanabilmesi durumunda, harp gemilerinin tasarımlarının verimliliğini ve CO₂ ayak izini tek bir ölçekte bütünleştirerek tanımlayan bir ölçün olacaktır. Bu kapsamda, bir eşik değeri belirlenerek, yeni gemi tasarımlarının bu eşiğe istinaden karşılaştırmalı bir bütünleşik enerji (yakıt) verimi-CO₂ ayak izi çözümlemesini yapılması sağlanmış olunacaktır.

Harp gemileri için sevk ve elektrik güç sisteminin seçimi önemli, zor ve karmaşık bir karardır. Bu karar, tek seferde kolaylıkla verilememekte ve bir sürece yayılmaktadır.

Seçim sürecinde birbiri ile çatışan ölçütler de karmaşıklığı ve zorluğu arttırmaktadır. Sürdürülebilir, ll ve kullanılabılır bir karar destek modelinin oluşturulması eniyilenmiş bir kararın verilebilmesi ve risklerin azaltılması bakımından büyük önem teşkil etmektedir.

Harp gemilerinin çok sıkı kısıtlamalara sahip olduğu ve sevk ve elektrik güç sisteminin geminin tamamı ile bütünleşik olarak çalışması zorunluluğu da dikkate alındığında, istenilen tasarıma ulaşabilmek maksadıyla tasarımcıyla birlikte diğer paydaşların eřėdml bir iç birliği teşkil etmesi, bu durumu tüm tasarım süreci boyunca sürdürmesi ve gerekli kararların “ilk kaynak” yapılmadan önce birlikte alınmış olması gerekmektedir (Cin ve elebi, 2021b).

Bu tez çalışmasında; karar vericilerin yargılarını içeren, oluşturulması ve kullanılması görece kolay ve anlaşılabilir bir model oluşturulmuş ve bu modelin uygulaması iki farklı örnek üzerinden gösterilmiştir. Bahse konu modelin kullanımı sadece harp gemilerinin sevk ve elektrik güç sistemleri ile sınırlı olmayıp herhangi bir alanda karmaşık ve içi ie geçmiş ltleri içeren ve çoklu seçeneğin mevcut olduğu benzer seçim süreçleri için de modelin kolaylıkla uygulanabileceği değerlendirilmektedir.

- ABD Donanması. (t.y.). *Littoral Combat Ship Class-LCS*. 11 Aralık 2023'te <https://www.surfpac.navy.mil/Ships/By-Class/Littoral-Combat-Ship-Class-LCS/> adresinden edinilmiştir.
- ABS. (t.y.). *Ship Energy Efficiency Measures*. 29 Eylül 2018'de https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_Energy_Efficiency_Advisory.pdf adresinden edinilmiştir.
- Açık Deniz Karakol Gemisi (ADKG). (2023). *Aselsan Dergi*. 116. https://wwwcdn.aselsan.com/api/file/ASELSAN_Dergi_116.pdf
- Ådnanes, A. K. (2003). *Maritime electrical installations and diesel electric propulsion*. ABB AS Marine. 30 Eylül 2018'de https://www.trpa.gov/wp-content/uploads/documents/archive/ABB-AS_2003.pdf adresinden edinilmiştir.
- Alexander, D. (2015). Hybrid electric drive for naval combatants. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2267-2275. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2453395>
- Anderson, D. E., Malone, T. B. ve Baker, C. C. (1998). Recapitalizing the Navy through optimized manning and improved reliability. *Naval Engineers Journal*, 110(6), 61-72. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1998.tb02966.x>
- Anojkumar, L., Ilankumaran, M. ve Sasirekha, V. (2014). Comparative analysis of MCDM methods for pipe material selection in sugar industry. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2964-2980. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.028>
- Australian National Audit Office. (2023). *Department of Defence's Procurement of Hunter Class Frigates* (Auditor-General Report No.21 of 2022–23). <https://www.anao.gov.au/work/performance-audit/departments-defences-procurement-hunter-class-frigates#footnote-206>
- Backlund, P. B., Seepersad, C. C. ve M. Kiehne, T. M. (2012, 23-24 Mayıs). *A System-Level Design Framework for All-Electric Ship Thermal Systems*. ASNE Electric Machines Technology Symposium (EMTS 2012), Philadelphia, PA, ABD.
- BAE Systems. (t.y.). *Offshore patrol vessels*. 16 Ekim 2023'te <https://www.baesystems.com/en/product/offshore-patrol-vessels> adresinden edinilmiştir.
- Bai, Y. ve Wang, D. (2006). Fundamentals of Fuzzy Logic Control-Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. Y. Bai, H. Zhuang ve D. Wang (Ed.), *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications. Advances in Industrial Control* içinde (17-36). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-469-4_2
- Baker, C., Krull, R., Snyder, G. Lincoln, W. ve Malone, T. B. (2001). Survey of reduced workload and crewing strategies for ocean patrol vessels. *Naval Engineers Journal*, 113(2), 29-44. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2001.tb00032.x>

- Barbato, A. ve Bonvicini, A. (2015, 24-26 Haziran). *Predicting Life Cycle Cost of a Modular Frigates Fleet*. 18th International Conference on Ships and Shipping Research (Nav 2015), Lecco, İtalya.
- Beale, M. H., Hagan, M. T. ve Demuth, H. B. (2024). *Deep Learning Toolbox™ User's Guide- R2024a*. The MathWorks. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/deeplearning/nnet Ug.pdf
- Bekers, D. ve Lepelaars, E. (2013, 16-19 Temmuz). *Degaussing System Design Optimization*. 8th International Marine Electromagnetics Conference - MARELEC 2013, Hamburg, Almanya. 14 Haziran 2022'de <https://publications.tno.nl/publication/101330/HrS7QP/bekers-2013-degaussing.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Bellman, R. E. ve Zade, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment management. *Science*, 17(4), 141–164. <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.B141>
- Birleşik Krallık Kraliyet Donanması. (t.y.). *Equipment/ships river class*. 16 Ekim 2023'te <https://www.royalnavy.mod.uk/the-equipment/ships/patrol-and-minehunters/river-class> adresinden edinilmiştir.
- Black, M. (1937). Vagueness. An exercise in logical analysis. *Philosophy of Science*, 4(4), 427-455. <http://www.jstor.org/stable/184414>
- BMT Defence Services. (t.y.) *The procurement of naval and government ships*. 15 Haziran 2017'de <https://www.bmtdsl.co.uk/media/1058725/BMTDSL-Naval-Ship-Procurement-Whitepaper.pdf> adresinden edinilmiştir.
- BMT Defence Services. (2016) *VENATOR®-110*. 7 Ekim 2017'de <http://www.bmtdsl.co.uk/media/6098065/VENATOR-110%20Technical%20Brief.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Blokland, A. J., Barendregt, I. P. ve Posthumus, C. J. C. M. (2019, 2-3 Temmuz). *The Adaptable Energy Platform*. Marine Electrical and Control Systems Safety Conference (MECSS) 2019, Londra, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.24868/issn.2515-8198.2019.009>
- Bogetoft, P. ve Pruzan, P. (1997). *Planning with Multiple Criteria: Investigation, Communication and Choice* (2. bs.). Copenhagen Business School Press.
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I. ve Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping-A review. *Transportation Research Part D*, 52(A), 408-421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>
- Bowditch, N. (1995). *American Practical Navigator* (9. bs.). National Imagery and Mapping Agency. (ilk baskısı 1802'de yapılmıştır)
- Boze, W. (2003). Mass Properties. T. Lamb (Ed.), *Ship Design and Construction* içinde (12-1-12-20). Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).
- Bricknell, D. J. ve Partridge, P. (2007). Power and propulsion systems for the modern global combatant, *Ingenieria Naval*, 844, 73-79. <https://sectormarítimo.es/wp-content/uploads/2016/02/200701.pdf>

- Buckingham, J. (2011, 7-8 Haziran). *Multi-Engine Concepts for Diesel Propulsion*. RENK Symposium, Augsburg, Almanya. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1157.9761>
- Buckingham, J. (2017, 17-18 Mayıs). *Deconstructing the Propulsion Conundrum*. International Maritime Defence Exhibition and Conference (IMDEX) Asia 2017, Singapur.
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233-247. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)
- Calabrese, G. (2000, 22-26 Mayıs). *Use of Gas Turbines for Marine Applications*. 33rd WEGEMT Graduate School Fast Ship Propulsion Plants, Genova, İtalya. https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/33rd_WEGEMT_School_for_Fast_Ship_Propulsion_Plants.pdf
- Caprace, J. ve Rigo, P. (2011). Ship complexity assessment at the concept design stage. *Journal of Marine Science and Technology*, 16, 68–75 <https://doi.org/10.1007/s00773-010-0107-9>
- Carazas, F. J. G. ve de Souza, G. F. M. (2012). Reliability Analysis of Gas Turbine. G. F. M. de Souza (Ed.), *Thermal Power Plant Performance Analysis* içinde (189-220). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2309-5_8
- Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3. bs.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68327-1>
- Carlton, T. (2003). The Marine Industry. T. Lamb (Ed.), *Ship design and construction* içinde (3-1-3-30). Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).
- Castelló-Sirvent, F., Meneses-Eraso, C., Alonso-Gómez, J. ve Peris-Ortiz, M. (2022). Three decades of fuzzy AHP: A bibliometric analysis. *Axioms*. 11(10), 525. <https://doi.org/10.3390/axioms11100525>
- Castles, G. Reed, G., Bendre, A. ve Pitsch, R. (2009, 20-22 Nisan). *Economic Benefits of Hybrid Drive Propulsion for Naval Ships*. 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, MD, ABD. <https://doi.org/10.1109/ESTS.2009.4906560>
- Chalfant, J. (2015). Early-stage design for electric ship. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2252-2266. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2459672>
- Chan, F. T. S., Kumar, N., Tiwari, M. K., Lau, H. C. W. ve Choy, K. L. (2008) Global supplier selection: a fuzzy-AHP approach. *International Journal of Production Research*, 46(14), 3825-3857. <https://doi.org/10.1080/00207540600787200>
- Chang, C. -W., Wu, C. -R., Lin, C. -T. ve Chen, H, -C. (2007) An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine. *Computers & Industrial Engineering*, 52(2), 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.11.006>
- Chang, D. -Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)

- Charette, R. N. (2018, 7 Ocak). New German warship fails sea trials due to tech woes. *IEEE Spectrum*. <https://spectrum.ieee.org/riskfactor/computing/it/new-german-frigate-fails-tests>
- Chen, C. -T., Lin, C. -T. ve Huang, S. -F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 102(2), 289-301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.03.009>
- Chen, M. -F. ve Tzeng, G. -H. (2004). Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(13), 1473-1490. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2005.01.006>
- Chen, S. -J. ve Hwang, C. -L. (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4>
- Cheng, C. -H. (1999). Evaluating weapon systems using ranking fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, 107(1), 25-35. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00348-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00348-5)
- Cheng, C. -H. ve Mon, D. -L. (1994). Evaluating weapon system using fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Defence Science Journal*, 44(2), 165-172. <https://doi.org/10.14429/dsj.44.4165>
- Cheng, C. -H., Yang, K. -L, Hwang, C. -L. (1999). Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight. *European Journal of Operational Research*, 116(2), 423-435. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00156-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00156-8)
- Cheng, C. -H. ve Lin, Y. (2002). Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation. *European Journal of Operational Research*, 142(1), 174-186. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00280-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00280-6)
- Chilcott, J. ve Kennedy, N. (2018, 2-4 Ekim). *Enabling Lean Manning through Automation*. International Ship Control Systems Symposium (iSCSS), Glasgow, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.24868/issn.2631-8741.2018.021>
- Chin, C. S., Tan, Y. -J. ve Kumar, M. V. (2022). Study of hybrid propulsion systems for lower emissions and fuel saving on merchant ship during voyage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 393. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse10030393>
- Choudhary, K. K., Kumar, P. V. S. G. ve Murty, A. V. S. N. (2022). Infrared suppression technologies for marine platforms. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 103, 413-419. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00788-3>
- Cin, S. ve Çelebi, U. B. (2021a). An approach for selecting green energy systems for new generation naval vessels. *FEB*, 30(02/A), 1801-1809.
- Cin, S. ve Çelebi, U. B. (2021b, 16-18 Eylül). *Evaluating the Challenge of Selecting a Propulsion Plant for Surface Vessels at the Conceptual Design Phase*. 2nd International Congress on Ship and Marine Technology (GMO-SHIPMAR), İstanbul, Türkiye. <https://www.gmoshipmar.org/GMOSHIPMAR2021/>
- Cin, S. ve Çelebi, U. B. (2024). *Mission profile oriented energy efficiency and CO₂ footprint assessment of naval vessels at conceptual design phase: a*

- comparative case study of conventional and hybrid energy systems*. [Yayınlanmak üzere teslim edilen makale metni]. Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Doktora Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Congressional Research Service. (2020). *Navy Frigate (FFG[X]) Program: Background and Issues for Congress*, R44972. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R44972/57>
- Couch, T. ve Fisher, J. (2016, 26-28 Nisan). *Power & Propulsion: Meeting the Concept*. 13th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC 2016), Bristol, Birleşik Krallık.
- Curley, R. (Ed.) (2012). *The Complete History of Ships and Boats: From Sails and Oars to Nuclear-Powered Vessels* (1. bs.). Britannica Educational Publishing.
- da Silva, I. N., Hernane Spatti, D., Andrade Flauzino, R., Liboni, L. H. B. ve dos Reis Alves, S. F. (2017). *Artificial Neural Networks*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43162-8>
- Damen. (t.y.). *Offshore patrol vessels*. 18 Kasım 2017'de http://products.damen.com/-/media/Products/Images/Clusters-groups/Naval/Offshore-Patrol-Vessel/DAMEN_Offshore_Patrol_Vessel_Leaflet.pdf adresinden edinilmiştir.
- Dang, J., van den Boom, H. ve Ligtelijn, J. T. (2013, 2-5 Aralık). *The Wageningen C and D Series Propellers*. 12th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST) 2013, Amsterdam, Hollanda.
- Danimarka Parlamentosu. (t.y.). *Danish Frigate Program*. 17 Ocak 2024'te <https://www.ft.dk/samling/20141/almde/fou/bilag/20/1417702.pdf> adresinden edinilmiştir.
- David, J. ve Partridge, B. R. (2007). Power and propulsion systems for the modern global combatant. *Ingenieria Naval*, Ocak 2007, 73-79.
- de Araújo Costa, I. P., de Araújo Costa, A. P., Sanseverino, A. M., Simões Gomes, C. F. ve dos Santos, M. (2022). Bibliometric studies on multi-criteria decision analysis (MCDA) methods applied in military problems. *Pesquisa Operacional*, 42, 1-26. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2022.042.00249414>
- de Jong, C. A. F. (2009, 23-26 Mart). *Characterization of Ships as Sources of Underwater Noise*. NAG/DAGA International Conference on Acoustics, Rotterdam, Hollanda. https://pub.dega-akustik.de/NAG_DAGA_2009/data/articles/000097.pdf
- de Winter, J. C. F. ve Dodou, D. (2014). Why the Fitts list has persisted throughout the history of function allocation. *Cognition, Technology & Work*, 16, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10111-011-0188-1>
- Defense Acquisition University. (2013). *Defense Acquisition Guidebook*, 16-September-2013. 31 Temmuz 2023'te <https://www.dote.osd.mil/Portals/97/docs/TEMPGuide/DefenseAcquisitionGuidebook.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Defence IQ. (t.y.-a). *Global surface warships market report 2020*. 12 Temmuz 2023'te <https://www.defenceiq.com/events-surfacewarships/blog/global-surface-warships-market-report-2020> adresinden edinilmiştir.

- Defence iQ. (t.y.-b). *Offshore patrol vessels: key programmes and requirements map*. 23 Temmuz 2019'da <https://www.defenceiq.com/events-offshorepatrolvessels/downloads/2019-global-offshore-patrol-vessels-key-programmes-and-requirements-map?-ty-m> adresinden edinilmiştir.
- Defence iQ. (t.y.-c). *Offshore patrol vessels, trends and analysis report, 2016*. 12 Ağustos 2023'te <https://www.defenceiq.com/content-auto-download/5b04bb2d97533d72c150287e> adresinden edinilmiştir.
- Dell'Isola, A. ve Vendittelli, A. (2015, 4-5 Haziran). *Operational Availability (Ao) of Warships: A Complex Problem from Concept to in Service Phase*. 2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), Benevento, Italya, <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2015.7180621>
- Deng, H. (1999). Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*, 21(3), 215-231. [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(99\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(99)00025-0)
- Department of the Navy. (2017). *OPNAV Instruction 9070.1B. Survivability Policy and Standards for Surface Ships and Craft of the U.S. Navy*. 26 Nisan 2024'te <https://www.secnave.navy.mil/doni/Directives/09000%20General%20Ship%20Design%20and%20Support/09-00%20General%20Ship%20Design%20Support/9070.1B.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach* (1. bs.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420031843>
- Doerry, N. H. ve Fireman, H. (2006, 16-19 Mayıs). *Designing All Electric Ships*. 9th International Marine Design Conference (IMDC). Ann Arbor, MI, ABD.
- Doerry, N. H. (2007, 21-23 Mayıs). *Sizing Power Generation and Fuel Capacity of the All-Electric Warship*. IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS) 2007, Arlington, VA, ABD. <https://doi.org/10.1109/ESTS.2007.372056>
- Doerry, N. (2015). Naval Power Systems: Integrated power systems for the continuity of the electrical power supply. *IEEE Electrification Magazine*, 3(2), 12-21. <https://doi.org/10.1109/MELE.2015.2413434>
- Doerry, N. H., McCoy, T. J. ve Martin, T. W. (2010, 11-13 Mayıs). *Energy and the Affordable Future Fleet*. 10th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC 2010), Portsmouth, Birleşik Krallık.
- Dong, M., Shouyi, L. ve Zhang, H. (2015). Approaches to group decision making with incomplete information based on power geometric operators and triangular fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, 42(21), 7846-7857. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.06.007>
- dos Santos, M., de Araujo Costa, I. P. ve Gomes, C. F. S. (2021). Multicriteria decision-making in the selection of warships: a new approach to the ahp method. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 13(1), 147-169. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v13i1.833>
- Driggers, R. G., Friedman, M. H. ve Nichols, J. (2012). *Introduction to Infrared and Electro-optical Systems* (2. bs.), Artech House.
- Dubois, D. ve Prade, H. (1986). Recent Models of Uncertainty and Imprecision As a Basis for Decision Theory: Towards Less Normative Frameworks. E.

- Hollnagel, G. Mancini, ve D. D. Woods (Ed.), *Intelligent Decision Support in Process Environments*. NATO ASI Series, vol 21 içinde (3-24). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-50329-0_1
- Durán, O. ve Aguilo, J. (2008). Computer-aided machine-tool selection based on a fuzzy-AHP approach. *Expert Systems with Applications*, 34(39), 1787-1794. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.01.046>
- Eberhardt, D. (2017, 15-17 Mart). MAN V28/33D STC and MAN 175D High Speed Engines for Naval Applications. 5to. Congreso Internacional de Diseño e Ingeniería Naval. <https://cidin.co/index.php/cidin/issue/view/5>
- Endsley, M. R., ve Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462- 492. <https://doi.org/10.1080/001401399185595>
- Engja, H. (2000, 22-26 Mayıs). *Mathematical modelling and simulation of propulsion system*. 33rd WEGEMT Graduate School Fast Ship Propulsion Plants, Genova, İtalya. [https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/33rd WEGEMT School for Fast Ship Propulsion Plants.pdf](https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/33rd_WEGEMT_School_for_Fast_Ship_Propulsion_Plants.pdf)
- Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *Methodologies for estimating port-related and goods movement mobile source emission inventories*, EPA-420-D-20-001. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P100YFY8.TXT>
- Eyring, V., Kohler, H. W., Lauer, A. ve Lemper, B. (2005). Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050. *Journal of Geophysical Research*, 110(17), 1-18. <https://doi.org/10.1029/2004JD005620>
- Fels E., Kremer J. F. ve Kronenberg K. (Ed.). (2012). *Evaluating Maritime Power: The Example of China*. In: *Power in the 21st Century. Global Power Shift (Comparative Analysis and Perspectives)*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25082-8>
- Fitts, P. M. (Ed). (1951). *Human Engineering for an Effective Air Navigation and Traffic Control System*. National Research Council.
- Fitzsimonds, J. R. (1980). *Performance optimization in surface warship design*. [Yüksek lisans tezi, Massachusetts Institute of Technology]. MIT Libraries. 13 Haziran 2018'de <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/42089/07044533-MIT.pdf?sequence=2> adresinden edinilmiştir.
- Forman, E. ve Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 108(1), 165-169. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00244-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0).
- Franks, C. B., White, J. R., ve Ness, J. C. (1990, 11-14 Haziran) Evaluation of a 50,000 HP Marine Gas Turbine for Use in Future U.S. Navy Surface Ships. *ASME 1990 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Volume 2: Aircraft Engine; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery*. Brüksel, Belçika. <https://doi.org/10.1115/90-GT-320>

- Gale, P. (2003). The Ship Design Process. T. Lamb (Ed.), *Ship Design and Construction* içinde (5-1-5-40). Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).
- Gamble, G., Suendermann, B., Mathys, Z. ve Woolley, A. (2014, 26-27 Mart). *Fire Modelling And Event Tree Analysis For Naval Platform Fire Incidents*. Fire at Sea, Londra, Birleşik Krallık.
- GE. (2017). LM2500+ Marine Gas Turbine. 28 Nisan 2022'te <https://www.geaviation.com/propulsion/marine/lm2500-plus> adresinden edinilmiştir.
- GE, (2018). 25.1 MW Marine Gas Turbine. 8 Şubat 2023'te <https://www.geaerospace.com/press-release/other-news-information/ge-engines-power-uss-cincinnati-united-states-navy> adresinden edinilmiştir.
- GE. (2019). Building on a Marine Power Legacy. 26 Mayıs 2019'da <https://www.geaviation.com/sites/default/files/ge-experience.pdf> adresinden edinilmiştir.
- GE. (2021). LM2500 Marine Gas Turbine. 28 Nisan 2022'de <https://www.geaviation.com/propulsion/marine/lm2500> adresinden edinilmiştir.
- Galle, L. F. (2002, 26-28 Şubat). *Royal Netherlands Navy The Survivable Frigate*. 1st European Survivability Workshop 2002. 28 Haziran 2022'de [http://leongalle.com/Documents/Galle,%20L.%20F.%20-%20Ship%20Survivability,%20Part%20I%20\(Platform%20Features%20of%20the%20new%20RNLN%20Air%20Defence%20Command%20Frigate\).pdf](http://leongalle.com/Documents/Galle,%20L.%20F.%20-%20Ship%20Survivability,%20Part%20I%20(Platform%20Features%20of%20the%20new%20RNLN%20Air%20Defence%20Command%20Frigate).pdf) adresinden edinilmiştir.
- Galle, L. F. ve Schleijpen, H. M. A. (1998). Ship survivability (part II) ship infrared (IR) signatures, *Marinblad*, September 1998, 246-253. 28 Haziran 2022'de [www.leongalle.com/Documents/Galle, L.F. & Schleijpen, R.M.A. Dr - Ship Infra Red \(IR\) Signatures.pdf](http://www.leongalle.com/Documents/Galle,%20L.F.%20&%20Schleijpen,%20H.M.A.%20-%20Ship%20Infrared%20Signatures.pdf) adresinden edinilmiştir.
- GE Power Conversion (2022, 18 Ocak). *Type 45 Destroyer - Daring Class World's First Full Electric Propulsion Combatant Ship*. 10 Ağustos 2023'te <https://www.gepowerconversion.com/case-study/type-45-destroyer-daring-class-worlds-first-full-electric-propulsion-combatant-ship> adresinden edinilmiştir.
- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser K. ve Hopman, J. J. (2016, 26-28 Nisan). *Torque Control for Diesel Mechanical and Hybrid Propulsion for Naval Vessels*. 13th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC 2016). Bristol, Birleşik Krallık.
- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K. ve Hopman, J. J. (2017a). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 194, 30-54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>
- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K. ve Hopman, J. J. (2017b). Parallel Control for Hybrid Propulsion of Multifunction Ships. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 2296-2303. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.229>

- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., Loonstijn, M. A. ve Hopman, J. J. (2017). Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: modelling, validation and performance quantification. *Applied Energy*, 206, 1609-1631. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.103>
- Geertsma, R., Vollbrandt, J. Negenborn, R. Visser, K. ve Hopman, H. (2017, 14-17 Ağustos). *A Quantitative Comparison of Hybrid Diesel-Electric and Gas-Turbine-Electric Propulsion for Future Frigates*. 2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Arlington, VA, ABD. <https://doi.org/10.1109/ESTS.2017.8069321>
- Goossens, A. J. M. ve Basten, R. J. I. (2015). Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; An application for naval ships. *Reliability Engineering and System Safety*, 142, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.014>
- Götz, G., Panke, C. ve Steinbeck, K. (2004). *MTU Technical Project Guide, Marine Application* (revision 2.0). MTU.
- Gray, G. J., Aouf, N., Richardson, M. A., Butters, B., Walmsley, R. ve Nicholls, E. (2012). Feature-based recognition approaches for infrared anti-ship missile seekers. *The Imaging Science Journal*, 60(6), 305-320. <https://doi.org/10.1179/1743131X12Y.0000000012>
- Guenther, C. (1989, 23 Ekim-1 Kasım). *Application and Characteristics of Diesel Engines for High Speed Vehicles*. 13th WEGEMT Graduate School Design Techniques for Advanced Marine Vehicles and High Speed Displacement Ships, Delft, Hollanda. https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/13th_WEGEMT_School_Design_Techniques_for_Advanced_Marine_Vehicles_and_High_Speed_Display.pdf
- Gypa, I., Jansson, M., Gustafsson, R., Werner, S. ve Bensow, R. (2023). Controllable-pitch propeller design process for a wind-powered car-carrier optimising for total energy consumption. *Ocean Engineering*, 269, 113426. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113426>
- Haglund, F. (2008). A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part III: Fuels and emissions. *Energy Conversion and Management*, 49(12), 3476-3482. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.003>
- Harris, D. C. (1999). *Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance*. SPIE Optical Engineering Press. <https://doi.org/10.1117/3.349896>
- Hawke, M. B., Mills-Hicks, N. J., Harris, W. B., Scott, J. R., Shepherd, L. ve Bullard, J. P. (1985). Type 23 frigate. *Journal of Naval Engineering*, 29(1).
- Hendry, M. ve Zekas, B. M. (2010). U.S. Navy experience with SSS (Synchro-Self-Shifting) clutches. *ASME Mechanical Engineering*, 132(08), 54-55. <https://doi.org/10.1115/1.2010-Aug-9>
- Hegner, H. ve Desai, B. (2002, 21-25 Temmuz). *Integrated Fight Through Power*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, ABD. <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043245>

- Herdzik, K. ve Cwilewicz, R. (2017). Remarks on utilization of Marine Trent 30 gas turbine as prime mover on vessels. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 24(2), 91-97. [doi:10.5604/01.3001.0010.2904](https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.2904)
- Heywood, H. ve Lear, T. (2006, 20-21 Haziran). *PREVENT-A Tool to Reduce Vulnerability Early in the Design*. RINA WARSHIP 2006: Future Surface Ships, Londra, Birleşik Krallık.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Hiscoke, B. (t.y.). *IR Suppression-Exhaust Gas Cooling by Water Injection*. 3 Ağustos 2022'te <https://www.davis-eng.com/docs/papers/Exhaust%20Gas%20Cooling.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Hodge C. G. ve Mattick, D. J. (1996). The electric warship. *Transactions IMarE*, 108(2), 109-125.
- Hodge, C. G., Williamson, S. ve Smith, A. C. (2002, 26-28 Ağustos). *Direct Drive Marine Propulsion Motors*. International Conference on Electrical Machines (ICEM), Brugge, Belçika.
- Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications-A literature review. *European Journal of Operational Research*, 186(1), 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.004>
- Ho, W., Dey, P. K. ve Higson, H. E. (2006), Multiple criteria decision-making techniques in higher education. *International Journal of Educational Management*, 20(5), 319-337. <https://doi.org/10.1108/09513540610676403>
- Holmes, J. J. (2022/2006). *Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-01693-6>
- Hollanda Savunma Bakanlığı. (t.y.). *Ocean-going patrol vessel (OPV)*. 16 Ekim 2023'te <https://english.defensie.nl/downloads/publications/2022/04/01/ocean-going-patrol-vessel> adresinden edinilmiştir.
- IEEE. (2017). *Recommended Practice for the Design and Application of Power Electronics in Electrical Power Systems, IEEE Std 1662-2016 (Revision of IEEE Std 1662-2008)*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7874058>
- Im, S. -H., Lee, H. -Y., Park, G. -S. (2021). Novel deperming protocols to reduce demagnetizing time and improve the performance for the magnetic silence of warships. *Energies*, 14, 6295. <https://doi.org/10.3390/en14196295>
- Incropera, F. P. ve Dewitt, D. P. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (4. bs.). John Wiley & Sons.
- International Maritime Organization. (2002). *Standards for Ship Manoeuvrability-Resolution MSC.137(76)*. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.137%2876%29.pdf>
- International Maritime Organization. (2019). Ship underwater radiated noise technical report and matrix MEPC 74/INF.28. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/NOISE/MEPC%2074-INF.28%20->

[%20Ship%20underwater%20radiated%20noise%20technical%20report%20a
nd%20matrix%20\(Canada\).pdf](#)

- International Maritime Organization. (2022). Resolution MEPC.364(79), 2022 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (eedi) for new ships. 7 Mayıs 2023 tarihinde [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) adresinden edinilmiştir.
- Ishii, Y., Miyawaki, K., Sato, K., Tasaki, S., Morimoto, H. ve Ikeda, K. (2020). Underwater Noise Prediction and Development of Special Purpose Ships. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 57(1). <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e571/e571140.pdf>
- Jacobs, F., Visser, K. ve Stapersma, D. (2018). Maritime environmental performance indicators for urban waterways in Amsterdam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 232(3), 263-275. <https://doi.org/10.1177/1475090216676433>
- Jain, A. K., Mao, J. ve Mohiuddin, K. M. (1996). Artificial neural networks: a tutorial. *Computer*, 29(3), 31-44. <https://doi.org/10.1109/2.485891>
- Jeong, B., Jang, H., Lee, W., Park, C., Ha, S., Kim, D. K. ve Cho, N. K. (2022). Is electric battery propulsion for ships truly the lifecycle energy solution for marine environmental protection as a whole? *Journal of Cleaner Production*, 355, 131756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131756>
- Kalbande, D. R., Khan, S. ve Thampi, G. T. (2012, 19-20 Ekim). *Neuro Analytical Hierarchy Process (NAHP) Approach for CAD/CAM/CIM Tool Selection in the Context of Small Manufacturing Industries*. 2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT), Bombay, Hindistan. <https://doi.org/10.1109/ICCICT.2012.6398139>
- Kastner, G. A., Davidson, A. ve Hills, W. A. B. (1982). Frigate electric cruise propulsion and ship's service power from a common distribution network. *SNAME Transactions*, 90, 391-414.
- Kaufmann, A. ve Gupta, M. M. (1991). *Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Kim, S. -Y., Choe, S., Ko, S. ve Sul, S. -K. (2015). A Naval Integrated Power System with a Battery Energy Storage System: Fuel efficiency, reliability, and quality of power. *IEEE Electrification Magazine*, 3(2), 22-33. <https://doi.org/10.1109/MELE.2015.2413435>
- Kimber, A. (2015). Designing for the Gap: The space between the OPV and the frigate. *Ciencia Y tecnología De Buques*, 8(17), 19-29. <https://doi.org/10.25043/19098642.118>
- Kimber, A. ve Thorne, B. (2013, 12-13 Haziran). *How to square the circle for the next generation of patrol ship designs*. Royal Institution of Naval Architects, Warship Conference 2013, Bath, Birleşik Krallık.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P. ve Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards

- sustainable renewable energy development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- Kumar, D. ve Zare, F. (2019). A Comprehensive review of maritime microgrids: System architectures, energy efficiency, power quality, and regulations. *IEEE Access*, 7, 67249-67277. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917082>
- Kuo-Ping Lin, K. -P. ve Hung, K. -C. (2011). An efficient fuzzy weighted average algorithm for the military UAV selecting under group decision-making. *Knowledge-Based Systems*, 24(6), 877-889. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.04.002>
- la Monaca, U., Bertagna, S., Marino, A. ve Bucci, V. (2020). Integrated ship design: an innovative methodological approach enabled by new generation computer tools. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14, 59-76. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00612-4>
- Lan, H., Wen, S., Hong, Y. Y., Yu, D. C. ve Zhang, L. (2015). Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system. *Applied Energy*, 158, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.031>
- Lawrance, L. C. (2003). Handling Powered Vessels (2. bs.). WestOne Services. 19 Ağustos 2023'te https://www.dtwd.wa.gov.au/sites/default/files/teachingproducts/MAR047_CCBY.PDF adresinden edinilmiştir.
- Lee, A. H. I., Chen, W. -C. ve Chang, C. -J. (2008). A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing industry in Taiwan. *Expert Systems with Applications*, 34(1), 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.08.022>
- Lee, S. K., Mogi, G. ve Kim, J. W. (2009). Decision support for prioritizing energy technologies against high oil prices: A fuzzy analytic hierarchy process approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(6), 915-920. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.07.001>
- Leonardo DRS. (2023). *PA44-625 AC Permanent Magnet Motor*. 18 Aralık 2023'te <https://www.leonardodrs.com/wp-content/uploads/2023/09/pa44-625-marine-datasheet.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Lim, S. ve Harvey, A. (2016, 13-17 Haziran). *Selection and Development of the World's Most Power-Dense Gas Turbine Module for the New Korean Frigate*. ASME Turbomachinery Technical Conference and Exposition (ASME Turbo Expo) 2016, Seul, Güney Kore. <https://doi.org/10.1115/GT2016-56446>
- Lima Junior, F. R., Osiro, L., ve Carpinetti, L. C. R. (2014). A comparison between fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 21, 194-209. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.03.014>
- Liou, J. J. H., ve Tzeng, G. -H. (2012). Comments on "Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview". *Technological and Economic Development of Economy*, 18(4), 672-695. <https://doi.org/10.3846/20294913.2012.753489>
- Little, G.T., Young, S.S. ve Newell, J.M. (2003). The electric warship VII - the reality. *Journal of Marine Design and Operations*, B2.

- Liwång, H., Pejler, L., Miller, S. ve Gustavsson, J. (2001, 4-7 Haziran). *Management of High Speed Machinery Signatures to Meet Stealth Requirement in the Royal Swedish Navy Visby Class Corvette (YS 2000)*. ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air. Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery. New Orleans, LA, ABD. <https://doi.org/10.1115/2001-GT-0214>
- Lu, W., -M. ve Wang, T., -C. (2011). A fuzzy multi-criteria model for the industrial cooperation program transaction strategies: A case in Taiwan. *Expert Systems with Applications*, 38, 1490-1500.
- Mann, A. (2009). *Infrared Optics and Zoom Lenses* (2. bs.). SPIE Press. <https://doi.org/10.1117/3.829008>
- Martelli, M. ve Figari, M. (2017). Real-Time model-based design for CODLAG propulsion control strategies. *Ocean Engineering*, 141, 265-276. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801817303244>
- Mer, L., Esparcieux, P ve Fournier, P. (2006, 20-21 Haziran). *Acoustic Signature of Surface Vessels: Study of Interactions Between Propeller-Hull-Shaft Lines*. RINA WARSHIP 2006: Future Surface Ships. Londra, Birleşik Krallık.
- Łukasiewicz, J. (1930). Philosophische Bemerkungen zu mehrwertigen Systemen des Aussagenkalküls. *Comptes rendus des séances de la Société des Sciences et des Lettres de Varsovie*, III(3), 51-77.
- MAN Diesel & Turbo. (t.y.). Diesel electric propulsion plants: a brief guideline how to design a diesel-electric propulsion plant. 01 Aralık 2017'de <https://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marine-broschures/diesel-electric-drives-guideline.pdf> adresinden edinilmiştir.
- MAN ES. (2018). *Basic principles of ship propulsion* (5510-0004-04). 11 Ekim 2023'te https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/basic-principles-of-ship-propulsion-eng.pdf?sfvrsn=48fc05b5_7 adresinden edinilmiştir.
- MAN ES. (2021). MAN V28/33D STC Project Guide-Marine Four-stroke diesel engine compliant with IMO Tier II (Revision 11.2020/7.1). 31 Mart 2022'te <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/project-guides/four-stroke> adresinden edinilmiştir.
- MAN ES. (2022). MAN 175D Project Guide -Marine Four-stroke high-speed diesel engine compliant with IMO Tier II / IMO Tier III (Revision 12.2021/7.1). 31 Mart 2022'te <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/project-guides/four-stroke#fourstroke> adresinden edinilmiştir.
- MAN ES. (2023). Marine engine programme. (2.bs.). 6 Ocak 2024'te https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/marine-engine-programme-20205656db69fafa42b991f030191bb3bbb4.pdf?sfvrsn=9cac9964_110 adresinden edinilmiştir.
- MAN ES. (t.y.-a). MAN 175D GenSet. 17 Nisan 2022'de <https://man-es.com/marine/products/man-175d?faa6f225-79ad-4030-818b-076b65443fdc%5B%5D=1> adresinden edinilmiştir.

- MAN ES. (t.y.-b). MAN 175D Propulsion. 2 Nisan 2022'de <https://man-es.com/marine/products/man-175d?faa6f225-79ad-4030-818b-076b65443fdc%5B%5D=0> adresinden edinilmiştir.
- Marin. (t.y.). *MCD serie MC440* (v1.2.0 4.1.2.17095) [Bilgisayar yazılımı]. 19 Mayıs 2021'de <https://www.marin.nl/en/jips/cd-propeller-original> adresinden edinilmiştir.
- Matika, D. ve Mihanović, L. (2011). Reliability of a light high speed marine diesel engine. *BRODOGRADNJA*, 62(1), 28-36. https://brodogradnja.fsb.hr/wp-content/uploads/sites/25/2023/01/No1_2-5.pdf
- Mauro, S. (2013). Influence of propulsion system configuration on the manoeuvring performances of a surface twin-screw ship. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 173-178. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00003>
- Mazzuca, T. ve Torre, M. (2008, 11-13 Haziran). *The FREMM Architecture: A First Step Towards Innovation*. 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, İtalya. <https://doi.org/10.1109/SPEEDHAM.2008.4581217>
- McCallum, N., Vine, G. ve Wyand, T. (2020, 5-9 Ekim). *The Global Combat Ship Programmes (Type 26 Frigate, Hunter Class Frigate, Canadian Surface Combatant)*. International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC 2020). Sanal.
- McCoy, T. J. (2002, 21-25 Temmuz). *Trends in Ship Electric Propulsion*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, ABD. <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043247>
- McCoy, T. J. (2015). Integrated power systems-an outline of requirements and functionalities for ships. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2276-2284. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2480597>
- McCulloch, W. S. ve Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
- McKenzie, K. J. ve Moores, N. (1992). The Type 23 frigate-Britain's ASW frigate for the nineties. *Naval Engineers Journal*, 104(3), 228-235. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1992.tb02242.x>
- Menaka, J. N., Sankar, R. V., Mondal, P. ve Kumar, R. (2020). Development & validation of mathematical model for aircraft susceptibility analysis for infrared signature studies. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2(7), 32-40. <https://doi.org/10.47392/irjash.2020.61>
- Merigó, J. M., Gil-Lafuente, A. M. ve Yager, R. R. (2015). An overview of fuzzy research with bibliometric indicators. *Applied Soft Computing*, 27, 420-433. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.10.035>
- Michalchuk, B. W. (2017). *Shifting from a shipbuilding strategy to a ship sustainment strategy: Balancing economic, prosperity and technical risk*. Canadian Forces College. 28 Ağustos 2023'te <https://www.cfc.forces.gc.ca/papers/csc/csc43/mds/michalchukb.pdf> adresinden edinilmiştir.

- Michalchuk, B. W. ve Bucknall, R. W. G. (2014, 13-14 Mayıs). *CO₂ Reduction Design Strategies for Naval Ships*. 12th International Naval Engineering Conference (INEC 2014), Amsterdam, Hollanda.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Minsky, M. L. ve Papert, S. A. (1969). *Perceptrons: An introduction to computational geometry*. The MIT Press.
- Miners, W. ve Arikkat, H. (2018, 2-4 Ekim). *T26 PMS-Real time Control of Power Generation, Propulsion & Auxiliaries*. 14th International Naval Engineering Conference & Exhibition (INEC 2018), Glasgow, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.24868/issn.2515-818X.2018.040>
- Molland, A., Turnock, S., & Hudson, D. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974113>
- Mon, D. -L. (1995, 20-24 Mart). *Evaluating Weapon System Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process Based on Entropy Weight*. 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Yokohama, Japonya. <https://doi.org/10.1109/FUZZY.1995.409745>
- Nascetti, D. ve Giuliano, M. (2004). Italian Navy trends in automation of ship controls. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(10), 19-24. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31705-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31705-6)
- Naval Sea Systems Command (NAVSEA). (2005). *2005 Cost Estimating Handbook*. 20 Şubat 2019'da https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/05C/2005_NAVSEA_CEH_Final.pdf adresinden edinilmiştir.
- Naval Sea Systems Command (NAVSEA). (2012). *Design Data Sheet Electric Power Load Analysis (EPLA) for Surface Ships (DDS 310-1 REV 1)*. 1 Eylül 2018'te <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a568950.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Negnevitsky, M. (2005). *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems* (2. bs.). Pearson Education.
- Nelson, M. ve Illingworth, W. T. (1990). *A Practical Guide To Neural Nets*. Addison-Wesley, Reading.
- New, C. ve Gay, R. (2012, 25-26 Ocak). *RCM in the Royal Navy - Developing a Risk Based Policy for Integrating Safety and Maintenance Management*. Managing. Reliability and Maintainability in the Maritime Industry, Londra, Birleşik Krallık. 13 Mayıs 2019'da https://theforge.defence.gov.au/sites/default/files/reliability_centred_maintenance.pdf adresinden edinilmiştir.
- Nuchturee, C., Li, T. ve Xia, H. (2020). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>.
- Nunes, R. A. O., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G. ve Sousa, S. I. V. (2017). The activity-based methodology to assess ship emissions - a review.

- Office of the Parliamentary Budget Officer, Government of Canada. (2017). *The Cost of Canada's Surface Combatants*. 27 Ağustos 2023'te https://publications.gc.ca/collections/collection_2017/dpb-pbo/YN5-123-2017-eng.pdf adresinden edinilmiştir.
- Oh, D., Cho, D. S. ve Kim, T. W. (2023). Design and evaluation of hybrid propulsion ship powered by fuel cell and bottoming cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(22), 8273-8285. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.157>
- Palomo, P. B. (2014). Reduction of underwater radiated noise from ships: new shipbuilding challenge. The vessels "Ramón Margalef" and "Ángeles Alvariño" as technological references of how to build silent vessels. *Ciencia Y tecnología De Buques*, 8(15), 45-60. <https://doi.org/10.25043/19098642.102>
- Pan, P., Sun, Y., Yuan, C., Yan, X. ve Tang, X. (2021). Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111048. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111048>
- Parasuraman, R., ve Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39(2), 230-253. <https://doi.org/10.1518/001872097778543886>
- Paul, D. (2020). A History of electric ship propulsion systems [History]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 26(6), 9-19. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2020.3014837>
- Peacock, T. D. (2019, 2-3 Temmuz). *T23 Frigate Power Generation and Machinery Controls Update (PGMU)-Let the Trials Commence*. Engine as a Weapon International Symposium VIII (EAAW VIII), Lonra, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.24868/issn.2515-8171.2019.012>
- Peer, D. (2012). Estimating the cost of naval ships. *Canadian Naval Review*, 8 (2). https://www.navalreview.ca/wp-content/uploads/CNR_pdf_full/cnr_vol8_2.pdf
- Petersen, L.J., Ziv, M., Burns, D.P., Dinh, T.Q. ve Malek, P.E. (2011, 12-13 Eylül). *U.S. Navy Efforts Towards Development of Future Naval Weapons and Integration into an All Electric Warship (AEW)*. Engine as a Weapon International Symposium (EAAW), Londra, Birleşik Krallık.
- Pohekar, S. D. ve Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365-381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- Ramirez-Atencia, C., Rodriguez-Fernandez, V. ve Camacho, D. (2020). A revision on multi-criteria decision making methods for multi-UAV mission planning support. *Expert Systems with Applications*, 160, 113708. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113708>
- Rao, G. A. ve Mahulikar, S. P. (2005). Effect of atmospheric transmission and radiance on aircraft infared signatures. *Journal of Aircraft*, 42(4), 1046-1054. <https://doi.org/10.2514/1.7515>

- Rausand, M. ve Høyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. John & Wiley Sons.
- RENK GmbH. (2023). *Systems for Marine Propulsion and Electrification*. 24 Ağustos 2023'te <https://www.renk.com/en/products/marine> adresinden edinilmiştir.
- Reusser, C. A., Young, H. A., Osses, J. R. P., Perez, M. A. ve Simmonds, O. J. (2020). Power electronics and drives: applications to modern ship propulsion systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(4), 106-122. <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.3002493>
- Roa, M. J. (2015, 5-7 Ekim). *Application of Classification Rules to Hybrid Marine Electrical Propulsion Plants*. 2015 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC), Houston, TX, ABD. <https://doi.org/10.1109/PCICON.2015.7435118>
- Roh, M. I. ve Lee, K. Y. (2018). *Computational Ship Design*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4885-2>
- Rolls-Royce. (2018). *Hybrid propulsion for naval vessels*. 19 Ağustos 2023'te <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/insights/2018/richard-partridge-on-hybrid-propulsion-for-naval-vessels.aspx> adresinden edinilmiştir.
- Rolls-Royce. (2021). MT30 powering the world's future fleets. 28 Nisan 2022'de <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/naval/gas-turbines/mt30-marine-gas-turbine.aspx> adresinden edinilmiştir.
- Russom, D. M., Mummaw, K., ve Pineiro, I. (2004, 14-17 Haziran). *Managing Reliability Improvement in the U.S. Navy's Marine Gas Turbine Generator Sets*. ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air. Volume 5: Turbo Expo 2004, Parts A and B, Viyena, Avusturya. <https://doi.org/10.1115/GT2004-54122>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill International, New York.
- Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *Interfaces*, 24(6), 19-43. <http://www.jstor.org/stable/25061950>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Sánchez-Lozano, J. M., Correa-Rubio, J. C. ve Fernández-Martínez, M. (2022). A double fuzzy multi-criteria analysis to evaluate international high-performance aircrafts for defense purposes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115, 105339. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105339>
- Sánchez-Lozano, J. M. ve Rodríguez, O. N. (2020). Application of Fuzzy Reference Ideal Method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection. *Applied Soft Computing*, 88, 106061, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106061>

- Sánchez-Lozano, J. M., Serna, J. ve Dolón-Payán, A. (2015). Evaluating military training aircrafts through the combination of multi-criteria decision making processes with fuzzy logic. A case study in the Spanish Air Force Academy. *Aerospace Science and Technology*, 42, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2014.12.028>
- Scofield, T. ve Brown, A. (2007, 19-21 Mart). *Manning and Automation Model for Naval Ship Analysis and Optimization*. Human Systems Integration Symposium 2007 (HSIS 2007) Military, Industry and Academia: Bridging Human Performance Science to Engineering Practice, Annapolis, MD, ABD.
- Schneekluth, H. ve Bertram, V. (1998). *Ship Design for Efficiency and Economy* (2. bs.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4133-3.X5000-2>
- Schofield, J. S. ve Wright, D. J. (2018, 2-4 Ekim). *Efficient Procurement of Low Vulnerability Warships*. 14th International Naval Engineering Conference & Exhibition (INEC 2018), Glasgow, Birleşik Krallık.
- Schuddebeurs, J.D., Norman, P.J., Booth, C.D., Burt and, G.M. ve McDonald, J.R. (2006, 6-8 Eylül). *Emerging Research Issues Regarding Integrated-Full-Electric-Propulsion*. 41st International Universities Power Engineering Conference. Newcastle upon Tyne, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2006.367563>
- Schulten, P., Geertsma, R. ve Visser, K. (2017, 20-21 Haziran). *Energy as a weapon, part II*. International Conference EAAC VII, Glasgow, Birleşik Krallık.
- Sheridan, T. B. ve Verplank, W. L. (1978) *Human and computer control of undersea teleoperators*. Teknik Rapor, MIT Man-Machine Systems Laboratory, Cambridge.
- Shih, N. C., Weng, B. J., Lee, J. Y. ve Hsiao, Y. C. (2014). Development of a 20 kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(25), 13894-13901. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.113>
- Ships' Machinery Committee (Panel M-37 Diesel Plant Practices). (1990). *Marine Diesel power plant practices Technical and Research Bulletin* (No. 3-49). Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).
- Siemens AG. (2008, 14 Ekim). *Siemens Equips New Germany Navy Frigates with Propulsion and Control Systems - Order Worth for Siemens almost 50 Million Euros*. Basın bildirisi. 7 Haziran 2019'da https://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/industry_solution/s/200810316e.pdf adresinden edinilmiştir.
- Sigg H. (1990). Marine gearing-development and technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 204(1), 3-14. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1990_204_003_02
- Simmonds, O. J. (2016, 26-28 Nisan). *Advanced Hybrid Systems and New Integration Challenges*. 13th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC 2016). Bristol, Birleşik Krallık.

- Skalna, I., Rębiasz, B., Gawel, B., Basiura, B., Duda, J., Opila, J. ve Pelech-Pilichowski, T. (2015). *Advances in Fuzzy Decision Making*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26494-3>
- Skjong, E., Rødskar, E., Molinas, M., Johansen, T. A. ve Cunningham, J. (2015). The marine vessel's electrical power system: From its birth to present day. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2410-2424. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2496722>
- Skjong, E., Volden, R., Rødskar, E., Molinas, M., Johansen, T. A. ve Cunningham, J. (2016). Past, present, and future challenges of the marine vessel's electrical power system. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4), 522-537. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2552720>
- Smith, M. (2015). *Improvements to the design process of the energy distribution system*. [Yüksek lisans tezi, Delft University of Technology]. Delft University of Technology Research Repository. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:59b18585-a279-4de3-aa14-f784872e34bf/datastream/OBJ/dow>
- Socorro García-Cascales, M., Teresa Lamata, M. ve Miguel Sánchez-Lozano, J. (2012). Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process. *Annals of Operations Research*, 199, 373–391. <https://doi.org/10.1007/s10479-011-1009-x>
- Sou, W. S., Goh, T., Lee, X. N., Ng, S. H. ve Chai, K. -H. (2022). Reducing the carbon intensity of international shipping-The impact of energy efficiency measures. *Energy Policy*, 170, 113239. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113239>
- Spence, J. H. ve Fischer, R. W. (2017). Requirements for reducing underwater noise from ships. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(2), 388-398. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2578198>
- Spindel, R., Laska, S., Cannon-Bowers, J., Cooper, D., Hengmann, K., Hogan, R., Hubbard, J., Johnson, J., Katz, E., Roberts, K., Sheridan, T., Skalka, S., Smith, J. (2000). *Optimized surface ship manning*. Naval Research Advisory Committee. <https://www.nre.navy.mil/media/document/2000rptoptimizingsurfaceshipmanningpdf>
- SSS Clutch Company. (t.y.). *Always Ready to Engage*. 5 Ocak 2019'da <http://www.sssclutch.com/en/marine/modern-propulsion-references/> adresinden edinilmiştir.
- Stapersma, D. (2016, 26-28 Nisan). *Some Thoughts on an Energy Efficiency Design Index for Naval Ships*. 13th International Naval Engineering Conference (INEC 2016), Bristol, Birleşik Krallık.
- Stapersma, D. (2000a, 22-26 Mayıs). *Diesel Engines for Fast Ships*. 33rd WEGEMT Graduate School Fast Ship Propulsion Plants, Genova, İtalya. https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/33rd_WEGEMT_School_for_Fast_Ship_Propulsion_Plants.pdf

- Stapersma, D. (2000b, 19-23 Haziran). *Interaction Between Propulsor and Engine*. 34th WEGEMT Graduate School Developments in the Design of Propulsors and Propulsion Systems, Delft, Hollanda. [https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/34th WEGEMT School Developments in the Design of Propulsors and Propulsion Systems.pdf](https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/34th_WEGEMT_School_Developments_in_the_Design_of_Propulsors_and_Propulsion_Systems.pdf)
- Stapersma, D. ve Woud, H. K. (2005). Matching propulsion engine with propulsor. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 4(2), 25-32. <https://doi.org/10.1080/20464177.2005.11020189>
- Strain, J. ve Eason, K. (2000). Exploring the implications of allocation of function for human resource management in the Royal Navy. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(2), 319-334. <https://doi.org/10.1006/ijhc.1999.0291>
- Sulligoi, G., Bosich, D., Mazzuca, T. ve Piva, L. (2012, 16-18 Ekim). *The FREMM Simulator: a New Software Tool to Study Electro-Mechanic Dynamics of the Shipboard Integrated Power System*. 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, İtalya. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387450>
- Surko, S. ve Osborne, M. (2005). Operating speed profiles and the ship design cycle. *Naval Engineers Journal*, 117(3), 79-85. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2005.tb00364.x>
- Tate, A. (2018, 14-16 Kasım). *Energy Management Challenges in Naval Platforms*. Innovative Energy Solutions for Military Applications IESMA 2018. Vilnius, Litvanya. <http://www.iesma.info/data/public/uploads/2018/11/3.-andrew-tate.pdf>
- Teixeira, A. P. ve Guedes Soares, C. (2012). Fundamentals of Reliability. G. F. M. de Souza (Ed.), *Thermal Power Plant Performance Analysis*. Springer Series in Reliability Engineering içinde (91-122). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2309-5_5
- Terry, J. M. ve Dullag, R. B. (1992). Electric propulsion for warship - the next step? *Jornal of naval engineering*, 34(1), 148-159. <https://library.imarest.org/record/8392?v=pdf>
- Thompson, J., Vaitekunas, D. ve Birk, A. M. (1998, 27-30 Ocak). *IR Signature Suppression of Modern Naval Ships*. 21st Century Combatant Technology Symposium, Washington, ABD. 7 Ocak 2022'de https://www.davis-eng.com/docs/papers/irss_paper.pdf adresinden edinilmiştir.
- Thompson, J., Vaitekunas, D. ve Brooking, B. (2000, 21-22 Şubat). *Lowering Warship Signatures: Electromagnetic and Infrared*. SMi Conference: Signature Management - The Pursuit of Stealth, Londra, Birleşik Krallık. 21 Mayıs 2022'de https://davis-eng.com/docs/papers/lowering_warship_signatures.pdf adresinden edinilmiştir.
- Thyssenkrupp. (t.y.). *Frigates and corvettes with MEKO® technology since 1983*. 17 Ekim 2023'te <https://www.thyssenkrupp-brazil.com/company/corporate-structure/marine-systems/naval-surface-vessels> adresinden edinilmiştir.

- Thongam, J. S., Tarbouchi, M., Okou, A. F., Bouchard, D. ve Beguenane, R. (2013, 21-23 Ağustos). *Trends in Naval Ship Propulsion Drive Motor Technology*. IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC) 2013, Halifax, NS, Kanada. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2013.6802942>
- Torenvliet, G. L., Jamieson, G. A. ve Chow, R. (2008). Object worlds in work domain analysis: A model of naval damage control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 38 (5), 1030-1040. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2008.2001058>
- Tortarolo, F. (2000, 22-26 Mayıs). *Gas Turbine for Marine Electric Propulsion*. 33rd WEGEMT Graduate School Fast Ship Propulsion Plants, Genova, İtalya. https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/33rd_WEGEMT_School_for_Fast_Ship_Propulsion_Plants.pdf
- Trappe, R. (2001). *Concept exploration for a future frigate/destroyer size warship platform* [Yüksek lisans tezi, Naval Postgraduate School]. Dudley Knox Library. <https://calhoun.nps.edu/entities/publication/ca2cd6d8-b913-4195-b2e0-f27c0af0c9dc>
- Traut, M., Gilbert, P., Walsh, C., Bows, A., Filippone, A., Stansby, P. ve Ruth Wood, R. (2014). Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*, 113, 362-372. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
- Tudor, W. J., ve Harrison, N. (2019, 2-3 Temmuz). *Virtual Integration: Managing Complex Warship Design Through Model Based Engineering*. Engine as a Weapon International Symposium VIII (EAAW VIII), Londra, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.24868/issn.2515-8171.2019.009>
- Tupper, E. C. (2013). *Introduction to Naval Architecture* (5. bs.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07775-X>
- Turner, S. D., Horstmann, P. ve Bain, G. (2006, 20-21 Haziran). *Warship Survivability*. RINA WARSHIP 2006: Future Surface Ships. Londra, Birleşik Krallık.
- Tzeng, G. -H., & Huang, J. -J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications* (1. bs.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b11032>
- United States Government Accountability Office. (2003). *Setting Requirements Differently Could Reduce Weapon Systems' Total Ownership Costs*, GAO-03-57. <https://www.gao.gov/assets/gao-03-57.pdf>
- United States Government Accountability Office. (2019). *Guided Missile Frigate: Navy Has Taken Steps to Reduce Acquisition Risk, but Opportunities Exist to Improve Knowledge for Decision Makers*, GAO-19-512. <https://www.gao.gov/assets/710/700953.pdf>
- van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K. ve Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345-364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- van de Ketterij, R. G. (2018, 2-4 Ekim). *Emissions Reduction at the Netherlands Ministry of Defence: Potential, Possibilities and Impact*. 14th International

- Naval Engineering Conference & Exhibition (INEC 2018), Glasgow, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.24868/issn.2515-818X.2018.065>
- van de Ketterij, R. G., Kramers, C. H. M. ve Verheijen, L. T. G. (2009, 5-6 Kasım). *CO₂ Index: Matching the Dredging Industries Needs with IMO Legislation*. Ceda Dredging Days 2009, Rotterdam, Hollanda. <https://dredging.org/resources/ceda-publications-online/conference-proceedings/abstract/5>
- van Es, G. F. (2011). *Designing and evaluating propulsion concepts of surface combatants*. [Yüksek lisans tezi, Delft University of Technology]. Delft University of Technology Research Repository.
- van Laarhoven, P. J. M. ve Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1-3), 229-241. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(83\)80082-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(83)80082-7)
- van Oossanen, P. (1989, 23 Ekim-1 Kasım). *Characteristics and Relative Merits of Different Vehicle Types*. 13th WEGEMT Graduate School Design Techniques for Advanced Marine Vehicles and High Speed Displacement Ships, Delft, Hollanda. https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/13th_WEGEMT_School_Design_Techniques_for_Advanced_Marine_Vehicles_and_High_Speed_Display.pdf
- Veneri, O., Migliardini, F., Capasso, C. ve Corbo, P. (2012, 16-18 Ekim). *Overview of Electric Propulsion and Generation Architectures for Naval Applications*. 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, İtalya. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387448>
- Vince, R. L. (2020). Crewing the Canadian surface combatants. *Niobe Papers*, 10. <https://www.navalassoc.ca/wp-content/uploads/2020/06/Vince-Crewing-1.pdf>
- Voyce, J. E. ve Wixey, R. K. (2019, 2-3 Temmuz). *Type 45 - Power to Command*. Engine as a Weapon International Symposium VIII (EAAW VIII), Londra, Birleşik Krallık. <https://doi.org/10.24868/issn.2515-8171.2019.011>
- Walsh, P. P. ve Fletcher, P. (2004). *Gas Turbine Performance* (2. bs.). Blackwell Science. <https://doi.org/10.1002/9780470774533>
- Wang, H., Hou, Y., Xiong, Y. ve Liang, X. (2021). Research on multi-interval coupling optimization of ship main dimensions for minimum EEDI. *Ocean Engineering*, 237, 109588. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109588>
- Wang, T. -C. ve Chang, T. -H. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 33(4), 870-880. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.07.003>
- Wang, Y. -M. ve Elhag, T. M. S. (2006). Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment. *Expert Systems with Applications*, 31(2), 309-319. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.09.040.1>
- Wang, Y. -M., Elhag, T. M. S. ve Hua, Z. (2006). A modified fuzzy logarithmic least squares method for fuzzy analytic hierarchy process. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(23), 3055-3071. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2006.08.010>
- Wang, Y. -M., Luo, Y. ve Hua, Z. (2008). On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications. *European Journal of Operational Research*, 186(2), 735-747. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.050>

- Wärtsilä. (2009). *Navy references*. 10 Ağustos 2023'te <https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/navy/hms-daring> adresinden edinilmiştir.
- Wärtsilä. (2017a). Wärtsilä Auxpac Product Guide. 2 Şubat 2020'de https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/g-sets/product-guide-o-e-auxpac.pdf?sfvrsn=b7c5ea45_14 adresinden edinilmiştir.
- Wärtsilä. (2017b). Wärtsilä 26 Product Guide. 18 Şubat 2023'te <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w26.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Wärtsilä. (2020a). Wärtsilä 20 Product Guide. 18 Şubat 2023'te <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w20.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Wärtsilä. (2020b). Wärtsilä Solutions for Marine and Oil & Gas Markets.
- Wärtsilä. (2021). Wärtsilä 14 lighter, smarter, greener. 28 Mart 2022'de <https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/diesel-engines/wartsila-14?> adresinden edinilmiştir.
- Wärtsilä. (t.y.). Online engine configurator. 28 Mart 2022'de <https://www.wartsila.com/marine/engine-configurator> adresinden edinilmiştir.
- Watson, D. G. M. (1998). *Practical Ship Design*. Elsevier.
- Watson, N. ve Janota, M. S. (1982). *Turbocharging the Internal Combustion Engine*. The Macmillan Press.
- Webster, J. S., Fireman, H., Allen, D. A., Mackenna, A. J. ve Hootman, J. C. (2007). US Navy studies on alternative fuel sources and power and propulsion methods for surface combatants and amphibious warfare ships. *Naval Engineers Journal*, 119(2), 35-48. <https://doi.org/10.1111/j.0028-1425.2007.00018.x>
- Wen, S., Lan, H., Hong, Y. Y., Yu, D. C., Zhang, L. ve Cheng, P. (2016). Allocation of ESS by interval optimization method considering impact of ship swinging on hybrid PV/diesel ship power system. *Applied Energy*, 175, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.003>
- Westwod, S. P. C., Spencer, J. ve Simpson, R. R. (1989). Warship propulsion system selection. *Journal of Naval Engineering*, 32(1), 20-32.
- Widmann, J., Nerbun, A. ve Koniers, J. (2019, 14-16 Ağustos). *Modular/Compact Hybrid Electric Drive and Permanent Magnet Motor for FFX-II*. 2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Washington, DC, ABD. <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847805>
- Woolley, A., Ewer, J., Lawrence, P., Travers, A., Deere, S., Whitehouse, T. ve Galea, E. A. (2016, 21-23 Haziran). *Modelling and Simulation Framework to Assess Naval Platform Integrated Survivability*. Maritime/Air Systems & Technologies Conference, MAST Europe 2016, Amsterdam, Hollanda.
- Wood, I. D. H. (2014). Crewing strategies for the Royal Canadian Navy's future ships. *Canadian Naval Review*, 10(4), 4-8. https://www.navalreview.ca/wp-content/uploads/CNR_pdf_full/cnr_vol10_1.pdf

- Woodyard, D. (2009). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines* (9. bs.) (D. Woodyard, Ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-25444-4>
- Woodward, J. B. ve Andersen, T. E. (2003). Marine Engines. R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology* içinde (3. bs. 121-132). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00404-X>
- Worthington, P. (2015, 11-13 Mart). *The Application of Survivability to Warship Design in the Modern Naval Environment*. Congreso Internacional de Diseño e Ingeniería Naval, Cartagena, Kolombiya. <https://cidin.co/index.php/cidin/article/view/72>
- Woud, J. K. (2000, 22-26 Mayıs). *Matching Ship, Propulsor and Prime Mover*. 33rd WEGEMT Graduate School Fast Ship Propulsion Plants, Genova, İtalya. https://www.wegemt.com/wp-content/uploads/2019/04/33rd_WEGEMT_School_for_Fast_Ship_Propulsion_Plants.pdf
- Woud, H. K. ve Stapersma, D. (2003). *Design of propulsion and electric power generation systems* (1. bs.). The Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST).
- Wu, W., Wang, D., Arapostathis A. ve Davey, K. (2007, 21-23 Mayıs). *Optimal Power Generation Scheduling of a Shipboard Power System*. 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Arlington, VA, ABD. <https://doi.org/10.1109/ESTS.2007.372135>
- Xu, R. (2000). Fuzzy least-squares priority method in the analytic hierarchy process. *Fuzzy Sets and Systems*, 112(3), 359-404. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00376-X](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00376-X)
- Xu, Z. -S. ve Chen, J. (2007). An interactive method for fuzzy multiple attribute group decision making. *Information Sciences*, 177(1), 248-263. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.03.001>
- Yang, T. ve Hung, C. -C. (2007). Multiple-attribute decision making methods for plant layout design problem. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(1), 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.12.002>
- Young, S., Newell, J. ve Little, G. (2001). Beyond electric ship. *Naval Engineers Journal*, 113(4), 79-92. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2001.tb00090.x>
- Zade, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zade, L. (1975a). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part 1. *Information Sciences*, 8(2), 199-249.
- Zade, L. (1975b). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part 2. *Information Sciences*, 8(3), 301-357.
- Zade, L. (1975c). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part 3. *Information Sciences*, 9(1), 43-80.
- Zamarin, J. (2016, 10-11 Mayıs). *NSC-the New Large Cutter in Practical Experience*. Innovative Trends in Marine Drive Systems, Augsburg, Almanya.

- Zimmermann, H. -J. (1987). *Fuzzy Sets Decision Making and Expert Systems*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3249-4>
- Zimmermann, H. -J. (1991). *Fuzzy Set Theory And Its Applications* (2. bs.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Zimmermann, H. -J. (1996). *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0>
- Zivi, E. (2005). Design of robust shipboard power automation systems. *Annual Reviews in Control*, 29(2), 261-272. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2005.08.004>



A

JENERİK GEMİLERE İLİŞKİN VERİLER

Tablo A.1 Jenerik fırkateynin genel özelliklerine ilişkin veriler

Veri adı	Kaynak	Değer
Bağıl dönme verimi	van Es (2011)	0,948
İtme azalması katsayısı		0,063
Taylor iz katsayısı		0,045
Pervane çapı		4,5 m
Δ		5200 ton
Aktarma verimi	Woud ve Stapersma (2003)	%95
Kanat açınım alanı oranı	Dang ve ark., 2013	0,40

Tablo A.2 Jenerik fırkateynin seçeneklerinin ısıt makinelerine ilişkin veriler

Makine Veri	SM1	SM2, SM4 ve SM6	SM3	SM5 ve SM8	SM7 ve SM9
Azami devir	MAN ES, (2021)	MAN ES, (2022)	GE, (2021)	Rolls-Royce, (2021)	GE, (2021)
	1000 rpm	1800 rpm	3600 rpm	3300 rpm	3600 rpm
Hacim	MAN ES, (2021)	MAN ES, (t.y.-b)	GE, (2021)	Rolls-Royce, (2021)	GE, (2021)
	U _x G _x Y 8,047x2,473x3,682 m	U _x G _x Y 3,421x1,661x3,316 m	U _x G _x Y 8,0x2,6x2,4 m	U _x G _x Y 8,70x3,54x3,07m	U _x G _x Y 8,0x2,6x2,4 m
Ağırlık	MAN ES, (2021)	MAN ES, (t.y.-b)	GE, (2021)	Rolls-Royce, (2021)	GE, (2021)
	51,3 ton	10,8 ton	20,215 ton	30 ton	20,215 ton
Yakıt sfc	Geertsma, Vollbrandt ve ark. (2017) ve MAN ES, (2021)	MAN ES, (2022)	Franks ve ark. (1990)	Herdzik ve Cwilewicz, (2017)	GE, (2017) ve Franks ve ark. (1990)

Tablo A.2 Jenerik fırkateynin seçeneklerinin ısıt makinelerine ilişkin veriler (devamı)

Makine Veri	SM1	SM2, SM4 ve SM6	SM3	SM5 ve SM8	SM7 ve SM9
Azami güçte egzoz gazı sıcaklığı	MAN ES, (2021)	MAN ES, (2022)	GE, (2021)	Herdzik ve Cwilewicz, (2017)	GE, (2019)
	348 °C	381°C	566 °C	469 °C	518 °C
TBO	Eberhardt, (2017)	MAN ES, (2022)	---	---	---
	32000 saat	30000 saat	---	---	---

Tablo A.3 Jenerik fırkateynin seçeneklerinin sevk elektrik motorlarına ilişkin veriler

Makine Veri	SEM1	SEM2	SEM3
Azami devir	Şekil 3.8	Şekil 3.8	Şekil 3.8
	103 rpm	190 rpm	190 rpm
Hacim	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)
	UxGxY 2,95x3,25x3,05 m	UxGxY 2,95x3,25x3,05 m	UxGxY 2,89x4,68x3,89 m
Ağırlık	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)
	27,215 ton	27,215 ton	77,11 ton

Tablo A.4 Jenerik fırkateynin üreteç setlerine ilişkin veriler

Üreteç Veri	ÜS1	ÜS2	ÜS3
Hacim	Wärtsilä, (2021)	MAN ES, (t.y.-a)	GE, (2018)
	UxGxY 4,577x1,487x1,761 m	UxGxY 5,385x1,770x2,670 m	UxGxY 13,94x2,64x3,98 m
Ağırlık	Wärtsilä, (2021)	MAN ES (t.y.-a)	GE, (2018)
	7,8 ton	15,8 ton	90 ton
Yakıt sfc	Wärtsilä (t.y.)	MAN ES, (2022)	Wu ve ark., (2007)

Tablo A.5 Jenerik ADKG'nin genel özelliklerine ilişkin veriler

Veri adı	Kaynak	Değer
Bağıl dönme verimi	Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman (2017)	1
İtme azalması katsayısı		0.155
Taylor iz katsayısı		0,08
Pervane çapı		3,2 m
Δ		3800 ton
Aktarma verimi	Woud ve Stapersma (2003)	%97
Kanat açınım alanı oranı	Dang ve ark., 2013	0,40

Tablo A.6 Jenerik ADKG seçeneklerinin sevk makinelerine ilişkin veriler

Makine Veri	SM1, SM2 ve SM5	SM3	SM4	SEM
Azami devir	Wärtsilä, (2017b)	Wärtsilä, (2020a)	Wärtsilä, (2017b)	Şekil 3.9
	1000 rpm	1000 rpm	1000 rpm	123 rpm
Hacim	Wärtsilä, (2017b)	Wärtsilä, (2020a)	Wärtsilä, (2017b)	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)
	UxGxY 6,025x2,763x 2,990 m	UxGxY 2,689x1,461x 2,211 m	UxGxY 5,059x2,107x 2,686 m	UxGxY 2,46x3,25x 3,05 m
Ağırlık	Wärtsilä, (2017b)	Wärtsilä, (2020a)	Wärtsilä, (2017b)	C. Corey (kişisel iletişim, 31 Ocak 2022)
	36,1 ton	6,6 ton	21,6 ton	18,143 ton
Yakıt sfc	Geertsma, Negenborn, Visser, Loonstijn ve Hopman (2017a); Wärtsilä, (2017b); G.Yılmaz (kişisel iletişim, 27 Nisan 2020)	Wärtsilä, (2020a) ve G. Yılmaz (kişisel iletişim, 27 Nisan 2020)	Wärtsilä, (2017b) ve G. Yılmaz (kişisel iletişim, 27 Nisan 2020)	---
Azami güçte egzoz gazı sıcaklığı	Wärtsilä, (2017b)	---	Wärtsilä, (2017b)	---
	324 °C	---	324 °C	---
TBO	Wärtsilä, (2017b)	Wärtsilä, (2020a)	Wärtsilä, (2017b)	---
	24000 saat	20000 saat	24000 saat	---

Tablo A.7 Jenerik ADKG üreteç setlerine ilişkin veriler

Üreteç Veri	ÜS1	ÜS2
Hacim	Wärtsilä, (2017a)	Wärtsilä, (2017a)
	UxGxY 4,634x1,920x2,248 m	UxGxY 4,764x1,920x2,248 m
Ağırlık	Wärtsilä, (2017a)	Wärtsilä, (2017a)
	13,530 ton	14,174 ton
Yakıt sfc	Wärtsilä, (2017a) ve G. Yılmaz (kişisel iletişim, 27 Nisan 2020)	Wärtsilä, (2017a) ve G. Yılmaz (kişisel iletişim, 27 Nisan 2020)

B

PERVANE HARİTASI İÇİN HESAPLAMA YÖNTEMİ

Pervanelerin performansı belirli haritalar üzerinde boyutsuz katsayılar ile tanımlanmaktadır. Bu katsayılar, (B.1-3) eşitlikleriyle ifade edilmekte ve sırasıyla “itme katsayısı”, “tork katsayısı” ve “ilerleme katsayısı” olarak adlandırılmaktadır (Woud, 2000).

$$K_T = \frac{T_F}{\rho \cdot n_p^2 \cdot D^4} \quad (B.1)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n_p^2 \cdot D^5} \quad (B.2)$$

$$J = \frac{v_A}{n_p \cdot D} \quad (B.3)$$

D : pervane çapı [m]

J : ilerleme katsayısı [-]

K_Q : itme katsayısı [-]

K_T : tork katsayısı [-]

n_p : pervane devri [1/s]

Q : tork [Nm]

T_F : itme kuvveti [N]

v_A : pervaneye gelen suyun (eksenel) hızı [m/s]

ρ : suyun özgül ağırlığı [kg/m³]

Pervane devri, (B.3) ve (B.4) eşitlikleri kullanılarak (B.5) eşitliğiyle hesaplanabilmektedir.

$$w_T = \frac{v_S - v_A}{v_S} = 1 - \frac{v_A}{v_S} \quad (B.4)$$

$$n_p = \frac{v_A}{J \cdot D} = \frac{(1 - w_T) \cdot v_S}{J \cdot D} \quad (B.5)$$

- D : pervane çapı [m]
J : ilerleme katsayısı [-]
 n_p : pervane devri [1/s]
 v_A : pervaneye gelen suyun (eksenel) hızı [m/s]
 v_S : gemi hızı [m/s]
 w_T : Taylor iz katsayısı

Direnç, görece düşük hızlar için (3.1) bağıntısı ve (B.4) eşitliği kullanılarak (B.6) eşitliğiyle gösterilebilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003).

$$R = C_E \cdot \rho^{1/3} \cdot \Delta^{2/3} \cdot \left(\frac{v_A}{1 - w_T} \right)^2 \quad (B.6)$$

$$C_E = f(v_S, \Delta, \text{tekne kirliliği}, \text{tekne formu}, \text{deniz durumu}, \text{su derinliği})$$

- R : direnç kuvveti [N]
 v_A : pervaneye gelen suyun (eksenel) hızı [m/s]
 v_S : gemi hızı [m/s]
 w_T : Taylor iz katsayısı [-]
 Δ : deplasman tonajı [kg]
 ρ : suyun özgül ağırlığı [kg/m³]

Belirli bir v_S hızı için “gemi itme katsayısı” (B.7) eşitliği ile hesaplanabilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003).

$$K_{T,gemi} = \frac{1}{\rho \cdot D^2} \cdot \frac{C_E \cdot \rho^{1/3} \cdot \Delta^{2/3}}{k_p \cdot (1 - t) \cdot (1 - w_T)^2} \cdot J^2 = c \cdot J^2 \quad (B.7)$$

$$C_E = f(v_S, \Delta, \text{tekne kirliliği}, \text{tekne formu}, \text{deniz durumu}, \text{su derinliği})$$

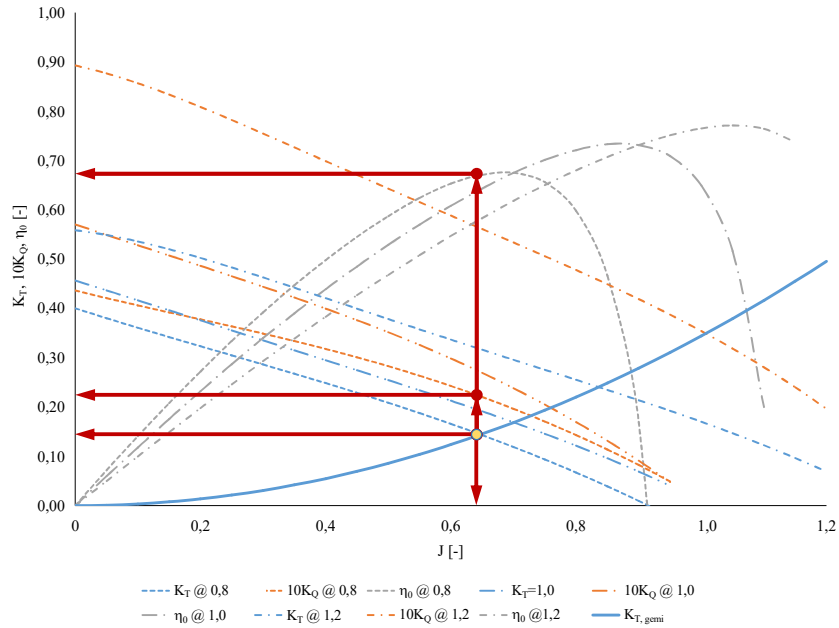
- D : pervane çapı [m]
J : ilerleme katsayısı [-]
 k_p : şaft sayısı [-]
t : itme azalması katsayısı [-]

w_T : Taylor iz katsayısı [-]

Δ : deplasman tonajı [kg]

ρ : suyun özgül ağırlığı [kg/m³]

Pervane haritaları; itme, tork, gemi ve pervane hızı arasındaki bağlantıyı vermektedir. Farklı hatve oranları için açık su pervane performansını gösteren örnek bir harita Şekil B.1’de verilmiştir. Gösterim bütünlüğü bakımından tork katsayısı, 10 ile çarpılarak harita üzerinde işaretlenmektedir. (B7) eşitliğinde görüldüğü üzere, gemi itme katsayısı ($K_{T, \text{gemi}}$), ilerleme katsayısına bağlı bir paraboldür. Haritada, gemi itme katsayısı ile itme katsayısının kesişim noktası, pervanenin çalışma noktasını belirlemektedir. Bu nokta vasıtasıyla; ilerleme katsayısı, tork katsayısı, itme katsayısı ve açık su pervane verimi bulunabilmektedir; bu işlemler, MC440 yazılımı vasıtasıyla örnek bir pervane esas alınarak 0,8 hatve oranı değeri için Şekil B.1’de gösterilmiştir. Yukarıda belirtilen işlemler her bir hatve oranı için yapıldıktan sonra (ortaya çıkan kesişim noktalarına karşılık gelen) en yüksek verime sahip olan hatve oranı “tasarım hatve oranı” olmaktadır. Bu hatve oranına karşılık gelen diğer katsayılar da tasarım katsayıları olacaktır; “tasarım ilerleme katsayısı” ve (B.5) eşitliği kullanılarak, azami hız değeri için bulunan pervane devir değeri de “tasarım pervane devir değeri” olacaktır.



Şekil B.1 Örnek bir açık su pervane haritası (MC440 yazılımı vasıtasıyla oluşturulmuştur)

C

SEVK MAKİNESİ-PERVANE UYUMLANDIRILMASI İÇİN HESAPLAMA YÖNTEMİ

Pervane gücü ile pervane devri arasındaki ilişki “pervane kuralı (kanunu)” olarak adlandırılmakta ve (C.1) bağıntısıyla gösterilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003).

$$P_p \propto n_p^3 \quad (C.1)$$

P_p : pervane gücü [kW]

n_p : pervane devri [rpm]

Pervane devri, (C.2) bağıntısıyla gösterildiği şekilde gemi hızı ile doğru orantılı olduğundan, pervane kuralındaki pervane gücü, (C.3) bağıntısıyla gösterildiği şekilde gemi hızıyla da ilişkilendirilebilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003).

$$n_p \propto v_s \quad (C.2)$$

$$P_p \propto v_s^3 \quad (C.3)$$

P_p : pervane gücü [kW]

n_p : pervane devri [rpm]

v_s : gemi hızı [knot]

(C.1), (C.2) ve (C.3) bağıntılarıyla ifade edilen pervane kuralı, aynı bağıntılarda pervane gücü yerine fren gücü ve gemi hızı yerine makine devri konularak, (C.4) bağıntısıyla gösterildiği şekilde ifade edilebilmektedir (Götz ve ark., 2004; Molland ve ark., 2011).

$$P_B \propto n_E^3 \quad (C.4)$$

P_B : fren gücü [kW]

n_E : makine devri [rpm]

C.1 Dizel Motorun Çalışma Zarfı

Atmosferik dizel motorların her bir devirde üretebilecekleri azami güç Şekil C.1’de gösterildiği üzere “yakıt sınırı” ile sınırlandırılmıştır (Stapersma, 2000b). Bu sınır, çevrim başına azami yakıt miktarı ile belirlenmektedir. Ortalama etkin basınç ile yakıt miktarı arasındaki ilişki (C.5) eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte motorun genel veriminin değişmediği kabulüyle, ortalama etkin basınç, püskürtülen yakıt ile orantılı olmaktadır (C.6). Dolayısıyla azami yakıt, azami torka eşdeğer olan azami ortalama etkin basıncı ifade etmektedir. Bu kapsamda yakıt sınırı, “tork sınırı” olarak da adlandırılabilir (Carlton, 2012).

$$p_{me} = \frac{\eta_f \cdot Q_{HV} \cdot m_f}{V_s} \quad (C.5)$$

$$p_{me} \propto m_f \quad (C.6)$$

m_f : döngü başına püskürtülen yakıt miktarı [kg]

p_{me} : ortalama etkin basınç [Pa]

Q_{HV} : alt ısı değeri [J/kg]

V_s : süpürme hacmi [m³]

η_f : yakıt verimi [-]

Dizel motorlarda belirli silindir hacminden daha fazla güç üretilebilmesi için daha fazla yakıtın ve bu yakıtı yakacak daha fazla havanın silindire verilmesi gerekmektedir (Woud ve Stapersma, 2003). Havanın yoğunluğunun artırılması durumunda daha büyük kütledeki hava silindirlere girebilecektir. Bu yoğunluğun artırılması maksadıyla havanın basıncının artırılması ve sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir; bu işlem, “aşırı (basıncılı) doldurma” olarak adlandırılmaktadır. Deniz dizel motorlarının neredeyse tamamı, daha güç yoğun olarak kullanılmak istendiğinden aşırı doldurma yöntemi ile çalışmaktadır (Stapersma, 2000b). Aynı silindir boyutları için; aşırı doldurmaya sahip olmayan atmosferik motorların ortalama etkin basınçları 6-7 bar değerlerindeyken, aşırı doldurmalı motorlarda bu basınç değerleri 30 bar’a kadar çıkabilmektedir (Woud ve Stapersma, 2003).

Genel olarak aşırı doldurma; harici elektrik motorunu veya motorun mekanik enerjisini doğrudan kullanılarak veya egzoz gazı enerjisini türbin vasıtasıyla

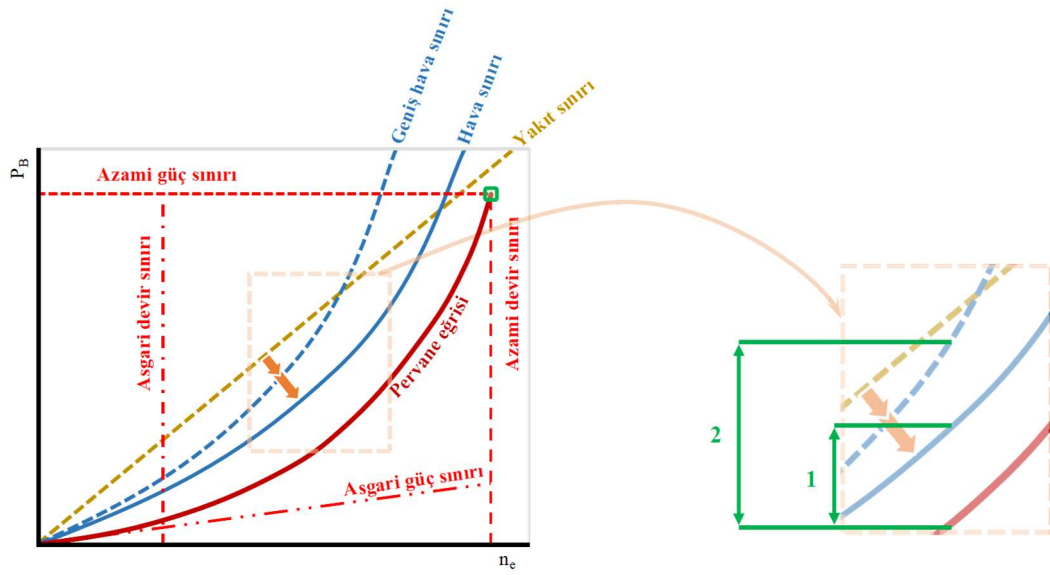
kullanarak döndürülen kompresörler tarafından yapılmaktadır (Woud ve Stapersma, 2003). Kompresör, havayı çevreden emmekte ve sıkıştırarak silindirlere göndermektedir. Egzoz gazının enerjisinin kullanıldığı yöntem, dizel motorlarda en sık kullanılan aşırı doldurma yöntemidir. Bu yöntemde, egzoz manifoldu çıkışındaki egzoz gazında mevcut entalpiyi kullanarak hareket eden bir türbin, doğrudan bir kompresöre irtibatlandırılmaktadır; bu çalışma ilkesi literatürde “Büchi ilkesi” olarak bilinmektedir. Türbin ve kompresörle bunları içine alan muhafazanın oluşturduğu cihaz “turboşarjer” olarak adlandırılmaktadır. Turboşarjer; yanma odası, dizel motor olan bir gaz türbini olarak da tanımlanabilmektedir. Turboşarjer çıkışındaki sıkıştırılmış havanın yoğunluğu, motor soğutma sıvısı veya deniz suyu ile soğutulması suretiyle daha da arttırabilmektedir.

Turboşarjerin dizel motorlarda kullanımı, turbo makinelerde yaşanabilen birçok sınırlamayı da beraberinde getirmektedir (Woud ve Stapersma, 2003); bu sınırlama turbo makinelerin aerotermodinamik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu sınırlamalar da turboşarjerin üzerinde kurulu olduğu dizel motorun çalışma zarfını daraltmaktadır.

Turboşarjlı dizel motorda, belirli bir hızın altında azami torka ulaşamamaktadır (Stapersma, 2000b). Bunun sebebi, düşük motor devrinin düşük egzoz debisine neden olmasıdır; bunun sonucu türbin kütle debisi hızla düşmektedir. Bu esnada, sıcaklıkla orantılı olan özgül egzoz enerjisinin yüksek olmasına rağmen, (akış alanı sabit tutulduğunda) kütle debisiyle birlikte türbin basıncının düşmesi sonucunda, türbin kompresöre yeterli gücü sağlayamaz duruma gelmektedir. Yeterli gücü alamayan kompresör, hızını koruyamadığından emme havası basıncı düşmeye başlamaktadır; (yakıt debisinin sabit tutulması durumunda) havanın yetersizliği nedeniyle silindirde tamamlanamayan yanma sonucu egzoz sıcaklığı çok yükselmekte ve bu durum da motorun aşırı ısı yüklenmesine neden olmaktadır. Düşük hava debisi kompresörde “surge” olarak adlandırılan ve hava akış yönünün değişkenlik göstermesi sonucu oluşan akış kararsızlığına neden olmaktadır (Watson ve Janota, 1982). Surge’e neden olan çalışma bölgesinde kompresörün çalıştırılmaya devam edilmesi durumunda, hasara sebep olunabilecektir. Aşırı ısı yük ve “surge” olgusu dikkate alındığında, turboşarjerli dizel motorundan azami tork, sadece yüksek hız bölgesinde elde edilebilmektedir.

Yukarıda belirtilen aşırı ısı yüklenme ve “surge” olgusu sonucu, tekil turboşarjlerin kullanıldığı bir motorda her bir devirde üretebilecek azami güç için oluşan daralma Şekil C.1’de “hava sınırı” ile gösterilmiştir (Stapersma, 2000b).

(C.4) bağıntısıyla ifade edilen ilişki, Şekil C.1’de “pervane eğrisi” olarak gösterilmiştir (Götz ve ark., 2004). Bu eğri, özellikle dizel motor üreticileri tarafından, genel olarak tasarımlarının eniyilenmesi için esas alınan eğridir (Molland ve ark., 2011).



Şekil C.1 Dizel motorun kuramsal çalışma zarfı [Stapersma (2000b), Woodward ve Andersen (2003) ve Woud ve Stapersma’dan (2003) uyarlanmıştır]

Pervane eğrisi, motordaki tüm kuvvetlerin denge içerisinde olduğu (kararlı) çalışma koşullarını belirtmektedir (Götz ve ark., 2004). Dizel motorun bu eğri dışına çıkması durumunda tekrar dengenin sağlanmasına kadar geçecek süreçte ilave güç ihtiyacı oluşabilecektir. Dizel motorun devri arttıkça pervane devri de artacaktır. Ancak bu aşamada, pervane devri ile gemi hızı arasındaki ilişki dengeden uzaklaşmaya başlayacaktır. Pervane, istenen gemi hızı için hızlı hareket etmeye çalışacak ve dengeli duruma göre daha fazla güç çekecektir; bunun sonucu pervane eğrisi sola doğru kayma eğiliminde olacaktır. Bu durumda, dizel motorun belirli bir devirdeki güç çıkışı, pervane eğrisinin gerektirdiğinden daha yüksek olabilecektir. Bu ilave güç ihtiyacı “ivmelenme ihtiyatı” olarak adlandırılmakta (Götz ve ark., 2004) ve pervane eğrisi ile “hava sınırı eğrisi” arasındaki alanı ifade etmektedir. Bu alanın büyük olması, genel olarak daha hızlı manevra yapma imkânı sağlamaktadır; bu imkân özellikle su üstü harp gemileri için hayati önem taşıyabilmektedir. Bahse

konu alanın genişletilmesi, başka bir ifadeyle hava sınırı eğrisinin sol üste doğru kaydırılması maksadıyla muhtelif yöntemler bulunmaktadır. Sıralı turboşarjer, kademeli turboşarjer, türbin giriş alanı ayarlanabilir turboşarjer, “waste gate”, “blow off” vb. sistemler, bu yöntemler arasında yer almaktadır (Woud, 2000). Bu yöntemlerin kullanımı, hava sınırını Şekil C.1’de gösterildiği üzere “geniş hava sınırına” kaydırarak ivmelenme ihtiyatını arttırabilmektedir. Bu artış Şekil C.1’in sağ tarafında yer alan küçük şekilde ayrıntılı olarak gösterilmiştir; bu küçük şekilde, 1 numaralı aralık, seçilen bir makine devir değeri için “hava sınırı” ile çalışan motorun sahip olduğu ivmelenme ihtiyatını, 2 numaralı aralık ise yine aynı makine devir değeri için “geniş hava sınırı” ile çalışan motorun sahip olduğu ivmelenme ihtiyatını göstermektedir.

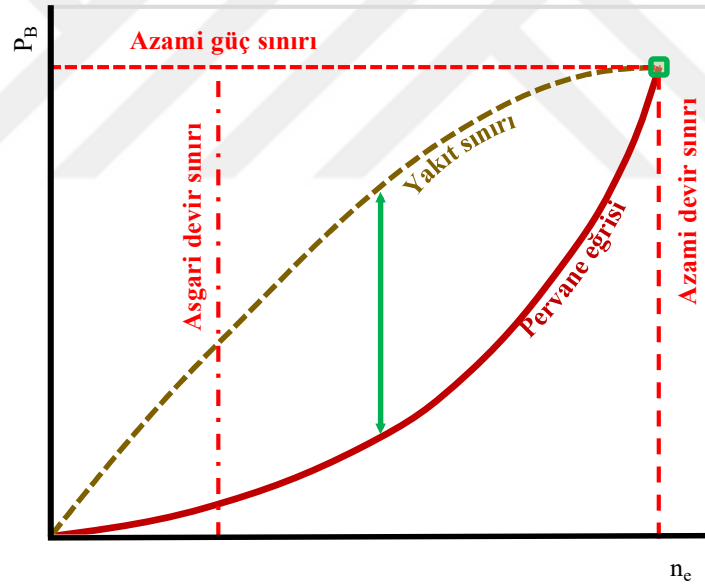
Dizel motorun çalışma zarfının diğer sınırlamaları Şekil C.1’de gösterilmiştir. Belirli bir hızın altında motorda yanmanın oluşması için yeterli basınç oluşamamakta ve bunun sonucu motor düzgün çalışmamakta veya tamamen durmaktadır (Stapersma, 2000b). Belirtilen bu hız, Şekil C.1’de “asgari hız sınırı” olarak gösterilmiştir. Motorun hareketli parçalarının tasarımıyla ilgili azami atalet kuvvetlerinin uygulanabileceği ve aşılamayacağı çalışma durumu, motorun azami hızıyla sınırlandırılmıştır. Bu sınırlama Şekil C.1’de “azami hız sınırı” olarak gösterilmiştir. %25-%40 yükün altında motordaki yanma çok “soğuk” hâle gelebildiğinden silindirlerde “kirlenme (fouling)” oluşabilmektedir. Bu nedenle motorun düşük güçte çalıştırılmasına yalnızca sınırlı bir süre için izin verilmektedir; bununla birlikte, bu sınırlama için kesin bir yaklaşım bulunmamakta, kısıtlamalar motor üreticileri tarafından belirlenmektedir. Özellikle yüksek ortalama etkin fren basınçlarına ve asgari ile azami güç değerlerinde oldukça yüksek yakıt debisi farkı olan motorlarda, emme havasının, motorun soğutma suyu ile ısıtılması suretiyle düşük yükte çalışma zarfı genişletebilmektedir (Guenther, 1989).

Azami güç doğrusu ve azami devir doğrusunun kesiştiği nokta ile azami güç doğrusu ve geniş hava sınırı (veya hava sınırı) eğrisinin kesiştiği nokta arasındaki hat, motorun ulaşabileceği azami gücü göstermektedir; bu güç, “azami sürekli güç (maximum continuous rating-MCR)” olarak adlandırılmaktadır. Azami güç doğrusu ve azami devir doğrusunun kesiştiği nokta, motorun kullanılacağı azami güç ve devir için tasarım noktasıdır; bu noktanın konumu Şekil C.1’de yeşil ile gösterilmiştir. Şekil C.1’de gösterilen çalışma zarfının başlıca belirleyicisi

turboşarjer sisteminin özellikleridir (Woud, 2000). Motor üreticilerinin bir kısmı özellikle askerî uygulamalar için MCR'nin dışına çıkacak şekilde belirli ilave bir güç kullanım imkânı sunmaktadır (MAN ES, 2020).

C.2 Gaz Türbininin Çalışma Zarfı

Gaz türbinlerinin de dizel motorlara benzer çalışma sınırlamaları bulunmaktadır (Stapersma, 2000b). Gaz türbinlerinin her bir devirde üretebilecekleri azami güç sınırı Şekil C.2'de gösterildiği üzere “yakıt sınırı” ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırın oluşturduğu çalışma alanı, dizel motorlara kıyasla daha geniştir; bu geniş alan Şekil C.2'de gösterildiği üzere daha fazla ivmelenme ihtiyatı sağlamaktadır. Yakıt sınırı eğrisi ve azami devir doğrusunun kesiştiği nokta, gaz türbinin kullanılabileceği azami güç ve azami devri belirtmektedir; bu nokta, “azami sürekli güç (MCR) noktası” olarak adlandırılmaktadır. Bu nokta aynı zamanda gaz türbinin tasarım noktasıdır. Bahse konu noktanın konumu Şekil C.2'de yeşil ile gösterilmiştir.



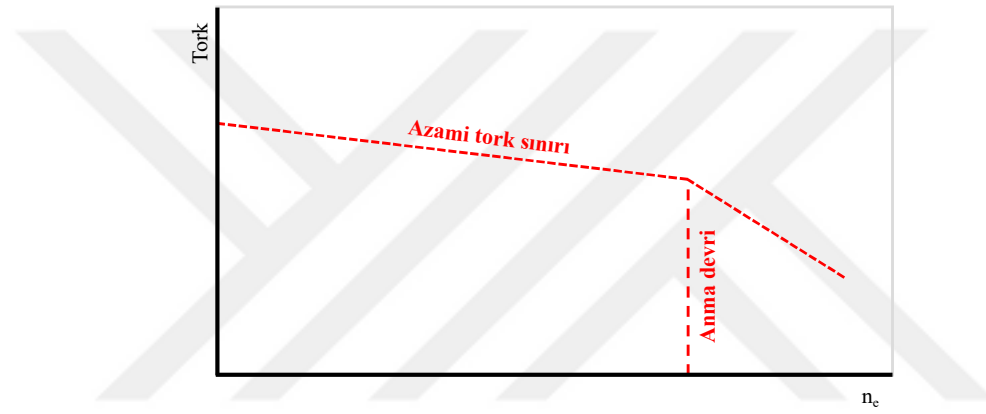
Şekil C.2 Gaz türbininin kuramsal çalışma zarfı [Stapersma (2000b), Woodward ve Andersen (2003) ve Woud ve Stapersma'dan (2003) uyarlanmıştır]

Şekil 3.1'de gösterilen direnç değişimleri benzer şekilde, Şekil 3.4'te gösterilen dönüşüm vasıtasıyla dizel motor ve gaz türbinlerinin çalışma zarflarına yansıtacaktır; direnç artışı olması durumunda pervane eğrisi sol üste doğru, direnç azalması olması durumunda ise sağ alta doğru hareket edecektir (Woud, 2000). Bu hareketler, yukarıda belirtilen çalışma sınırlamalarına kadar yapılabilecek ve

sınırlamalara ulaşıldığında makine kumanda sistemleri tarafından hareketler durdurulacaktır.

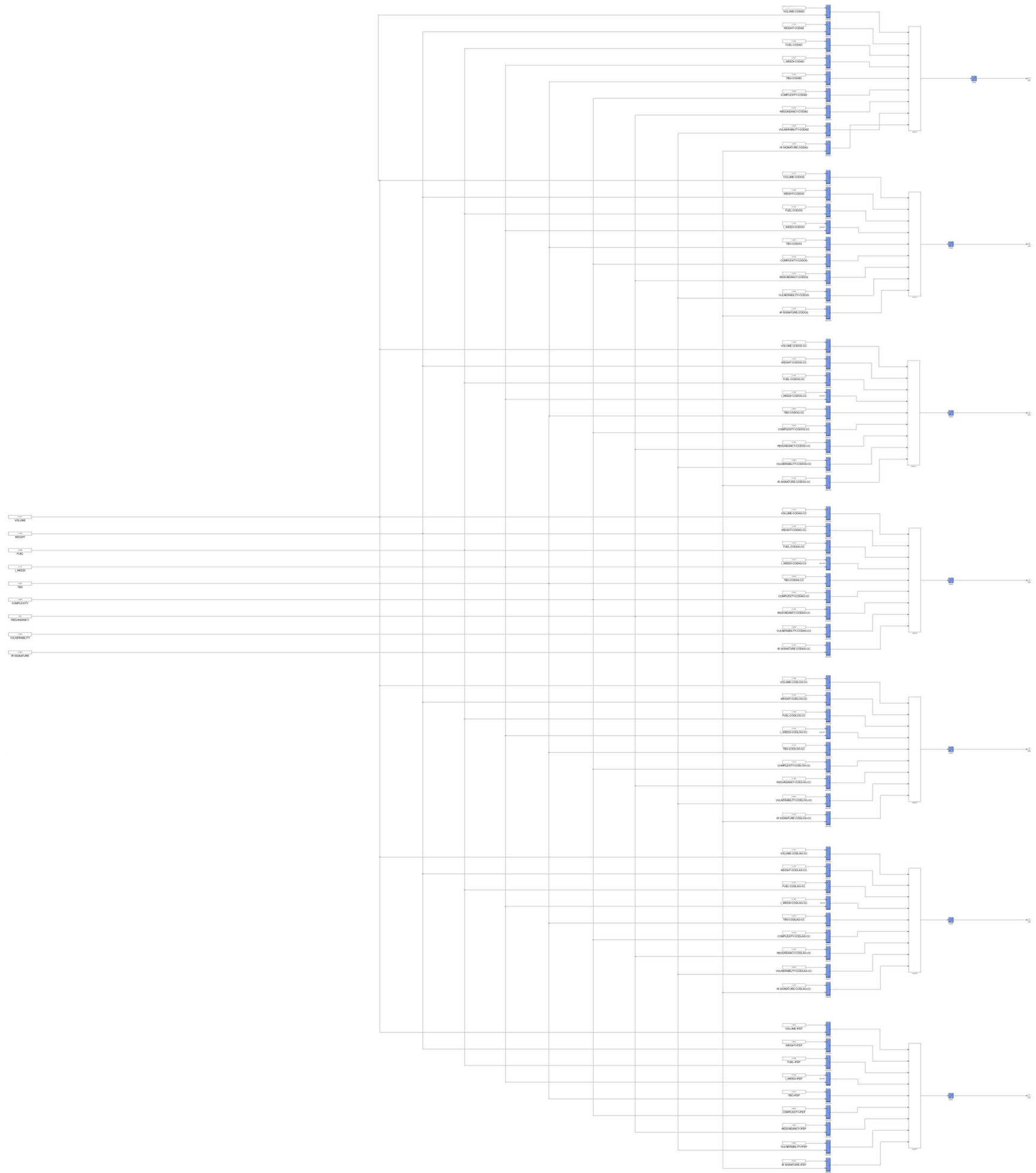
C.3 Sevk Elektrik Motorunun Çalışma Zarfı

Bu tez çalışmasında sevk maksadıyla kullanılabilecek diğer bir makinenin PMSM olduğu İkinci Bölüm’de belirtilmiştir. Bu motorlar geniş çalışma zarfına sahiptir. “0” devirden itibaren azami tork üretebilmektedir. PMSM’ler için örnek bir çalışma zarfı Şekil C.3’te gösterilmiştir. “Anma devri”, motorun etkin olarak kullanılabileceği azami devri belirtmektedir. Her ne kadar motorlar bu devirden sonra çalışabilme imkânına sahip olsalar da tork çıkışı önemli ölçüde azalmaktadır.



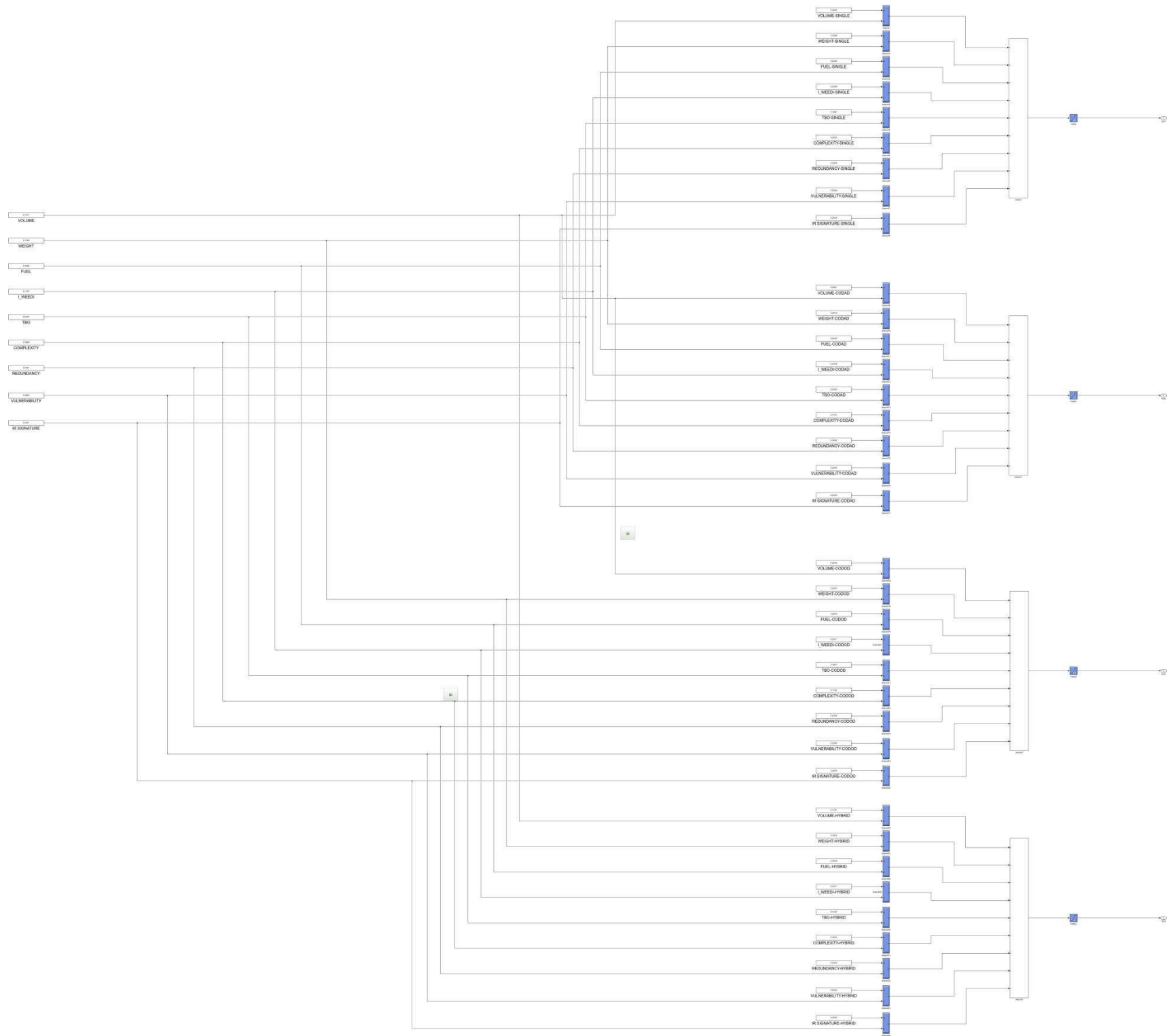
Şekil C.3 PMSM örnek çalışma zarfı [Leonardo DRS'den (2023) uyarlanmıştır]

Ç JENERİK FIRKATEYN İÇİN MATLAB SIMULINK ORTAMINA AKTARILAN YAPAY SİNİR AĞI MİMARİSİ



Şekil Ç.1 Jenerik fırkateyn için MATLAB Simulink ortamına aktarılan yapay sinir ağı mimarisi

JENERİK ADKG İÇİN MATLAB SIMULINK ORTAMINA AKTARILAN YAPAY SİNİR AĞI MİMARİSİ



Şekil D.1 Jenerik ADKG için MATLAB Simulink ortamına aktarılan yapay sinir ağı mimarisi

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

Cin, S. ve Çelebi, U. B. (2021, 16-18 Eylül). *Evaluating the Challenge of Selecting a Propulsion Plant for Surface Vessels at the Conceptual Design Phase*. 2nd International Congress on Ship and Marine Technology (GMO-SHIPMAR), İstanbul, Türkiye.

Makaleler

Cin, S. ve Çelebi, U. B. (2021). An approach for selecting green energy systems for new generation naval vessels. *FEB*, 30(02/A), 1801-1809.

Cin, S. ve Çelebi, U. B. (2024). *Mission profile oriented energy efficiency and CO₂ footprint assessment of naval vessels at conceptual design phase: a comparative case study of conventional and hybrid energy systems*. [Yayımlanmak üzere teslim edilen makale metni]. Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Doktora Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi.