

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GEMİ TURBOŞARJIR SİSTEMİNİN RİSK VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağatay SERÇE

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU

ŞUBAT 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GEMİ TURBOŞARJIR SİSTEMİNİN RİSK VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çağatay SERÇE
(512191017)**

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU

ŞUBAT 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**EVALUATION OF RISK AND ENERGY EFFICIENCY OF MARINE
TURBOCHARGER SYSTEM**

M.Sc. THESIS

**Çağatay SERÇE
(512191017)**

Department of Maritime Transportation Engineering

Maritime Transportation Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU

FEBRUARY 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 512191017 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Çağatay SERÇE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GEMİ TURBOŞARJIR SİSTEMİNİN RİSK VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Burak Zincir**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bora Usluer
Galatasaray Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Şubat 2023
Savunma Tarihi : 24 Şubat 2023





Sevgili eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, enerjinin geri dönüştürülmesi prensibiyle çalışan gemi turboşarjır sistemlerinde meydana gelebilecek arıza ve hataların, bulanık hata ağacı analizi yöntemiyle incelemesi yapılmıştır. Turboşarjır sisteminde oluşabilecek hata ve arızalar engellenerek turboşarjırın düzgün ve verimli çalışması dolayısıyla yakıt tüketiminin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sürecinde değerli görüş ve paylaşımları ile akademik anlamda yolumu aydınlatan, deniz hizmetlerim sırasında benden yardım ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU'na tüm desteklerinden ve sonsuz anlayışından dolayı teşekkür ederim.

Tezin yazımı konusunda beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli dönem arkadaşım Arş. Gör. Gizem ELİDOLU'ya ayrıca desteklerinden ötürü Dr. Bulut Ozan CEYLAN abime içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu tezin yazılmasında desteğini aldığım kıymetli dönem arkadaşlarım U.İ.M. Ali Akman, U.İ.M. Doğanay Alper ELİDOLU, U.İ.M Melih Aykut ÇITAK., U.İ.M. İdris ÜN, U.İ.M. Murat TELCİ ve U.İ.M. Ozan KÜÇÜKERBİL ile değerli büyüğüm Başmühendis Aytaç KARDAŞ'a teşekkür etmeyi borç bilirim.

Ayrıca beni her koşulda destekleyen ve bana olan inancını kaybetmeyen kıymetli eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2023

Çağatay Serçe
Uzakyol İkinci Mühendis



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Gemilerde Enerji Verimliliği	4
1.3 Literatür Taraması	6
2. GEMİLERDE KULLANILAN TURBOŞARJIR SİSTEMLERİ	9
2.1 Dört Stroklu Dizel Makineler	13
2.2 İki Stroklu Dizel Makineler.....	16
3. HATA AĞACI ANALİZİ VE BULANIK MANTIK.....	23
3.1 Hata Ağacı Analizi (FTA)	25
3.1.1 Boolean matematiği	28
3.1.2 Hata ağacı analizinin uygulanması	30
3.2 Bulanık Mantık Kümesi Teorisi (Fuzzy Logic Set Theory)	33
3.3 Hassasiyet Analizi	37
3.4 Uzman Değerlendirmesi.....	37
3.4.1 Elde edilen olasılıkların birleştirilmesi	38
3.4.2 Birleştirilmiş uzman kararlarının durulaştırılması	40
3.4.3 Minimum kesim kümelerinin (MCS) öneminin hesaplanması	40
4. GEMİ TURBOŞARJIR SİSTEMİ ARIZALARININ BULANIK MANTIK HATA AĞACI METODU İLE ANALİZİ.....	43
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
KAYNAKÇA	59
ÖZGEÇMİŞ.....	65



KISALTMALAR

BE	: Temel Olay
CO₂	: Karbondioksit
ECA	: Emisyon Kontrol Alanı
EEDI	: Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi
EEOI	: Enerji Verimliliği İşletme Endeksi
FFTA	: Bulanık Hata Ağacı Analizi
GHG	: Sera Gazları
IE	: Ara Olay
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
MEPC	: Deniz Çevresini Koruma Komitesi
NO_x	: Azot Oksit Bileşikleri
PM	: Partikül Madde
PMS	: Planlı Bakım Tutum Sistemi
RBM	: Risk Bazlı Bakım Tutum
SEEMP	: Gemi Enerji Verimliliği Yönetme Planı
SFOC	: Özgül Yakıt Tüketimi
SO_x	: Sülfür Oksit Bileşikleri
TE	: Tepe Olay



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Gemi turboşarjır sistemi ve temel bileşenleri.....	12
Çizelge 3.1 : Boolean matematiği sembollerinin farklı disiplinlerdeki karşılıkları.	30
Çizelge 3.2 : Olasılıklar için kullanılan sözel terimler ve yamuk bulanık sayılarla ifadeleri.....	39
Çizelge 4.1 : Hata ağacı modelindeki olayların harf kodları ile listesi.....	47
Çizelge 4.1 (devam) : Hata ağacı modelindeki olayların harf kodları ile listesi.....	48
Çizelge 4.2 : Temel olayların ihtimalleri için yapılan uzman değerlendirmeleri.	49
Çizelge 4.3 : Uzmanların karakteristik özelliklerine göre ağırlık faktörleri.....	50
Çizelge 4.4 : Çalışmaya katılan uzmanların karakteristik özellikleri ve ağırlık faktörleri.	50
Çizelge 4.5 : BE01 için bulunan uzmanlara ait AA, RA ve CC değerleri.....	51
Çizelge 4.6 : Minimum kesim kümelerine ait olasılık ve V-FIM değerleri.	52



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Gemi turboşarjır sistemi ve temel bileşenleri.....	12
Şekil 2.2: 6 silindirli bir dizel makinenin 3'lü gruplandırılmış egzoz manifoldu ve turboşarjır.	13
Şekil 2.3: 4 Stroklu, orta devirli ve turboşarjırlı bir dizel makinesinin enine kesiti..	15
Şekil 2.4: İki stroklu, ağır devirli ve turboşarjırlı bir dizel makinesinin enine kesiti.	18
Şekil 2.5: Ana makine sayılarına göre iki ve dört stroklu makinelere sahip gemilerin yük tipine göre dağılımları.	19
Şekil 2.6: Ana makine çıkış güçlerine göre iki ve dört stroklu makinelere sahip gemilerin yük tipine göre dağılımları.	19
Şekil 2.7: İki stroklu, doğru akım süpürmeli bir gemi ana makinesinin timing diyagramı.	20
Şekil 2.8: Dört stroklu bir gemi ana makinesinin timing diyagramı.	21
Şekil 3.1: Temel risk analizi teknikleri.....	24
Şekil 3.2: Hata ağacı modelinde olayları temsil eden semboller.....	26
Şekil 3.3: Hata ağacı modelinde kapıları temsil eden semboller.....	27
Şekil 3.4: Örnek bir hata ağacı modeli.	32
Şekil 3.5: Üyelik fonksiyonunun hata olasılığının yamuk ile gösterilmesi.	34
Şekil 3.6: L-R tipi yamuk ve bulanık sayılar (a , b , α , β).	39
Şekil 3.7: Sözel değişkenleri temsil eden bulanık sayıların üyelik fonksiyonları grafiği.	40
Şekil 4.1: Bulanık hata ağacı analizi için temsili bir yöntem haritası.	44
Şekil 4.2: Gemi turboşarjır sistemi hata ağacı analizi modeli.	46



GEMİ TURBOŞARJIR SİSTEMİNİN RİSK VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Dünya tarihinde, sanayi devrimi sonrası yaşanan gelişmelerle birlikte taşımacılığa olan talep artmıştır. Özellikle geçtiğimiz on yıllarda yaşanan büyük teknolojik gelişmeler, toplumsal refah seviyelerini yükselttiği gibi ihtiyaçların da artmasına neden olmuştur. İhtiyaçlar arttıkça hammadde çıkarılması, üretim ve tüketim oranlarında bir anda çok yüksek artış gerçekleşmiştir. Bu da aynı zamanda taşımacılığa ve özellikle deniz taşımacılığına olan talebin artması anlamına gelmektedir. Ticari gemiler, başlangıçta buhar ve gaz tahrik sistemli makineler kullanırken bu durum zamanla dizel makinelerin kullanılmasına dönüşmüştür. Ancak bu makinelerde kullanılan yakıtlar genellikle atmosfere zarar veren gazların salınmasına neden olan ve zararlı maddeler içeren fosil yakıtlar olmaktadır.

Deniz taşımacılığına olan talebin zamanla daha da artacağı öngörülmektedir ve böylece bu düşük kaliteli yakıtların yakılmasında da artış kaçınılmaz olacaktır. Bu durumun özellikle kıyı ve liman bölgeleri başta olmak üzere dünya çapında hava kirliliğine neden olacağı düşünülmektedir. Egzoz gazının içerisinde bulunan ve atmosfere zarar veren başlıca bileşikler SO_x , NO_x ve PM ile sera gazları kombinasyonu olan CO_2 , CH_4 ve N_2O olarak bilinmektedir. Sera etkisi yaratan bu gazların atmosfere verdiği zararlar son yıllarda artan hava kirliliği nedeniyle sıklıkla gündeme gelmektedir. Sera gazlarının; küresel iklim değişikliği, atmosferde ısı tutma etkisi gibi olumsuz etkilerinin bilinmesinin yanı sıra insan sağlığına zararlı etkileri olduğuna dair çok sayıda çalışma mevcuttur.

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve onun alt komiteleri, gemilerden kaynaklanan kirliliği azaltmak için MARPOL 73/78 Sözleşmesi (Gemilerden Kaynaklanan Kirliliği Engellemeye Yönelik Uluslararası Sözleşme) ve onun içeriğinde bulunan hava kirliliğini engellemeye yönelik kuralları içeren Ek IV'ü kabul etmiş ve yürürlüğe sokmuştur. Bu kurallar başta kullanılan yakıt cinslerini, sülfür oranı gibi içeriklerinin kontrol altına alınmasını ve belirli bölgelerde kullanılmasının sınırlandırılması gibi önlemleri içermektedir. Ancak IMO'nun 2020,2030 ve 2050 yılları için koyduğu hedefler, eş zamanlı olarak çok sayıda önlem alınması stratejisinin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu stratejinin en önemli elemanlarından biri de enerji verimliliğinin geliştirilmesidir.

İçten yanmalı makinelerin özgül yakıt tüketimi (SFOC), egzoz salınımlarıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu durumda enerji verimliliği artırılarak özgül yakıt tüketimi ve dolayısıyla egzoz salınımları azaltılabilecektir. IMO'nun deniz çevresini korumaktan sorumlu alt komitesi tarafından; Enerji Verimliliği Dizayn Endeksi

(EEDI), Gemilerin Enerji Verimliliğini Yönetme Planı (SEEMP) ve Enerji Verimliliği İşletme Endeksi (EEOI) gibi uygulamalar geliştirilmiştir. Bu uygulamalar, bir geminin enerji verimliliğini artırarak daha az kirletici olmasını amaçlamaktadır. Mevcut gemiler ve yeni inşa edilecek gemiler için dizayn aşamasından işletme aşamasına kadar enerji verimliliğini arttırmaya yönelik yaklaşım sunulmasını sağlayan bu uygulamalar ile yakıt tüketimin azaltılması ve takip edilmesini sağlayan araçlar geliştirilmektedir.

Turboşarjır sistemi, egzoz gazının atık enerjisini kullanarak dışarıdan başka hiçbir enerji almadan süpürme ve yanma havasının silindirlere basılmasını sağlamaktadır. Dizel makinesinin silindirleri içinde yanma sonucu oluşan egzoz gazları, egzoz manifoldu ve boruları ile turboşarjır sistemine iletilmektedir. Egzoz gazları üzerindeki enerji ile tahrik edilen türbin kanatları dönerek bağlı bulunduğu mili de döndürmektedir. Aynı mil üzerinde bulunan kompresör (blower) kanatları da bu etkiyle dönerek, dışarıdan yanma için gerekli olan havayı turboşarjır sistemine emerek silindirlere basılmasını sağlamaktadır. Enerjinin geri dönüştürülmesi prensibinden yararlanarak makine verimi arttıran turboşarjır aynı zamanda hava-yakıt oranındaki havanın ağırlığını yükselterek yanmanın verimini arttırmada da büyük bir rol oynamaktadır.

Enerji verimliliğinin optimum seviyelerde sürekli olabilmesi, turboşarjır sisteminin optimum çalışmasına doğrudan bağlı olacaktır. Bu nedenle turboşarjır sisteminde oluşacak herhangi bir hata veya sorun istenmemektedir.

Bu tez çalışması kapsamında gemi turboşarjır sisteminin optimum çalışmasını engelleyecek olan risklerin değerlendirilmesi ve önleyici çalışmaların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu risklerin en doğru ve güvenilir şekilde belirlenebilmesi için Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) yöntemi kullanılmıştır. Gemi makineleri işletme ve operasyonu konusunda hem deniz hem de kara tecrübesi olan uzman mühendisler ile yürütülen çalışmalar sonucunda, turboşarjır sisteminde bir hata veya sorunun gerçekleşmesine neden olabilecek 33 olay belirlenmiştir. Bu olaylar, tepe olay olarak belirlenmiş olan turboşarjır sisteminde hata veya sorunna neden olabilecek temel olaylardır. Temel olaylar dışında tepe olayın gerçekleşmesine doğrudan etkisi olmayan 12 ara olay da hata ağacı analizi için belirlenmiştir. Böylece 33 temel olay, 12 ara olay ve 1 tepe olay ile bunların arasındaki ilişkilerin 'VEYA' kapılarıyla gösterildiği hata ağacı modeli kurulmuştur. Seçilen uzmanların, eğitim durumları, kara ve deniz tecrübeleri gibi karakteristik özellikleri göz önüne alınarak ağırlıklı değerlendirme dereceleri belirlenmiştir. Uzmanlardan alınan sözel değerlendirmeler ile hata ağacına ait veriler elde edildikten sonra uzmanların ağırlık puan hesabı da yapılarak bulanık yamuk sayıları olarak toplanan veriler birleştirilmiştir. Bir sonraki adımda belirsiz değerler olarak görülen bu bulanık sayılar durulaştırılarak kesin sayısal değerler elde edilmiştir. Böylece temel olayların olasılık değerleri elde edilmiş olur. Daha sonra tepe olaya götüren en yüksek olasılıklı yolu belirlemek için kesim kümelerinin önemini ölçme işlemi 'Vesely-Fussel Importance Measure (V-FIM)' uygulanmıştır. Son olarak, bulunan bütün değerler hata ağacı modelindeki mantık kapılarına göre tekrar hesaplanmıştır. Sonuç olarak hem tepe olayın oluşma ihtimali hem de temel olayların oluşma ihtimalleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elde edilen analiz verilerine göre, tepe olayın oluşmasına neden olabilecek temel olaylar, gerçekleşme ihtimallerine göre sıralanarak; bu olasılığı 0,02'den yüksek olan temel olaylar belirlenmiştir. Bu 5 temel olay için önleyici ve düzeltici çalışmalar belirlenmiş ve gerekli önermeler yapılmıştır.

FFTA uygulaması sonucunda bu 33 temel olayın, turboşarjır sorununa neden olma olasılıkları belirlenmiş ve gerçekleşme ihtimali en yüksek olan beş temel olay için önleyici ve düzeltici çalışmalar üzerinde durulmuştur. Bu çalışmalar; PMS sisteminde yapılacak düzenlemeler, personel eğitim programlarının geliştirilmesi, personel eğitimlerinin tazeleme periyodlarının sıklaştırılması, tool-box toplantılarının etkili bir şekilde yapılması ve personelde genel bir emniyet bilincinin oluşturulması gibi önermeler içermektedir.

Yapılan bu çalışma ile bir gemi turboşarjır sisteminin optimum çalışmasını engelleyebilecek riskler belirlenmiş, sıralanmış ve karşı tedbirler önerilmiştir. Böylece gemi turboşarjır sisteminin daha verimli çalışması ile enerji verimliliğinin artırılması ve gemilerden kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması konusunda bir yöntem geliştirilmesi ve farkındalık yaratılması amaçlanmıştır.





EVALUATION OF RISK AND ENERGY EFFICIENCY OF MARINE TURBOCHARGER SYSTEM

SUMMARY

In world history, the demand for transportation has increased with the developments after the industrial revolution. Especially the great technological developments in the past decades have increased the social welfare levels as well as increased needs. As the needs increased, there was a sudden increase in raw material extraction, production and consumption rates. At the same time, this means an increase in the demand for transportation and especially maritime transportation. Commercial ships originally had steam and gas propulsion systems and this has evolved over time to the use of diesel engines. However, most of the fuels used in these engines are fossil fuels, which result in the release of waste gases that pollute the atmosphere and contain potentially harmful chemicals.

It is expected that the demand for maritime transportation will increase over time, causing an increase in the consumption of these low-quality fuels will be inevitable. It is thought that this situation will cause global air pollution, especially in coastal and port areas. The main compounds in exhaust gas that harm the environment are known as SO_x , NO_x , and PM, as well as CH_4 and N_2O , which are a combination of greenhouse gases. The damage caused by these greenhouse gases to the atmosphere is frequently on the agenda due to the increasing air pollution in recent years. In addition to knowing the negative effects of greenhouse gases such as global climate change and the effect of heat retention in the atmosphere, many studies are showing that it has harmful effects on human health.

The International Maritime Organization (IMO) and its subcommittees have adopted and implemented Annex IV, which includes the MARPOL 73/78 Convention (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) and the rules for preventing air pollution contained therein, to reduce pollution from ships. These rules include measures such as types of fuel used, controlling their content such as sulfur content and limiting their use in specific regions. However, the IMO targets for the years 2020, 2030 and 2050 have enabled the development of a variety of actions that can be taken concurrently. Improving energy efficiency is one of the most important aspects of this strategy. The Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) of internal combustion engines varies in direct proportion to the exhaust emission. In this case, increasing energy efficiency means reducing specific fuel consumption and therefore exhaust emissions. By the IMO's subcommittee responsible for protecting the marine environment; Applications such as the Energy Efficiency Design Index (EEDI), the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) and the Energy Efficiency

Operational Index (EEOI) have been developed. These applications aim to increase the energy efficiency of a ship and make it less polluting.

With these applications, which provide an approach to increase energy efficiency from the design stage to the operation stage for existing ships and newly built ships, tools are developed to reduce and monitor fuel consumption.

The turbocharger system uses the waste energy of the exhaust gas and ensures that the scavenging and combustion air is pressed into the cylinders without any other energy from outside. Exhaust gases produced as a result of combustion in the row machine's cylinders are funnelled to the turbocharger system through the exhaust manifold and pipes. The turbine blades, driven by the energy in the exhaust gases, turn and rotate the shaft to which they are attached. Compressor (blower) blades on the same shaft rotate with this effect, absorbing the air required for combustion from the outside into the turbocharger system and allowing it to be pressed into the cylinders. The turbocharger, which increases the efficiency of the machine by utilizing the energy recycling principle, also plays a major role in increasing the efficiency of combustion by increasing the weight of the air in the air-fuel ratio. The continuity of energy efficiency at optimum levels will directly depend on the optimum operation of the turbocharger system. Therefore, any fault or incident in the turbocharger system is not desired.

Within the scope of this thesis, it is aimed to evaluate the risks that will prevent the optimum operation of the ship turbocharger system and to develop preventive studies. Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) method was used to determine these most accurately and reliably. As a result of the study, which was performed with expert engineers who have both onboard and shore experience in the operation and maintenance of ship machinery, 33 Basic Events (BE) that may cause turbocharger faults or incidents. These are the main events determined as Top Event (TE), which can cause faults or incidents in the turbocharger system. Except for the basic events, 12 Intermediate Events (IE) that do not have a direct effect on the occurrence of the peak event were also determined for the fault tree analysis. As a result, the fault tree model was developed which illustrates the relationships between 33 basic events and 11 intermediate events, and 1 top event employing 'OR' gates. Weighting factors were determined by considering the characteristics of the selected experts, such as their educational background, and onboard and shore experiences. After obtaining the data of the fault tree with the linguistic evaluations taken from the experts, the weighting factor calculation of the experts was also performed and the data collected as fuzzy trapezoidal numbers were combined. In the next step, these fuzzy numbers, which are seen as uncertain values, are clarified and precise numerical values are obtained. Thus, the probability values of the basic events were obtained. The Vesely-Fussel Importance Measure (V-FIM) was then applied to measure the importance of cut sets to determine the most probable path leading to the top event.

Finally, all values studied were recalculated by using logic gates in the fault tree model. As a result, both the probability of occurrence of the top event and the probability of occurrence of the basic events are calculated separately. According to the analysis data obtained, the main events that may cause the top event to occur are listed according to their probability of occurrence; key events with this probability greater than 0,02 were identified. Preventive and corrective studies were conducted for these 5 basic events and necessary recommendations were made.

As a result of the FFTA application, the probabilities of these 33 basic events to cause turbocharger troubles were determined, and preventive and corrective studies were emphasized for the five main events with the highest probability of occurrence.

These studies; the commitments to be made in the Planned Maintenance System (PMS) include suggestions such as the development of personnel training programs, increasing the refresher periods of personnel training, and conducting tool-box meetings effectively creating general safety awareness among personnel.

In this study, the risks that may prevent the optimum operation of a marine turbocharger system are determined, and listed and preventive measures are recommended. As a result, it is aimed to develop a method and raise awareness about more efficient operation of the marine turbocharger system, increasing the energy efficiency and reducing the environmental pollution caused by ships.



1. GİRİŞ

Çok uzun bir geçmişe sahip olan denizcilik 5000 yıldır dünya ekonomisine hizmet etmektedir (Stopford, 2008). İnsanların en temel ihtiyaçlarından bazıları taşımacılık ve ticaret olduğu için tarih boyunca kurulan ve gelişen uygarlıkların su kenarlarını ve su yollarını tercih ettikleri görülmektedir. Başlangıçta ilkel koşullarda insan, akıntı ve rüzgâr gücüyle ilerleyen deniz taşıtlarında özellikle sanayi devrimi ve sonrasındaki teknolojik gelişmeler sayesinde; kömür, petrol ve diğer yakıtlar gemilerde kullanılmaya başlanmıştır. Böylece buhar türbinli gemiler ortaya çıkmış ve dünya deniz taşımacılığının geleceği tamamen değişmiştir. Ancak buharlı gemilerin hem inşa hem de bakım maliyetlerinin çok yüksek olması, tonajlarının düşük olması ve yakıt ikmalindeki zorluklar gibi nedenlerle deniz taşımacılığına entegresi gecikmeli olmuştur (Özdemir, 2018). Daha sonra içten yanmalı makinelerin, soğutma sistemlerinin geliştirilmesi ve özellikle verimlerinin artırılması için yapılan çalışmalar sayesinde hem buharlı makinelerin hem de günümüz modern dizel makinelerinin deniz taşımacılığında yaygın olarak kullanılmasını sağlanmıştır.

Günümüzde bütün dünyada pek çok farklı sektörde olduğu gibi deniz taşımacılığında da fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz vb.) ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. Deniz taşımacılığında 2020 yılına kadar en çok talep gören yakıtlar; deniz tipi ağır yakıtlar (HSFO) ile deniz tipi dizel yakıtlar (MDO) gibi fosil yakıtlar olduğu bilinmektedir (IEA OIMD, 2019). Bu düşük kaliteli yakıtlar, ekonomik nedenlerle kullanılmaya devam edilmektedir ancak bu durumun özellikle kıyı ve liman bölgelerinin yakınında ve dünya çapında hava kirliliğine ve hava kalitesinin bozulmasına önemli ölçüde sebep olduğu düşünülmektedir (Eyring ve diğ., 2010). Deniz yakıtlarının içinde başta sülfür (S) olmak üzere birçok kimyasal element ve silikon (Si), nikel (Ni), demir (Fe), kurşun (Pb), alüminyum (Al), kalsiyum (Ca) ve vanadyum (V) gibi eser metaller bulunmaktadır. Bu nedenle deniz yakıtlarının yakılması sonucunda sülfat, organik karbon (OC), elemental veya siyah karbon (EC/BC), kül ve ağır metaller gibi parçacıklar yayılmaktadır (Anderson ve Bows, 2014). Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) bir parçası olan Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (IARC), ayrıntılı

incelemelere dayanarak dizel motorlardan salınan egzoz gazını insan sağlığı için kanserojen bir madde olarak sınıflandırmaktadır (IMO, 2019). Birleşmiş Milletler (BM)'e bağlı olarak çalışan Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve onun alt komiteleri; uluslararası deniz taşımacılığının emniyetli ve güvenli olmasının sağlanması ve gemilerden kaynaklı çevre kirliliğinin engellenmesinden sorumlu olan özel nitelikli bir ajanstır. Gemilerden kaynaklanan sülfür oksit (SO_x) salınımlarını azaltmaya yönelik, IMO düzenlemeleri; MARPOL 73/78 Sözleşmesi (Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme) bünyesinde, gemilerden kaynaklanan hava kirliliğinin önlenmesi için belirlenen kurallar, Ek VI olarak 1997 yılında kabul edilmiş ve 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir. MARPOL Ek VI ile denizcilikte büyük değişiklikler yapılarak öncelikle bazı salınım kontrol alanları (ECA) belirlenmiş ve bu deniz alanları başta olmak üzere bütün dünya deniz ve okyanuslarında kademeli bir şekilde; SO_x , NO_x ve partikül madde (PM) salınımlarında kademeli bir azalma planlanmıştır. Yine MARPOL Ek VI kapsamında 1 Ocak 2020 itibariyle, bütün dünya genelinde; gemilerde kullanılabilecek yakıtların sülfür oranı mevcut %3,50 değerinden %0,50 değerine düşürülmüştür. 2012 yılında denizcilik kaynaklı gaz salınımları; 938 milyon ton CO_2 ve toplam miktarı 961 milyon ton olan; CO_2 , CH_4 ve N_2O sera gazları kombinasyonundan oluşmuştur. Bu salınım miktarı; insan kaynaklı, toplam küresel salınım miktarının %2,2'sine karşılık gelmektedir (Smith ve diğ., 2014). IMO bu düzenlemeler sayesinde gemilerden kaynaklı sülfür salınımının, 2020-2024 yılları arasında; yıllık olarak %77 oranında düşürüleceğini öngörmektedir. Bu da 8,5 milyon metrik ton daha az SO_x salınımı anlamına gelmektedir (IMO, 2020). Ayrıca Finlandiya Meteoroloji Enstitüsü tarafından yapılan bir çalışmada, IMO'nun %0,50 sülfür kısıtlamasının 2020 yerine 2025'e ertelenmesi durumunda, ek olarak 570.000'den fazla prematüre bebek ölümü gerçekleşebileceği belirtilmiştir (Corbett ve diğ., 2016). IMO sera gazı salınımlarını azaltmak için geliştirdiği bu strateji sayesinde; uzun vadede tamamen ortadan kaldırmayı planladığı sera gazı salınımı oranlarını, 2008 yılını baz alarak 2050 yılında en az yarıya indirmeyi, ortalama karbon yoğunluğunu (ton-mil için CO_2) ise 2030 yılına kadar en az %40'a ve 2050 yılından önce %70'e kadar düşürmeyi hedeflemektedir (Serra ve Fancello, 2020).

İçten yanmalı makinelerin gerçek çevrimleri, çalışma parametreleri olan; dolgu, sıkıştırma, genişleme, ortalama indike basınç ve özgül yakıt tüketimleri (SFOC)

yönünden hesaplanabilmektedir. Özgöl yakıt tüketimi doğrudan salınımla ilgili olduğu için egzoz gazı salınımlarını denetlemenin, yakılan yakıtın türü ve kimyasal özellikleri dışında en uygulanabilir yöntemi de makine verimi optimizasyonu olacaktır. Bu nedenle bir yanda IMO diğer yanda gemi operatörleri hem maddi sebeplerle hem de çevresel koşullardan enerji verimliliği konusunda farklı yöntem ve uygulama arayışlarına girmişlerdir. 15 Temmuz 2011 tarihinde IMO'nun deniz çevresini korumaktan sorumlu alt komitesi (MEPC); yeni inşa edilecek gemiler için, Enerji Verimliliği Dizayn Endeksi'ni (EEDI) ve diğer bütün gemiler için, Gemilerin Enerji Verimliliğini Yönetme Planı'nı (SEEMP) yürürlüğe koymuştur (MEPC, 2011). Yeni inşa edilecek gemiler için uygulanan en önemli teknik ölçüm olan EEDI aynı zamanda daha verimli olan, daha az kirletici ekipman ve makinelerin kullanılmasını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. SEEMP; hem bir geminin enerji verimliliğini, uygun maliyetlerde iyileştirilebilen operasyonel bir mekanizmadır aynı zamanda da denizcilik firmalarına gemi ve filo verimlilik performanslarını yönetmek için bir yaklaşım sunmaktadır. Örneğin; Enerji Verimliliği İşletme Endeksi (EEOI), yeni inşa ve mevcut gemilerin işletmecileri için oluşturulmuş, yakıt tüketimi ve verimliliği izleme aracı olarak kullanılmaktadır (MEPC, 2009).

Bir geminin enerji verimliliği; bir dizel motorun birkaç alt sisteminin verimliliğine bağlı olduğu bilinmektedir. Şarj havası veya süpürme havası sistemi de aynı zamanda yanma için gerekli olan havayı sağladığı için gemi makinelerinin en önemli alt sistemlerinden biri olarak nitelendirilmektedir.

Dizel motorunun verimliliği ve çevre üzerindeki etkisi yanmadaki hava-yakıt oranına bağlı olmaktadır. Turboşarjır (aşırı doldurma veya süperşarj) sistemi de silindirlere büyük miktarda sıkıştırılmış havanın doldurulmasını sağlayarak hava-yakıt oranını önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu araştırmada turboşarjır sistemlerinin arıza ve sorunlara bağlı olarak makine verimine etkileri Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) yöntemi ile incelenerek arıza ve sorun riski olan parametrelere çözümler üretilerek düzeltilmesi ve önlenmesi amaçlanmaktadır. Denizcilik sektöründe özellikle makine dairesi operasyonlarıyla ilgili güvenilir verilere ulaşmak ticari kaygılar sebebiyle oldukça zor olabilmektedir. Bu nedenle alanında uzman kişilerden alınan görüşler üzerine kurulan araştırma çalışmaları daha uygulanabilir olmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu araştırmada turboşarjör sistemlerinin arıza ve sorunları Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) yöntemiyle incelenerek, elde edilen sonuçlar sayesinde olası arıza ve sorunların düzeltilmesi ve önlenmesi amaçlanmaktadır. Böylece enerji verimliliğinin artırılması ve gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının bu sayede azaltılması ile dekarbonizasyon yapılması amaçlanmaktadır. Ayrıca FFTA risk değerlendirme metodu sayesinde olası arızaların oluşma ihtimalleri ağırlıklı olarak hesaplanarak kestirimci bakım-tutum faaliyetlerinin geliştirilmesine katkıda bulunması hedeflenmektedir.

1.2 Gemilerde Enerji Verimliliği

Küresel ısınma ilk olarak 1896'da İsveçli kimyager Svante Arrhenius tarafından tahmin edilmiştir ve bilim insanları, politikacılar ve çevre uzmanları arasında hararetle tartışılan bir konu haline gelmiştir. Küresel ısınma ve etkileri; yavaş ilerleyen ve kademeli bir süreç olabilir ancak deniz seviyelerinin yükselmesi, mahsul kıtlığı ve yokluk, bitki ve hayvan popülasyonlarında değişiklikler ve insan sağlığına ciddi olumsuz etkileri ile uzun vadede yıkıcı sonuçlara neden olabileceği düşünülmektedir (Khasnis ve Nettleman, 2005). Günümüzde çevre kirliliği, toplumumuzun temel kaygılarından biridir ve çevresel riskin en iyi bilinen nedenlerinden biri sera gazı (GHG) emisyonları ve özellikle CO₂ gazı salınımı olarak bilinmektedir. CO₂ gazı; en yaygın olarak, yanma reaksiyonlarının bir yan ürünü şeklinde ortaya çıkmaktadır ve günümüzde çoğu ulaşım sisteminde içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. Buna denizcilik sektörü de dahildir. Uluslararası deniz ticareti; metrik ton (MT) cinsinden küresel ticaretin yaklaşık %78'ini oluştururken, bu sektörden kaynaklanan emisyonlar Uluslararası ticaretteki küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %2,4'üne karşılık gelmektedir. Bu oran az gibi görünse de eğer hiçbir şey yapılmazsa, daha büyük bir nüfus ve artan yüksek refah talepleri nedeniyle sektör büyüdükçe bu emisyonlar da artmaya devam edeceği düşünülmektedir. 2012 yılından 2050'ye kadar artması öngörülen bu talepler denizcilikten kaynaklanacak CO₂ emisyonunda tahminen %50 ile %250 arasında bir artışa sebep olabileceği öngörülmektedir (Hüffmeier ve Johanson, 2021).

Deniz taşımacılığında kaynaklanan hava kirliliğinin hem çevreye hem de insan sağlığına olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Kullanılan yakıtın cinsi, makine tipi, makine özellikleri ve makinenin enerji verimliliği hava kirliliğini etkileyen faktörlerden bazılarıdır. Sera etkisine neden olan sera gazlarının (GHG) ve diğer konvansiyonel kirleticilerin birincil kaynağı, içten yanmalı makinelerde kullanılan yakıtların yakılmasıdır. Küresel antropojenik hava kirliliği; deniz taşımacılığında kaynaklanan CO₂, CH₄ ve N₂O içeren sera gazı emisyonlarından önemli ölçüde etkilenmektedir (Issa vd., 2022).

Geçtiğimiz yıllarda IMO, gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmak stratejisini benimseyerek çeşitli kararlar almıştır. 2018’de alınan en son kararlar uluslararası deniz taşımacılığında kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarının 2008 yılı seviyelerine kıyasla 2050 yılına kadar %50 oranında azaltmak amacıyla bir strateji oluşturulmuştur (MEPC.304(72), 2018). SEEMP ve EEDI da yine IMO tarafından geliştirilen ve aynı amaca hizmet eden uygulamalardır.

Bütün bu çevresel kaygılar doğrultusunda, IMO 2050 hedeflerine uyum sağlayabilmek için denizcilik çevrelerinde bazı arayışlara gidilmiş ve bunun sonucunda çeşitli yöntem ve uygulamalar ortaya çıkmıştır. GHG emisyonlarının azaltılmasına ilişkin pek çok çalışma vardır ve bunların bazıları alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelirken bazıları da dekarbonizasyon yöntemini benimsemiştir. Bunlardan biri olan Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) alternatif bir enerji kaynağı olarak kabul edilebilir. LNG hem gaz salınımının azaltılması hem de makine performansının artması gibi faydalara sahipken metan kayması gibi etkiler bu faydaları azaltmaktadır. Biyoyakıtlar, karbon yakalama ve depolama, nükleer enerji ve hidrojen gibi yenilikçi yaklaşımlar endüstriyi karbondan arındırma potansiyeline sahiptir. Yine de LNG örneğinde olduğu gibi her birinin önemli kaynak bulma, Teknik, ekonomik ve sosyal kabul edilebilirlik gibi kısıtlamaları vardır (Balcombe ve diğ., 2019). Ayrıca gövdeye veya pervaneye yapılacak modifikasyonlar ile karina, kinistin ızgara temizliği gibi verimlilik arttırıcı operasyonların da yakıt tüketimini azaltabileceği düşünülmektedir.

Denizcilik sektörünün neden olduğu karbon salınımını düşürebilmek için çok sayıda konu veya problem üzerinde durulmalıdır. Sonuç olarak tek bir değişken değiştirilerek sonuca ulaşmak yerine aynı zamanda pek çok değişken üzerine önlemler alınarak enerji verimliliğini arttırmak ve çevreye olan olumsuz etkileri engellemek mümkün olabilecektir. IMO 2050 hedeflerine kadar geçecek sürede deniz taşımacılığına olan

talebin de yüksek oranda artması beklenmektedir (Energy Transitions Commission, 2020). Shell ve Deloitte'in bu konuda yaptıkları pazar araştırmalarında, denizcilik sektöru temsilcilerinden aldıkları yanıtlara göre yanıt verenlerin %90'ından fazlası dekarbonizasyonun, şirketleri için temel veya en öncelikli konu olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmaya katılanların %80'ine göre dekarbonizasyonun öneminin son 18 ayda büyük ölçüde artmış olduğu düşünölmektedir (Shell, 2020).

Denizcilik sektörünün küresel sera gazı emisyonlarına katkısının %3 olduğu göz önüne alındığında, kapsamlı bir dekarbonizasyon sağlayabilmek için hem küresel hem de bölgesel düzeyde, bütçesel anlamda da güçlü önlemler alınması gerekecektir. Bu dekarbonizasyonun sağlanabilmesi için alınan önlemler ve yapılan uygulamalar; alternatif yakıtların kullanılmasının yanı sıra, teknik ve operasyonel olmak üzere üç temel başlık altında toplanabilir:

- Teknik Önlemler: Hafif malzemeler, ince tasarım, sürtünmenin azaltılması, atık ısı ve enerjinin geri kazanılması, yalıtım ile ısı korunması gibi önlemlerle sınırlı kalmamak üzere teknolojik uygulamaların yapılması olacaktır.
- Operasyonel Önlemler: Geminin hızı, geminin boyutları, gemi-liman operasyon süreci, karadan güç desteği gibi uygulamalarla sınırlı kalmamak üzere alınabilecek önlemlerden oluşmaktadır.
- Alternatif Yakıtlar ve Enerji kaynakları: Sürdürülebilir biyoyakıtlar, LNG, hidrojen, amonyak, yakıt hücreleri, elektrik/hibrit, rüzgâr, güneş ve nükleer ile sınırlı kalmamak üzere alternatif yakıtlar ve enerji kaynaklarının kullanılması olacaktır (Mallouppas & Yfantis, 2021).

1.3 Literatür Taraması

Turboşarjrlar süpürme sisteminin en önemli parçası olduklarından, ana makinenin istikrarlı bir şekilde çalışması için turboşarjır sisteminin de güvenilir bir şekilde çalışması gerekmektedir. Ayrıca turboşarjır arızasının, ana makinenin operasyonu üzerinde büyük bir etkisi olduğu ve turboşarjır ile ana makinenin uygun bir şekilde eşleşerek uyum içinde çalışmasının oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır (He ve diğ., 2021).

Gemi turboşarjrlarına ilişkin ulaşabileceğimiz en temel kaynaklar, üreticilerin yayınladığı yayınlar olarak da karşımıza çıkmaktadır. Özellikle MAN B&W, ABB ve

Mitsubishi Heavy firmalarının kullanma kılavuzu ve servis mektupları ile pek çok operasyonel bilgiye ulaşılabilmektedir. Ayrıca bu tezde kullanılacak temel yöntem olan FFTA ile ilgili de literatürde pek çok araştırma bulunmaktadır.

Adamkiewicz (2012), birkaç farklı turboşarjör modelinde operasyonel arızaları neden ve sonuç ilişkileri kapsamında uzman bilgisi ve operasyonel teşhis deneyimine dayalı bir yöntemle analiz etmiştir (Adamkiewicz, 2012).

Ünver ve diğ. (2019) yaptıkları araştırmada, iki zamanlı bir gemi ana makinesinin krankkeysinde meydana gelebilecek patlamaları FTA ile bulanık mantık çerçevesinde analiz etmeye çalışmışlardır. Uzman görüşleri ile elde edilen kök sebepler doğrultusunda FFTA ile yapılan hesaplamalar sonucunda crankcase patlama ihtimali hesaplanmıştır. Denizcilik operasyonlarının; gemiye, yüke ve insan hayatına en büyük zararı verebilecek olan crankcase patlamasının olasılık ihtimalinin hesaplanması, kök sebeplerinin bulunarak bu tehlikenin engellenmesine yardımcı olacaktır (Ünver ve diğ., 2019).

Knezevi ve diğ. (2020) gemi turboşarjör sisteminde meydana gelebilecek arızaları bir simülasyon ile modelleyerek elde ettikleri sonuçlar sayesinde erken arıza tespiti yapabilmeyi ve planlı bakım yönetiminin iyileştirilmesini amaçlamıştır (Knezevi ve diğ., 2020).

Literatürdeki çalışmalarda da görüldüğü gibi Hata Ağacı Analizi metodunun bulanık mantık ile kullanılması yoluyla elde edilen verilerin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar çıkarması bu tez çalışmasında bu yöntemin tercih edilmesindeki en temel sebeplerden biri olmuştur. Özellikle ekonomik kaygılar ve saygınlığın korunabilmesi gibi sebeplerle denizcilik şirketlerinden güvenilir ve tam veri toplanması her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle uzman tecrübe ve görüşlerine dayalı FTA metodu hem kullanışlı hem de en güvenilir sonuçlara ulaşılabilirlik açısından tercih edilmiştir.



2. GEMİLERDE KULLANILAN TURBOŞARJIR SİSTEMLERİ

Turboşarjırların gemi ana makine sistemlerine monte edilmesiyle birlikte ana makine boyutlarında ve ağırlıklarında ciddi bir azalma sağlanmıştır. 1920'li ve 1930'lu yıllarda pek çok ana makine üreticisi, yeterli yanma ve süpürme havasını sağlayabilmek için çeşitli yöntemlerle silindirlere basınçlı hava desteği sağlayan sistemler geliştirmişlerdir. Krankşaft tahrikli çalışan hava pompaları, karşıt ağırlıklardan sağlanan kaldırma kuvveti ile tahrik edilen yandan monteli pompalar, akuple çift loblu blover ve yardımcı blover gibi sistemler bunlardan bazıları olarak kullanılmıştır. Ayrıca bazı sistemlerde piston altında kalan havanın sıkıştırılmasıyla sağlanan basınçlı havanın silindirlere verilmesi de bu yöntemlerden biri olarak bilinmektedir.

İsviçreli mühendis Alfred Büchi, egzoz gazları ile harekete geçen ve silindirlere hava basan turboşarjır tasarımı ile 1905 yılında turbo teknolojisine ait ilk patenti almıştır. Sonrasında turbo teknolojinin yaygınlaşmasıyla birlikte Amerikan ve Fransız orduları başta olmak üzere 1. Dünya Savaşı'nda uçaklarda, lokomotiflerde ve bazı gemilerde kullanılmıştır. 1924 yılında Brown Boveri öncülüğünde yapılan Ar-Ge çalışmaları sonucunda dünyanın ilk ağır sanayi egzoz gaz turboşarjır sistemi VT402 üretilmiştir. 1925'te Büchi, teknoloji için çığır açacak olan düşük basınçlı turboşarjır için yeni bir patent almıştır. Büchi'nin öncülüğünde yapılan ve Brown Boveri tarafından desteklenen bu çalışmalar ile 1700 fren beygir gücünden (bhp) 2400 bhp'ye kadar güç artışı elde edilmiştir. 1926 yılında inşa edilen gemiler, denizcilik tarihinde turboşarjır ile donatılan ilk gemiler olmuştur. Bu sonuçlar mevcut dönem şartlarında ele alındığından oldukça etkileyici bulundu ve sadece 1929 senesinde Büchi'nin dört zamanlı turboşarjırlı makineleri için çok sayıda sipariş alınmıştır.

İlk üretilen turboşarjır sistemlerinin bile %40 verim artışı sağlaması başta MAN olmak üzere pek çok makine üreticisini kendi turboşarjır sistemlerini geliştirmeye sevk etmiştir (Stone & Macmillan, 1992; Url-1; Url-2; Summers, 2007). Böylece radyal

türbinli yüksek verimli turboşarjrlar ve soğutmasız gövdelerin bulunmasıyla günümüz turboşarjır teknolojisinin temeli oluşturulmuştur.

Turboşarjrların genel çalışma prensibi, silindirlerde yanma sonucu oluşan egzoz gazının, dışarı atılan ve kullanılmayan kinetik ve termal enerjisini kullanmaktır. En yaygın olarak kullanılan sistem, egzoz manifoldundan dışarı akan egzoz gazının turboşarjır türbin kanatlarını tahrik ederek aynı mil üzerindeki kompresör (blower) kanatlarını döndürmesi ve bu sayede silindire basınçlı temiz hava basılması şeklinde çalışmaktadır. Silindir içine doldurulan havanın artırılması, yanma sırasında daha iyi bir termal verim sağlar. Turboşarjrlar aynı zamanda; içten yanmalı motorlardan kaynaklanan emisyonların düşürülebileceği en önemli sistemlerden biri olarak düşünülmektedir.

Dizel makinelerinin çalışma ilkeleri açıklanırken; dört stroklu makinelerde bir pistonun dört stroku veya krankşaftın iki tam devrinde bir iş çevrimi elde edilirken, iki stroklu makinelerde pistonun iki stroku veya krankşaftın bir tam devrinde bir iş çevrimi elde edilmektedir. Bu ilkelere dayanarak; silindir sayısı, silindir çapı, stroke boyu, devir sayısı ve ortalama basınçları eşit olan iki stroklu makinelerin dört stroklu makinelerden kuramsal olarak %100 fazla güç elde edileceği görülmektedir. Gerçek uygulamalarda ise kayıp strok yüzdeleri nedeniyle iki stroklu makineler dört stroklu makinelerden %50-60 daha fazla güç elde edebilmektedir. Bu nedenle dört stroklu makinelerin üreticileri bu farkı ortadan kaldıracı adıma aşırı doldurma (süperşarj) yöntemini geliştirmişlerdir. Doğal emişli makinelerde silindir içine normal bir emme stroku sırasında emilenden daha fazla ağırlıkta hava verme işlemine aşırı doldurma veya süperşarj adı verilmektedir. Bu uygulama ile dört stroklu makinelerin güçleri %50-60 oranında yükseltilebildi. Böylece iki stroklu makineler ile dört stroklu makineler arasındaki, çevrim farkından kaynaklanan güç farklılığı ortadan kaldırılmış olmaktadır. Aşırı doldurmanın temel ilkesi silindire verilecek yanma havasının basıncını arttırmak dolayısıyla da ağırlığını yani hava içerisindeki oksijen miktarını arttırmak olacaktır. Böylece silindirde daha çok yakıt yakılarak oluşan ısı miktarı ve bu ısıнын indike güce dönüşen bölümü de artacağından makinenin gücü yükselecektir (Stone ve Macmillan, 1992).

En temel turboşarjır sistemi iki adet akışkan mekanizmasından oluşmaktadır.

- Türbin

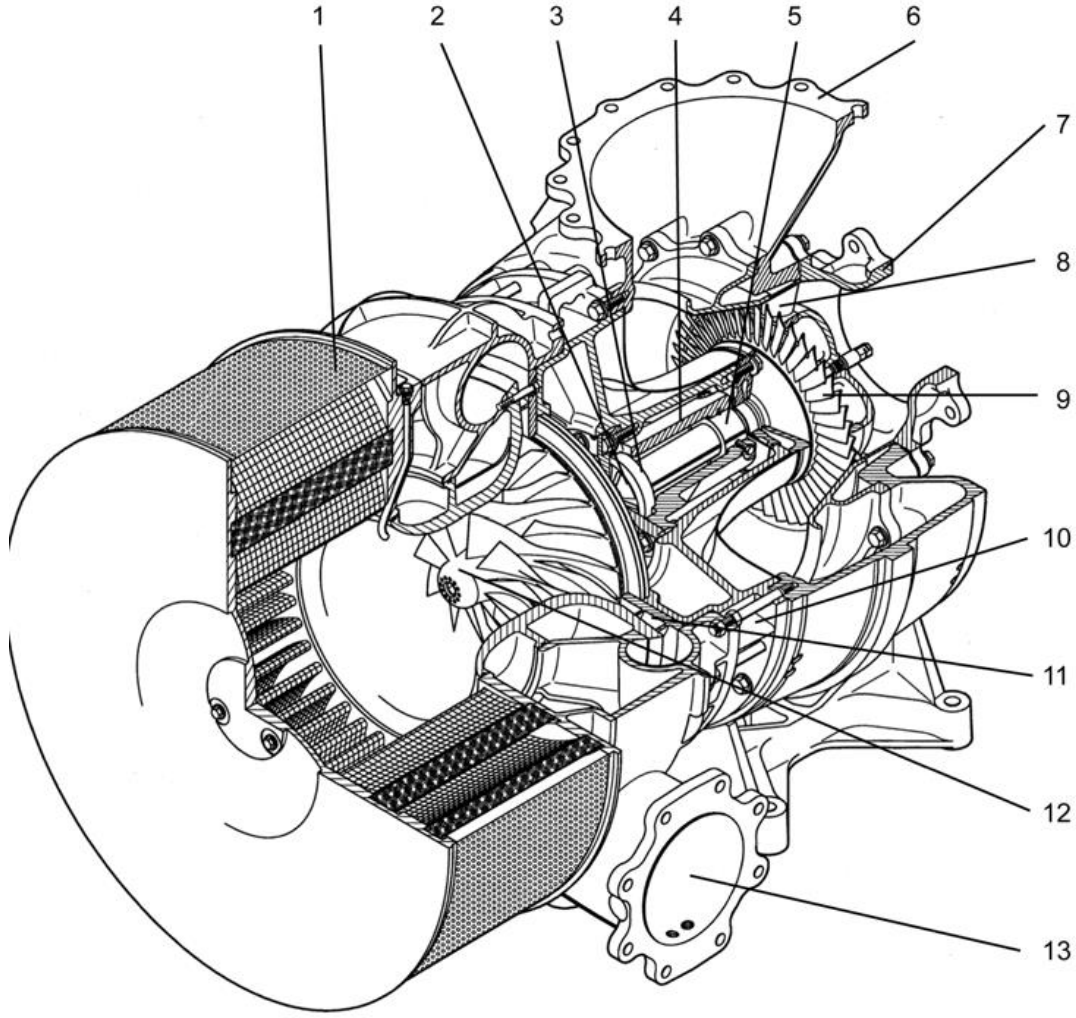
- Kompresör ya da blover

Bu iki mekanizma ve bileşenleri Şekil 2.1’de gösterilmektedir (ABB, 2005). Türbin ve kompresör aynı şaft üzerinde karşılıklı olarak yer almaktadır. Dizel makinesinden çıkan egzoz gazları; egzoz giriş manifoldundan girerek nozul ring üzerinden türbin kanatlarını döndürmeye başlayacaktır. Egzoz gazından alınan bu enerji türbin kanatları ile aynı şaft üzerinde bulunan kompresör kanatlarına aktarılmaktadır. Bu enerji ile döndürülen kompresör kanatları temiz havayı içeri çeker ve basınçlı havanın silindirlerin içine basılmasını sağlamaktadır. Bu görevini yerine getirdikten sonra egzoz gazı, egzoz boruları vasıtasıyla bacaya doğru iletilecektir.

Dizel makinesinin çalışması için gerekli olan sıkıştırılmış hava, turboşarjır susturucu vasıtasıyla emilmektedir. Daha sonra difüzer vasıtasıyla hava çıkış kanalından tahliye edilmektedir. Rotor (şaft veya mil); kompresör ile türbin arasında bulunan burcun, iki radyal-düz yatağının içinde çalışmaktadır. Eksenel itme yatağı kompresör tarafında bulunmaktadır. Rotorun düz yatağına bağlı olarak bulunan ve makinenin merkezi yağlama sistemi tarafından beslenen bir yağ besleme devresi vardır. Yağlama yağının çıkış noktası daima yatakların en alt noktasındadır (Maciej Serda ve diğ., 2002).

Şekilde gösterilen turboşarjıra ait numaralandırılmış bileşenler Çizelge 2.1’de gösterilmiştir (ABB, 2005).

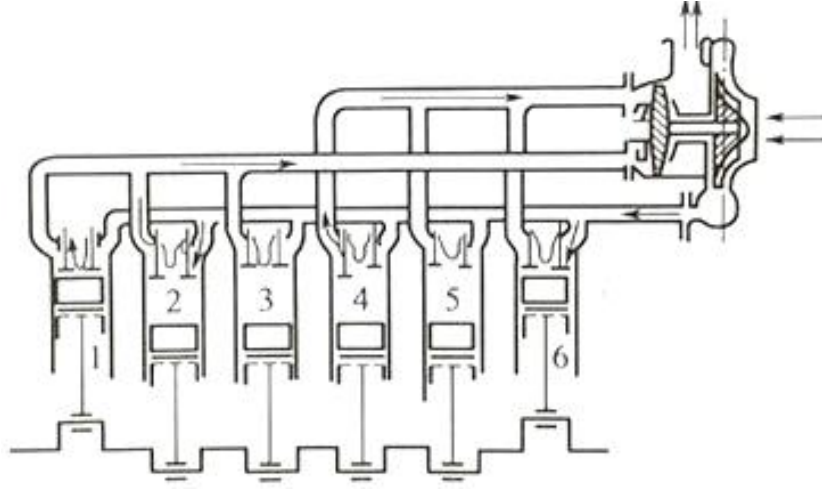
Egzoz devresindeki basınç dalgalanmasına engel olmak amacıyla aynı anda egzoz evresinde olmayan silindirler bir arada olacak şekilde gruplar oluşturulur ve bazı modellerde bunlar türbinin ayrı nozul gruplarına bağlanmaktadır. Şekil 2.2’de 6 silindirli bir dizel makinesi örnek olarak alınmıştır. Silindirlerde yanma sırası 1-5-3-6-2-4 şeklindedir ve silindirler 3’er 3’er gruplandırılarak egzoz manifoldları da ayrılmış ve salyangozdaki farklı girişler sayesinde nozul ringlerin iki farklı yarısına iletilmiştir. Böylece silindirlerden gelen egzoz gazı hiçbir basınç dalgalanması veya kayıp olmaksızın sürekli bir gaz akışı türbine iletilerek daha yüksek oranda verim elde edilmiş olur (Url-3).



Şekil 2.1 : Gemi turboşarjır sistemi ve temel bileşenleri (ABB, 2005).

Çizelge 2.1 : Gemi turboşarjır sistemi ve temel bileşenleri (ABB, 2005).

Şekil numarası	Bileşenin adı
1	Susturucu
2	Radyal-Düz yatak
3	Eksenel itme yatağı
4	Yatak burcu
5	Radyal-Düz yatak
6	Egzoz Gazı Çıkış Kanalı
7	Egzoz Gazı Giriş Kanalı
8	Nozul Ring
9	Türbin Kanatları
10	Yatak Yuvası
11	Difüzör
12	Kompresör Kanatları
13	Hava Çıkış Kanalı



Şekil 2.2 : 6 silindirli bir dizel makinenin 3'lü gruplandırılmış egzoz manifoldu ve turboşarjır (Url-3).

2.1 Dört Stroklu Dizel Makineler

Turbocharger ile donatılmış, tek etkili dört stroklu gemi ana makineleri; aynı hız ve boyutlara sahip doğal emişli makinelerden üç katı veya daha fazlası kadar güç sağlayabilmektedir. Turbocharger'ların seri olarak bağlanarak oluşturulduğu bazı makine sistemlerinde bu güç çıkışı daha da arttırılabilir. Şekil 2.3'de dört stroklu, orta devirli ve turbocharger'lı bir dizel makinesi görünmektedir. Bu makinede egzoz manifoldu 1, egzoz valfi 2, emme valfi 3, külbütör (rocker arm) 4, camşaft ve cam'ler 5, pushrod 6, piston 7, connecting rod 8, karşıt ağırlık 9, silindir gömleği 10, krank kutusu ve kapakları 11, karter 12 sayıları ile gösterilmiştir (MAN Diesel & Turbo engines, 2016). Böyle bir makinede bir iş çevriminin oluşturulabilmesi için sırasıyla;

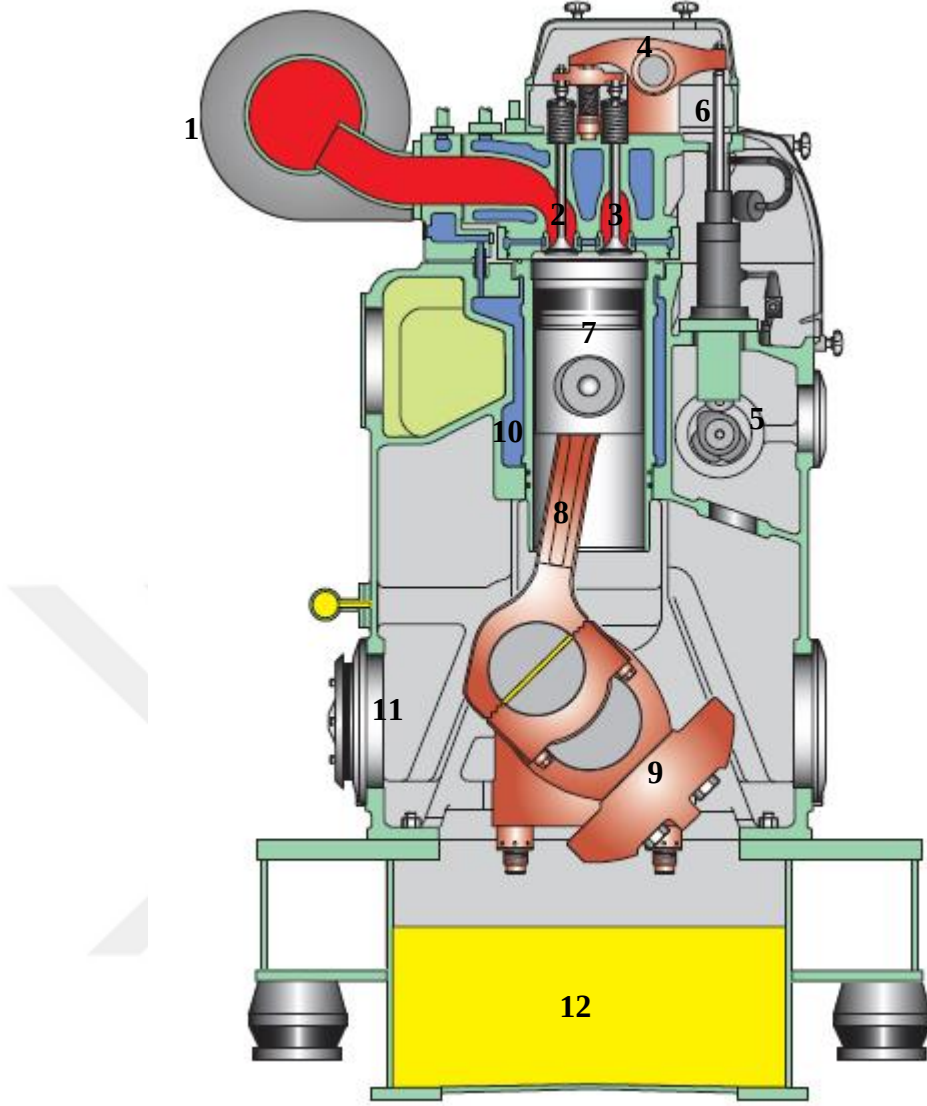
- 1- Emme,
- 2- Sıkıştırma,
- 3- Genişleme veya yanma,
- 4- Egzoz olayları gerçekleşir.

Emme olayı sırasında piston alt ölü noktadan (AÖN), üst ölü noktaya (ÜÖN) doğru hareket eder ve bu hareketi sırasında silindirde yarattığı hacim boşluğu kısmi bir vakum oluşturur ve böylece silindire emme valfi üzerinden basınçlı hava doldurulmaktadır. Piston alt ölü noktayı geçtikten bir süre sonra emme valfi kapanır.

Emme strokunun sona ermesi, egzoz valfi de kapalı olduğu için silindir içindeki sıkıştırma olayının başlaması anlamına gelmektedir. Pistonun yukarı doğru hareketi sırasında silindir içindeki hacmin küçülmesi ve basıncın yükselmesine neden olmaktadır. Sıkıştırma ve sürtünme etkisiyle silindir içindeki temiz hava ve atık gazlardan oluşan karışımın basıncı ve sıcaklığı yükselmektedir. Piston üst ölü noktaya çok yaklaştığı bir noktada enjektörden küçük partiküller ve pulvarize halde yakıt silindir içerisine püskürtülmeye başlayacaktır. Yakıtın püskürtülmesi sırasında hemen yanma oluşmaz ve piston hareketine devam eder, bu sırada geçen süre tutuşma gecikmesi olarak tanımlanır ve silindir içinde yanma bu sürenin sonunda yakıtın ani olarak tutuşması ile başlamaktadır.

Bir takım kimyasal, termodinamik ve hidrodinamik olaylar sonrasında ani basınç yükselmesi meydana gelir ve piston AÖN'ya doğru itilecektir. Bu olay iş stroku olarak da isimlendirilmektedir. Piston alt ölü noktaya ulaşmadan önce egzoz valfi açılarak silindir içindeki gazlar dışarı atılmaya başlanır ve piston alt ölü noktayı geçtikten sonra uyguladığı itme ile gazların dışarı itilmesi egzoz stroku olarak adlandırılmaktadır. Egzoz strokunun sonuna doğru, piston üst ölü noktaya varmadan önce emme valfi açılır, her iki valfin açık olduğu bu olay valf overlap olarak adlandırılmaktadır. Bu süreçte bir yandan egzoz gazlarının yüksek hızı sayesinde emme valfinden havanın silindire çekilmesi sağlanırken aynı zamanda silindir duvarlarının soğutulduğu ve ölü hacimde kalması olası atık gazların silindirden dışarı atıldığı bir süreç gerçekleşmektedir.

Dört stroklu makinelerde turboşarjır operasyonu daha önce anlatılan temel bileşenlerle aynı şekilde yapılmaktadır. Ancak üzerinde durulması gereken bazı önemli detaylar vardır. Bunlardan biri de emme havasının sıcaklığıdır. Bloverde sıkıştırılarak basıncı yükselen havanın sıcaklığı da artmaktadır. Havanın sıcaklığı arttığında özgül ağırlık azalır ve bu da havanın içindeki oksijen miktarının azalması anlamına gelmektedir. Havanın içindeki oksijen miktarının azalması yakıt tüketiminin artması, makine çıkış gücünün azalması ve yakıt tüketiminin artması gibi sonuçlara neden olmaktadır.



Şekil 2.3 : 4 Stroklu, orta devirli ve turboşarjlı bir dizel makinesinin enine kesiti
(MAN Diesel & Turbo engines, 2016).

Bu nedenle turbocharger'lı makinelerde, blower ile makine arasına bir hava soğutucu donatılır ancak emme havası (şarj havası) basıncı düşük olan makinelerde bu soğutucuya gerek olmayabilmektedir. Blowerden çıkan hava, soğutucudan çıktıktan sonra skavenç manifoldu veya hava tüpüne verilir. En sonunda emme valfi açılarak uygun sıcaklığa ve basınca getirilmiş olan yanma havası silindirlere verilmektedir.

Dört stroklu makinelerde turboşarjır sistemi kullanılmasıyla aşağıdaki yararlar sağlanmaktadır:

- Özgül makine ağırlığı azalır.

- Makine hacim ve ağırlığı azalır, yük ve yolcular için ayrılan hacim ve ağırlık artar.
- Egzoz gazlarının atık ısı ve basıncından faydalanılarak makinenin ürettiği güç artar. Bu da enerjinin geri dönüşümü ilkesinin gerçekleştirilmesi anlamına gelir.
- Özgöl yakıt tüketimleri azalır. Mekanik verim artar. Turboşarjordan sağlanan basınçlı havanın türbülans hareketi sayesinde valf overlap sırasında daha etkili bir süpürme gerçekleşir ve silindir içindeki atık gazların miktarı azalır.

2.2 İki Stroklu Dizel Makineler

Krankşaftın bir tam devrinde veya 360 derecelik krank açısı cinsinden devrinde bir iş yaratan makineler iki zamanlı makinelerdir. İki stroklu makinelerde emme valfleri yerine emme portları tercih edilir ve bazı modellerde egzoz portları da bulunmaktadır. Emme portu ve egzoz valfi ile donatılan makineler doğru akımlı süpürme olarak adlandırılırken hem emme portu hem de egzoz portu ile donatılan makineler ters akım süpürme olarak adlandırılmaktadır.

İki stroklu, ağır devirli ve turboşarjırlı bir dizel makinesinin enine kesiti ve temel bileşenleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir (MAN Diesel & Turbo Engines, 2012). Egzoz manifold 1, egzoz valfi 2, emme (skavenç) manifoldu 3, emme portları 4, piston 5, piston rod 6, connection rod 7, yakıt pompası ve cam'ler 8, yakıt kamçısı ve enjektör 9, krank kutusu (crankcase) ve kapakları 10, bedplate 11, karter 12 numaralarıyla gösterilmiştir.

Doğru akım süpürmeli, iki stroklu turboşarjırlı bir makinenin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir: Piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya indiği sırada bu harekete başlamadan hemen önce gerçekleşen ve bir süre devam eden yanma olayının etkisiyle piston AÖN'ya doğru itilir ve bir genişleme yani iş elde edilirken, önce egzoz valfi açılarak silindir içerisindeki egzoz gazlarının silindir dışına çıkması sağlanmaktadır. Bu sırada piston emme portlarının hizasını geçtiği andan itibaren silindire temiz hava girişi başlar ve bu hava sayesinde silindir içerisinde kalan atık gazlar egzoz valfine doğru itilir. Piston alt ölü noktayı geçtikten sonra egzoz valfi kapanıncaya kadar bu doğru akım süpürme işlemi devam etmektedir. Daha sonra pistonun emme portlarının

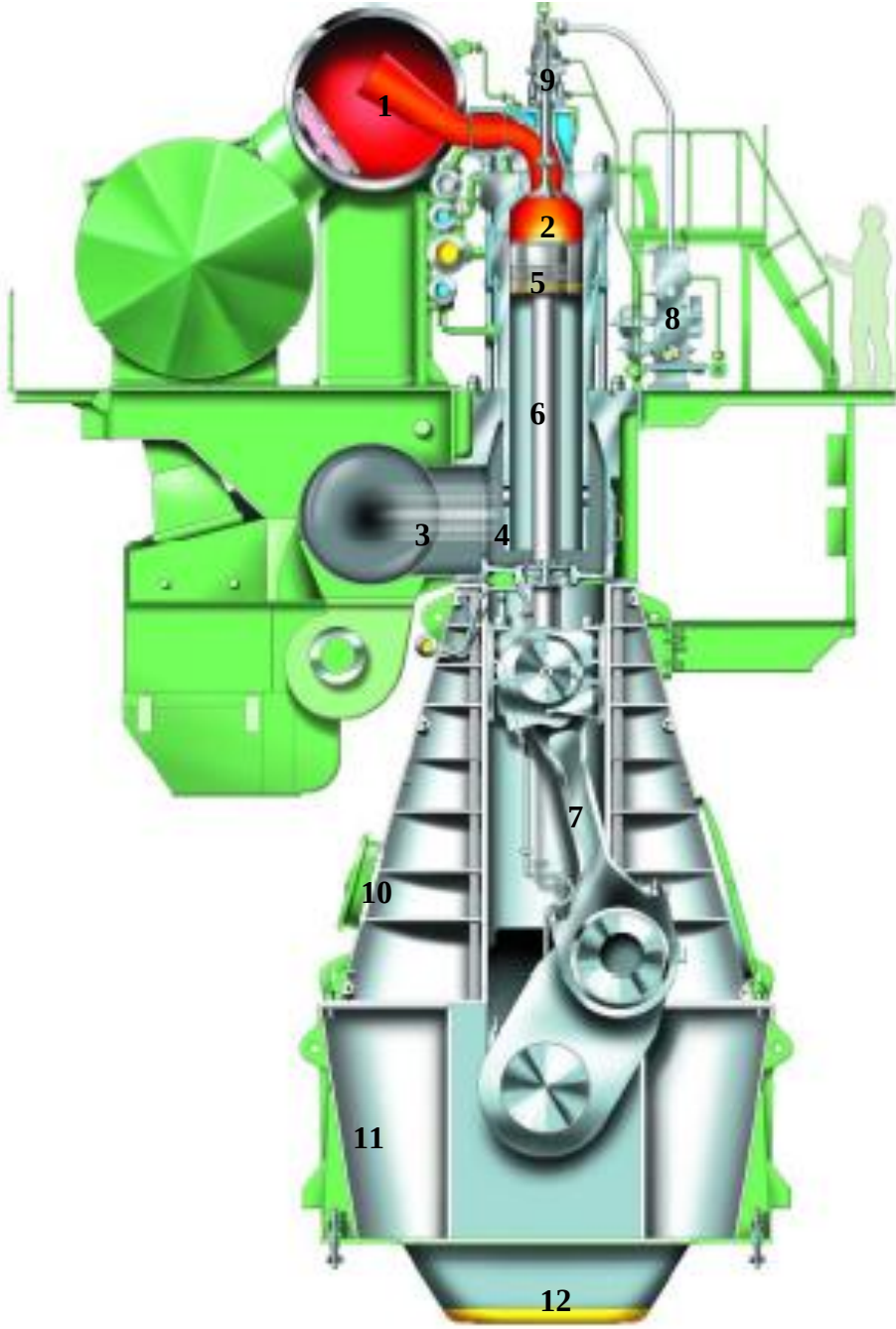
hizasını geçmesiyle birlikte silindir içerisinde sıkıştırma işlemi başlamaktadır. Sıkıştırma sonunda silindir içerisindeki havanın sıcaklığı ve basıncı önemli miktarda artmış olur ve piston üst ölü noktaya gelmeden hemen önce enjektör açılarak silindirdeki kızgın havanın içerisine pulvarize yakıt püskürtülür ve tutuşma gecikmesi aşamasından sonra başlayan yanma işlemi ile beraber sürecin başlangıcına dönmüş olmaktadır.

Turboşarjır teknolojisi tarihsel süreçte ilk olarak dört stroklu dizel makinelerle uygulanmış ve bu makineleri iki stroklu makinelerle çıkış gücü yönünden rekabet edilebilir şartlara getirmiştir. Ancak daha sonra iki stroklu makinelerde de turboşarjır sistemleri kullanılmaya başlanmıştır.

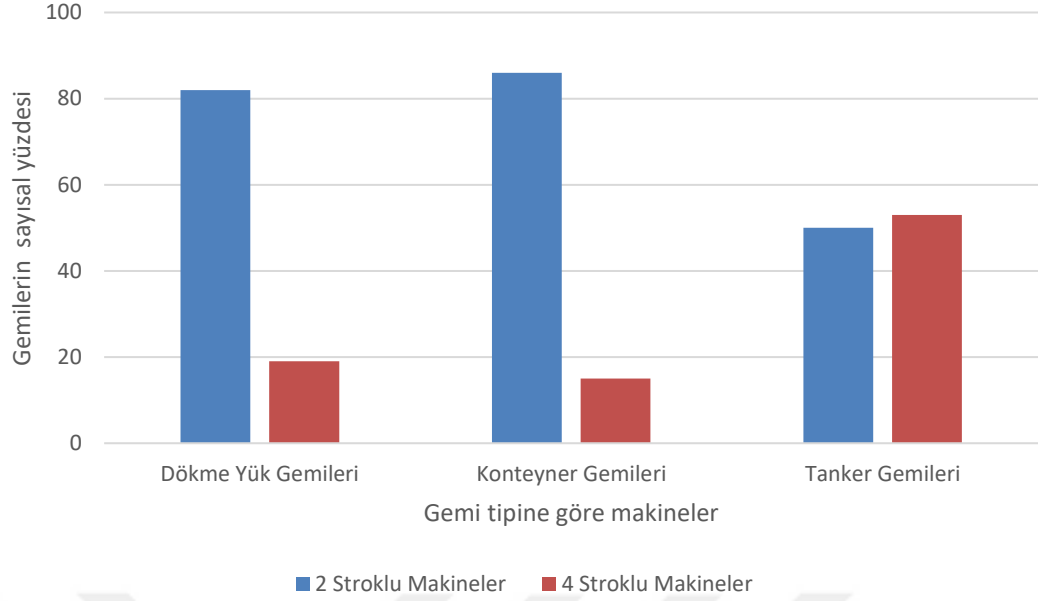
İki stroklu makinelerde süpürme havasının basıncı 1,1 -1,5 bar gibi düşük seviyelerde olduğu için turboşarjır sisteminin verimli çalışabilmesi için bu değerlerin üzerine çıkması gerekmektedir. Bu nedenle iki stroklu makinelerle turboşarjırlara ek olarak blover sistemlerinin donatılması ihtiyacı oluşmuştur. Emme havasının basıncı turboşarjır sayesinde dört stroklu makinelerde 3 bar ve iki stroklu makinelerde turboşarjır ve ek olarak çalıştırılan sistemler sayesinde 6 bar veya daha üzerine kadar çıkabilir. Bu sistem daha sonra teknolojik gelişmeler sayesinde turboşarjırların seri veya paralel bağlanması, iki kademeli veya hibrit sistemler gibi uygulamalar sayesinde geliştirilmiştir.

Günümüz iki stroklu gemi dizel makinelerinin tamamında turboşarjır sistemi kullanılmaktadır. Konteyner gemilerinin ve dökme yük gemilerinin sayısal anlamda çok büyük bir çoğunluğu Şekil 2.5'te gösterildiği gibi iki stroklu dizel makineleri ana makine olarak tercih ederken, tanker gemileri iki ve dört stroklu ana makineleri eşit oranda tercih etmektedir (Andersson ve Kisbenedek, 2018).

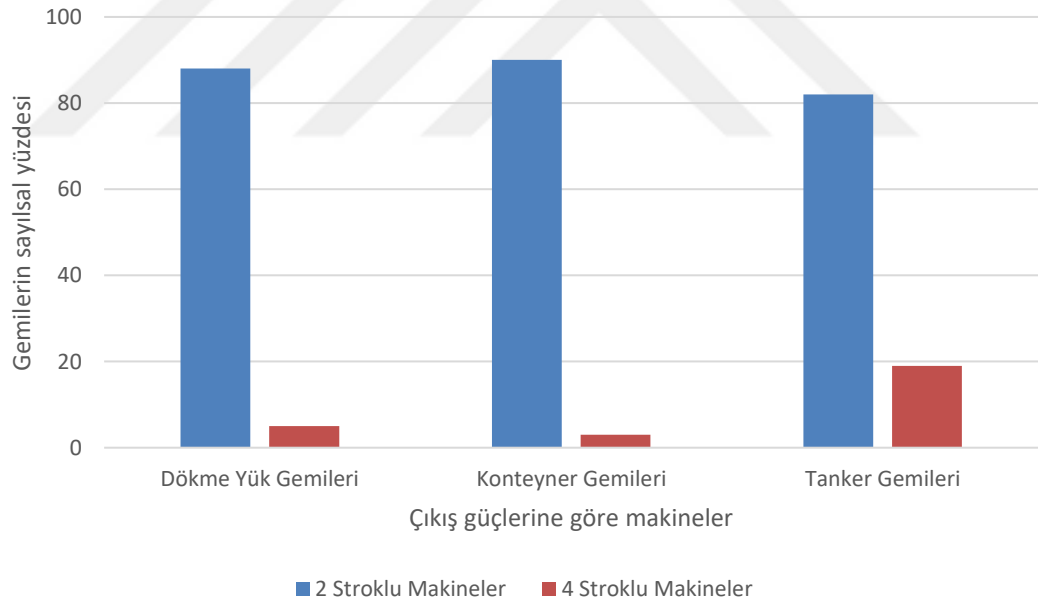
İki stroklu makineleri dört stroklu makinelerden ayıran en temel özellikleri; boyutları, devir sayısı ve güçleri olarak bilinmektedir. İki stroklu makineler daha uzun strok boyuna sahip oldukları için boyları da uzundur. Ayrıca dört stroklu makinelerde olmayan piston rod ve connection rod arasında bulunan kroshead nedeniyle krosheadli makine olarak adlandırılırken dört stroklu makineler de crank pistonlu makine olarak adlandırılırlar. İki ve dört stroklu gemi ana makinelerinin en temel farklılıklarından biri olan çıkış güçlerine göre dağılımları Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Andersson & Kisbenedek, 2018).



Şekil 2.4 : İki stroklu, ağır devirli ve turboşarjlı bir dizel makinesinin enine kesiti
(MAN Diesel & Turbo Engines, 2012).



Şekil 2.5 : Ana makine sayılarına göre iki ve dört stroklu makinelere sahip gemilerin yük tipine göre dağılımları (Andersson & Kisbenedek, 2018).

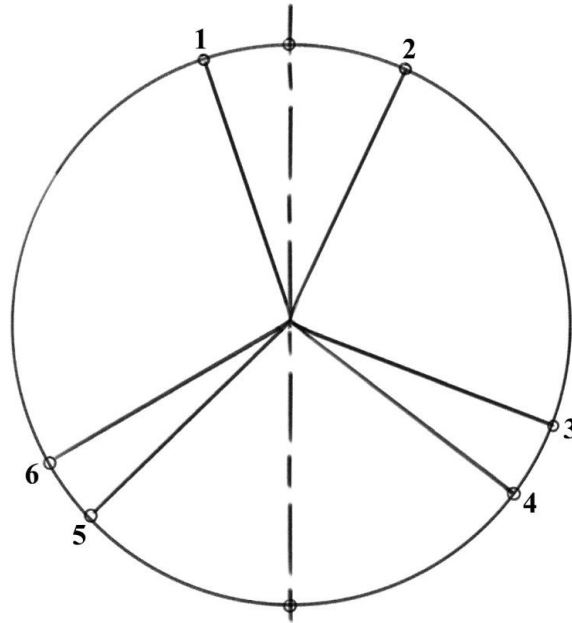


Şekil 2.6 : Ana makine çıkış güçlerine göre iki ve dört stroklu makinelere sahip gemilerin yük tipine göre dağılımları (Andersson & Kisbenedek, 2018).

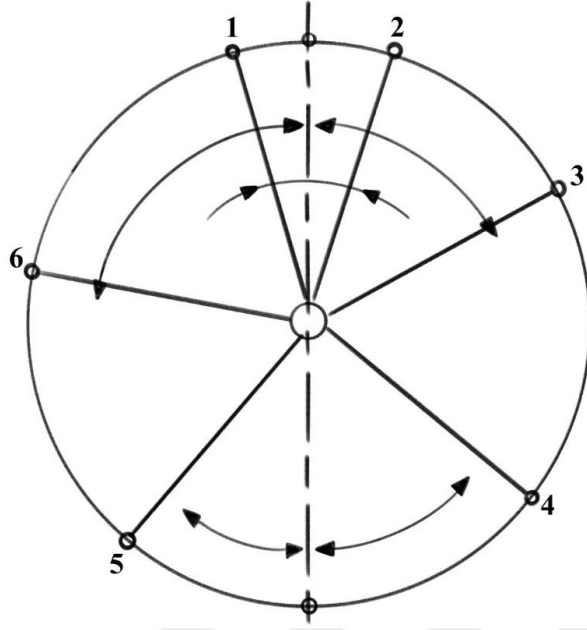
Dört stroklu makineler ile iki stroklu makinelerin pek çok farkı bulunmaktadır. Ancak bu araştırma çalışmasının konusuyla da ilgili olarak üzerinde durulması gereken en temel farklılıklardan biri süpürme ve şarj yöntemleri olacaktır. İki zamanlı makinelerde süpürme işleminin en yaygın olarak tercih edildiği ve en verimli

sayılabilecek şekil olan doğru akım süpürme sistemi yani egzoz valfli ve emme (skavenç) portlu sistem olarak görülmektedir. Bu tipte bir makinenin sembolik krank açıları ile tasarlanmış timing diyagramı Şekil 2.7’de; enjektör açılır 1, enjektör kapanır 2, egzoz valfi açılır 3, skavenç portu açılır 4, egzoz valfi kapanır 5, skavenç portu kapanır 6 numaraları ile gösterilmiştir.

Yapılan işin aşamaları ve krank açıları bakımından karşılaştırmak için dört stroklu bir gemi ana makinesinin timing diyagramı da Şekil 2.8’de; enjektör açılır 1, enjektör kapanır 2, egzoz valfi kapanır 3, egzoz valfi açılır 4, emme valfi kapanır 5, emme valfi açılır 6 numaraları ile gösterilmiştir. Emme havası basınçlarının farklı olması nedeniyle turboşarjır sistemlerinde de farklılıklar olacağından dolayı iki stroklu ve dört stroklu makinelerin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durum arıza belirleme aşamasında belirlenen arızalarda ayrıca tek tek değerlendirmeye alınacaktır ancak turboşarjırın temel bileşenlerinde çok büyük bir farklılık yaratmamaktadır. Turboşarjırın temel bileşenleri dışındaki ekipmanlar ayrı bir bakım-onarım periyoduna sahip olduklarından turboşarjır arıza belirleme sürecinde dış etkenler veya ilişkili ekipmanlar olarak ayrı bir başlık altında incelenecektir.



Şekil 2.7 : İki stroklu, doğru akım süpürmeli bir gemi ana makinesinin timing diyagramı.



Şekil 2.8 : Dört stroklu bir gemi ana makinesinin timing diyagramı.



3. HATA AĞACI ANALİZİ VE BULANIK MANTIK

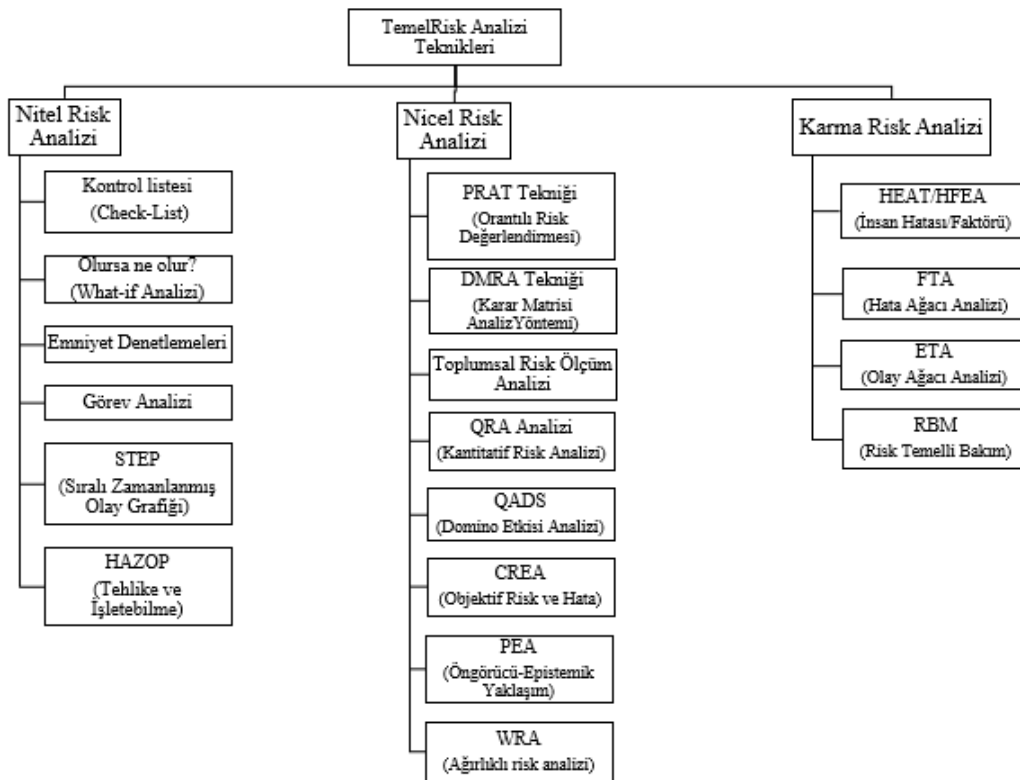
Risk analizi; tehlikenin tanımlanması, risk analizi ve ölçülmesi, riskin kontrol altına alınması aşamalarının tamamını içeren genel bir süreci veya yöntemi ifade etmektedir. Tehlikenin tanımlanması; zarar verme potansiyeline sahip olan tehlike ve risk faktörlerinin tanımlanması anlamına gelmektedir. Risk analizi ve ölçülmesi; söz konusu tehlikeyle ilişkili risklerin analiz edilmesi ve ölçülmesi anlamına gelmektedir. Riskin kontrol altına alınması; tehlikenin ortadan kaldırılması için uygun yolların belirlenmesi veya tehlikenin ortadan kaldırılamadığı durumlarda risklerin kontrol edilmesi anlamına gelmektedir (Url-4).

Risk analizi konusuna ilgi son otuz yılda büyük bir hızla artarken, risk analizi hayatımızın neredeyse bütün yönlerinin genel yönetimini destekleyen ve tamamlayan etkili ve kapsamlı bir prosedür olarak ortaya çıkmaktadır. Sağlık hizmetleri, finans sektörü, mühendislik ve çevre ile fiziksel altyapı sistemlerinin yöneticilerinin tümü karar alma süreçlerine risk analizini dahil etmektedir. Ayrıca risk analizinin birçok disiplin tarafından her yerde mevcut olan uyarlamaları ve bunun endüstri ve devlet kurumları tarafından karar alma sürecinde yaygın olarak kullanılması; teorik, metodolojik ve pratik araçlarda benzeri görülmemiş bir gelişmeye yol açmıştır (Haimes, 2008).

Risk, değerlendirmeye alınan bir kişinin, ekipmanın veya bir sistemin tehlikeden olumsuz yönde etkilenme olasılığı olarak kabul edilmektedir. Tehlike ise herhangi bir güvenli olmayan durum ya da hasar veya zarar verme potansiyeline sahip istenmeyen bir olayın potansiyel kaynağı olarak kabul edilmektedir (Reniers ve diğ., 2005). Ayrıca risk, bir tehlikenin şiddetinin belirsizliğinin bir ölçüsü veya olumsuz etkilerinin olasılığı ve şiddetinin bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır. Genel olarak tehlike, potansiyel olarak zarar verebilecek madde ve süreçlerin bir özelliği olarak tanımlanmıştır (Tomasoni, 2010).

Karmaşık bir insan-makine sistemi; insanlardan, makinelerden ve bunlar arasındaki etkileşimden oluşur ve sistemsal bir modelleme ile uygun şekilde tanımlanabilmektedir. Bir sistem modelinin görevi, sistemin nasıl arızalanabileceğini veya başka bir deyişle kazaların oluşma şartlarını düşünürken ön plana çıkmaktadır. Kazaların belirli arızalardan, hata mekanizmalarından ya da talihsiz tesadüflerden kaynaklanması bu konuda temel bir fark yaratmaktadır. Ayrıca risk analizi; insan faaliyetlerinin tehlikeli özelliklere sahip sistemler üzerindeki etki, oluşum ve sonuçlarını değerlendirmek için gerekli ve sistematik bir süreç olarak düşünülmektedir (van Duijne ve diğ., 2008).

Temel risk analizi ve değerlendirmeleri teknikleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi üç temel başlık altında toplanmıştır. Nitel teknikler hem analitik tahmin süreçlerine hem de uzmanların bilgi, beceri ve tecrübelerine dayanmaktadır. Nicel tekniklere göre risk, bir iş sahasında kaydedilen gerçek hata ve kaza verilerinin yardımıyla tahmin edilebilen ve matematiksel bir ilişki ile ifade edilebilen bir niceliğe dayanmaktadır. Karma risk analizi teknikleri veya hibrit teknikler, geniş bir yayılmayı engelleyen amaca özel karakterlerinden dolayı büyük bir karmaşıklık sunmaktadırlar (Marhavilas ve diğ., 2011).



Şekil 3.1 : Temel risk analizi teknikleri.

3.1 Hata Ağacı Analizi (FTA)

Hata Ağacı Analizi, karmaşık mühendislik sistemlerinin güvenilirliğini hem nitelik hem de nicelik yönünden değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan hibrit bir araştırma yöntemi olarak bilinmektedir. Bir Hata Ağacı Modeli kurulurken, bağlamda istenmeyen, sistem emniyetini tehdit eden bir olay belirlenmektedir. Daha sonra bu olayın gerçekleşmesiyle ilgili çevresel ve operasyonel alt faktörler ve birbirleriyle olan ilişkileri göz önüne alınarak bir ağacın dalları ya da soy ağacı örneğinde olduğu gibi ebeveyn-çocuk ilişkileri kurulmaktadır. Bu şekilde kurulan Hata Ağacı Modeli, önceden belirlenmiş olan istenmeyen olayın gerçekleşmesiyle sonuçlanacak çeşitli paralel ve sıralı ilişkili hata kombinasyonlarının grafiksel ifadesini oluşturmaktadır. Dolayısıyla bir hata ağacı, hata ağacının tepe olayı (Top Event) olan istenmeyen olaya yol açan temel olayların mantıksal karşılıklı ilişkilerini tasvir etmektedir. Bu hatalar; ilgili ekipmanlarda meydana gelebilecek arızalar, insan hataları veya istenmeyen olayın gerçekleşmesine neden olabilecek diğer faktörler olabilmektedir. Hata ağacı analizi; belirli bir kaza, hata ya da arızaya odaklanan ve bu olayın nedenlerini, etki ağırlıklarını görsel olarak modelleyen ve birbirleriyle olan mantıksal ilişkilerini belirleyebilmek için kullanılan tündengelimli bir araştırma yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bir Hata Ağacı Modeli; belirli bir sistem-hata moduyla ilişkilendirilen tepe olaya göre modellenir ve bu modelde yalnızca bu tepe olayın oluşmasına katkıda bulunan hatalar dahil edilebilmektedir. Ayrıca bu hatalar kapsamlı değildir, yalnızca araştırmacının değerlendirdiği şekliyle en güvenilir yalın hataları kapsamaktadır.

Bütün olası sistem arızalarının bir hata ağacı modeli olmadığı gibi bir sistem arızasının bütün olası nedenlerinin de bir hata ağacı modeli olmayabilmektedir. Bu nedenle hata ağacı analizi nicel bir araştırma yöntemi olarak görülmemelidir (van Ta ve diğ., 2017).

Hata ağaçları olaylardan ve kapılardan oluşturulmaktadır. Temel olaylar (Basic Events); kazalara neden olan teknik olayları temsil etmek için kullanılabilirken, ara olaylar (Intermediate Events) teknik arızaları yoğunlaştırabilecek operatör hatalarını veya ara ekipmanları temsil edebilmektedir. Hata Ağacı'nın kapıları; makine arızaları ve insan hatalarının bir araya gelerek kazaya veya arızaya neden olduğu çeşitli yolları temsil etmek için kullanılabilir. Örneğin bir VE (AND) kapısı; ara olaya neden olmak için her iki ilk olayın da birlikte gerçekleşmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan bir VEYA (OR) kapısı; iki ilk olaydan birinin tek başına gerçekleşerek ara olaya neden olabileceği anlamına gelmektedir. Aşağıda bir Hata Ağacı modeli oluşturmak için en sık kullanılan araçların bir özeti sunulmaktadır:

- Üst olay ve ara olaylar: Dikdörtgen, tepe olayı ve herhangi bir ara olayı bir hata ağacında temsil etmek için kullanılmaktadır. Tepe olay, analiz edilen hata veya kaza olayı olacaktır. Ara olaylar, bir şekilde hata veya kazanın oluşmasına katkıda bulunan sistem durumları veya oluşumları olarak bilinmektedir.
- Temel olaylar: Daire, bir hata ağacındaki temel olayları temsil etmek için kullanılmaktadır. Hata ağacındaki en düşük seviyeyi oluşturmaktadırlar.
- Gelişmemiş olaylar: Elmas, insan hatalarını ve hata ağacında daha gelişmemiş olayları temsil etmek için kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de hata ağacı modelindeki olayları temsil eden semboller gösterilmiştir (Url-5).
- VE kapıları: Dikdörtgenin içindeki olay, dikdörtgenin altındaki VE kapısının çıkış olayı olarak nitelendirilmektedir. Bu kapıyla ilişkili çıkış olayı, yalnızca tüm giriş olaylarının aynı anda gerçekleşmesi durumunda mevcut olmaktadır.
- VEYA kapıları: Dikdörtgendeki olay, olayın altındaki VEYA kapısının çıkış olayı olarak nitelendirilmektedir. Giriş olaylarından en az birinin gerçekleşmesi durumunda, bu kapıyla ilişkili çıkış olayı mevcut olmaktadır.
- Transfer sembolleri: Hata ağacının farklı bir sayfada devam ettiğini belirtmek için kullanılmaktadır. Şekil 3.3’de hata ağacı modelindeki kapıları temsil eden semboller gösterilmiştir (Url-5).



Şekil 3.2 : Hata ağacı modelinde olayları temsil eden semboller.



Şekil 3.3 : Hata ağacı modelinde kapıları temsil eden semboller.

Hata Ağacı Analizi Prosedürü: Hata ağacı analizini gerçekleştirmek için uygulanması gereken işlemler aşağıda listelenmektedir.

- İlgili sistem tanımlanmalıdır. Hata veya arıza bilgisinin gerekli olduğu sistemin sınırları ve başlangıç koşulları belirtilmeli ve net bir şekilde tanımlanmalıdır.
- Analiz etmek için tepe olay tanımlanmalıdır. Analizin ele alınacağı ilgili sorun belirtilmelidir. Bu belirli bir kalite sorunu, operasyon yapılan sistemin çökmesi veya emniyet sorunları olabilmektedir.
- Hata ağacının tepe yapısı tanımlanmalıdır. Tepe olaya doğrudan yol açan olaylar ve koşullar (ara olaylar) belirlenmelidir.
- Hata ağacının her dalı ardışık ilişkileriyle birlikte belirlenmelidir. Her bir ara olaya en doğrudan neden olan olaylar ve koşullar belirlenmelidir. Hata ağacı modeli tamamlanana kadar, ağacın birbirini izleyen her seviyesinde bu işlem tekrarlanmalıdır.
- Tepe olaya katkıda bulunan olay kombinasyonları için bütün hata ağacı modeli incelenmelidir. Tepe olayın gerçekleşmesine neden olmak için asgari düzeyde gerekli olan olay ve koşulların bir kombinasyonuna minimal kesim kümesi denmektedir. Minimal kesim kümesi uygulaması yapılırken Boolean Matematiği'nin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Teorem olarak kullanılan kesim kümesi, minimal kesim kümesine indirgenmelidir (Kabir ve diğ., 2020).
- Önemli bağımlı hata potansiyelleri tanımlanmalıdır ve hata ağacı modeli buna göre ayarlanmalıdır. Olaylar arasındaki, potansiyel olarak önemli bağımlılıkları belirlemek için hata ağacı modeli ve minimum kesim kümelerinin listesi incelenmelidir. Bağımlılıklar, birden çok olayın veya koşulun aynı anda oluşmasına neden olabilecek olaylar olarak ifade

edilmektedir. Hata ağacı analizinin niteliksel bu adımı, ortak neden hata analizi şeklinde uygulanmaktadır.

- Nicel analiz gerçekleştirmelidir. Sistemin gelecekteki performansını tahmin etmek için hata ağacı modelindeki belirli hata olaylarının ve koşullarının gerçekleşmesi ve bunların düzeltilmesi ile ilgili istatistiksel tanımlamalar kullanılmaktadır.
- Karar vermek için sonuçlar kullanılmaktadır. Sistemdeki en önemli emniyet açıklarını belirlemek, bu emniyet sorunlarıyla ilişkili riskleri azaltmak ve etkili önerilerde bulunarak bu sorunlara çözüm üretmek için analiz sonuçları kullanılmalıdır.

3.1.1 Boolean matematiği

Hata Ağacı Analizinde; Boolean denklemleri kurulur, bu denklemler Boolean matematiğinin kurallarıyla analiz edilmekte ve bu sonuçlar doğrultusunda tündengelim yöntemiyle sistemin güvenilirliği test edilmektedir.

Boolean matematiği ile kurulacak denklemler için gerekli terimler şu şekilde açıklanmıştır:

X rastgele seçilmiş bir kümeyi ifade etmektedir. $P(X)$; X'in bütün alt kümelerinin sınıfını ifade etmektedir (X'in kuvvet kümesi). $P(X)$ üzerinde üç doğal, kuramsal kümeleme işlemi vardır ve P ve Q iki alt kümeyi ifade etmektedir. $P \cup Q$ birleşimi, tanım gereği P'de VEYA Q'da bulunan elemanların kümesini ifade etmektedir. $P \cap Q$ birleşimi, tanım gereği P ve Q kümelerinde bulunan elemanların kümesini ifade etmektedir. Tamamlayıcı P' tanımı, P kümesi içinde bulunmayan X elemanlarının kümesini ifade etmektedir. Bunun dışında iki ayırt edici alt küme vardır. Bunlardan biri elemanı olmayan boş küme $\emptyset$, diğeri de evrensel X kümesidir. $P(X)$ kümesi; birleşme, kesişme ve tamamlama işlemleri ile birlikte $\emptyset$ ve X alt kümelerinin birlikte işleme alınması Boolean matematiği olarak ifade edilmektedir.

En bilinen, en kullanışlı Boolean matematiği kuralları aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir (Zadeh, 1965).

$$\emptyset' = X, \quad X' = \emptyset \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de boş ve evrensel kümelerin tamamlayıcılarını oluşturan eşitlikler gösterilmiştir.

$$P \cap \emptyset = \emptyset, \quad P \cup X = X \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de gösterilen eşitlikler, boş küme ile bir kesişim kümesi oluşturmak ve evrensel küme ile bir birleşim kümesi oluşturmayı ifade etmektedir.

$$P \cap X = P, \quad P \cup \emptyset = P, \quad (3.3)$$

Denklem 3.3’de gösterilen eşitlikler: Özdeşlik kuralını ifade etmektedir.

$$P \cap P' = \emptyset, \quad P \cup P' = X, \quad (3.4)$$

Denklem 3.4’de gösterilen eşitlikler: Bütünleme kuralını ifade etmektedir.

$$(P')' = P, \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’te gösterilen eşitlik: Çift Bütünleme kuralını ifade etmektedir.

$$P \cap P = P, \quad P \cup P = P, \quad (3.6)$$

Denklem 3.6’da gösterilen eşitlikler: Etkisizlik kuralını ifade etmektedir.

$$(P \cap Q)' = P' \cup Q', \quad P \cup P = P, \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de gösterilen eşitlikler: De Morgan kuralını ifade etmektedir.

$$P \cap Q = Q \cap P, \quad P \cup Q = Q \cup P \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de gösterilen eşitlikler: Değişebilirlik kuralını ifade etmektedir.

$$P \cap (Q \cap R) = (P \cap Q) \cap R, \quad P \cup (Q \cup R) = (P \cup Q) \cup R \quad (3.9)$$

Denklem 3.9’da gösterilen eşitlikler: Birleşme kuralını ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} P \cap (Q \cup R) &= (P \cap Q) \cup (P \cap R), \\ P \cup (Q \cap R) &= (P \cup Q) \cap (P \cup R), \end{aligned} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da gösterilen eşitlikler: Dağılma kuralını ifade etmektedir.

Boolean matematiği, sembollerle temsil edilen olayların birbirleriyle olan ilişkileriyle ilgilenmektedir. Ancak buradaki sembolizm bütün disiplinler için aynı olmamaktadır. Semboloji; matematik, mantık ve mühendislik alanlarında Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi farklılıklar göstermektedir (Roberts ve Haasl, 1981). Kesişim ve birleşim işlemi gibi küme ilişkileri her ne kadar farklı disiplinlerde farklı sembolize edilseler de Boolean matematiği kuralları bu disiplinlerin hepsinde aynı şekilde işleme alınmaktadır.

3.1.2 Hata ağacı analizinin uygulanması

Hata ağacı analizi üç temel basamakta uygulanmaktadır. İlk adımda istenmeyen olay olarak belirlenecek arıza, hata veya olayın içerisinde bulunduğu sistem belirlenir ve detaylı olarak analiz edilmektedir. İkinci adımda bu sistemin Tepe Olay’ı (TE) belirlenir ve tepe olaya neden olabilecek bütün alt olaylar, ara olaylar ve birbirleriyle olan bağlantıları tespit edilmektedir. Bütün bu toplanan verilerle hata ağacı modeli oluşturulur. Son adımda da elde edilen bulguların analizi yapılarak sistem değerlendirilmesi yapılmış olmaktadır.

Çizelge 3.1 : Boolean matematiği sembollerinin farklı disiplinlerdeki karşılıkları
(Roberts ve Haasl, 1981).

Operasyon	Olasılık	Matematik	Mantık	Mühendislik
A ve B Birleşimi	A veya B	$A \cup B$	$A \vee B$	A+B
A ve B Kesişimi	A ve B	$A \cap B$	$A \wedge B$	A.B veya AB
A’nın Tamamlayıcısı	A değil	$A' veya \bar{A}$	-A	$A' veya \bar{A}$

Hata ağacı analizinde, tepe olayın oluşma ihtimalinin hesaplanmasının yanı sıra; tepe olaya giden her bir minimum kesim kümesinin etkileri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Tepe olayının “T” ile gösterildiği ve alt ile ara olayların sayısı N olan ve X_1 ’den X_N ’e kadar bağlanan olayların başarısızlığı X_i ve başarısızlık ihtimali $P(X_i)$; tepe olayın oluşma ihtimali $P(T)$ ile ifade edilirken VE ile VEYA kapıları ile birbirlerine bağlanmalarını ifade eden formulizasyon, denklem 3.11’de gösterilmiştir.

$$P(T) = \begin{cases} \prod_{i=1}^N P(X_i), & \text{VE kapısı için} \\ 1 - \prod_{i=1}^N \{1 - P(X_i)\}, & \text{VEYA kapısı için} \end{cases} \quad (3.11)$$

Tepe olayının bir hata ağacındaki gerçekleşme olasılığı, bu olayın gerçekleşmesi için minimum, gerekli ve yeterli olaylardan oluşturulan minimum kesim kümelerinin (MCS) elde edilmesiyle değerlendirilmektedir. C_i ($i=1, 2, \dots, NC$) şeklinde ifade edilen bütün MCS'ler belirlendikten sonra tepe olayın oluşma ihtimali $P(T)$ şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^N \{1 - P(C_i)\} \quad (3.12)$$

$P(C_i)$, C_i 'nin başarısız olma olasılığını ifade etmektedir. Temel olayların (BE) oluşma ihtimali küçük olduğu sürece ($P(X_i) \ll 1$); tepe olayının oluşma ihtimali bu denklemle iyi bir şekilde tahmin edilebilmektedir:

$$P(T) \approx \sum_{i=1}^{N_c} P(C_i) \quad (3.13)$$

Tipik bir minimum kesim kümesi temel olayların toplanmasıyla oluşturulmakta ve bu Minimum Kesim Kümeleri'nin hata ağacından belirlenmesi köklü bir prosedür takip edilerek yapılabilmektedir.

Hata ağacı modeli örneği Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu örnekte belirlenen sistemin tepe olayı olarak belirlenen TE'nin gerçekleşmesi için gerekli alt ve ara olaylar IE ve BE kodları numaralandırılarak gösterilmiştir. Bu örnek hata ağacı modelinin aritmetik çözümlemesi aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir. VE kapısı ile bağlanan olaylar kesişim kümesi olarak ifade edilirken VEYA kapısı ile bağlanan olaylar birleşim kümesi olarak ifade edilir.

$$TE = IE1 \cup IE2 \quad (3.14)$$

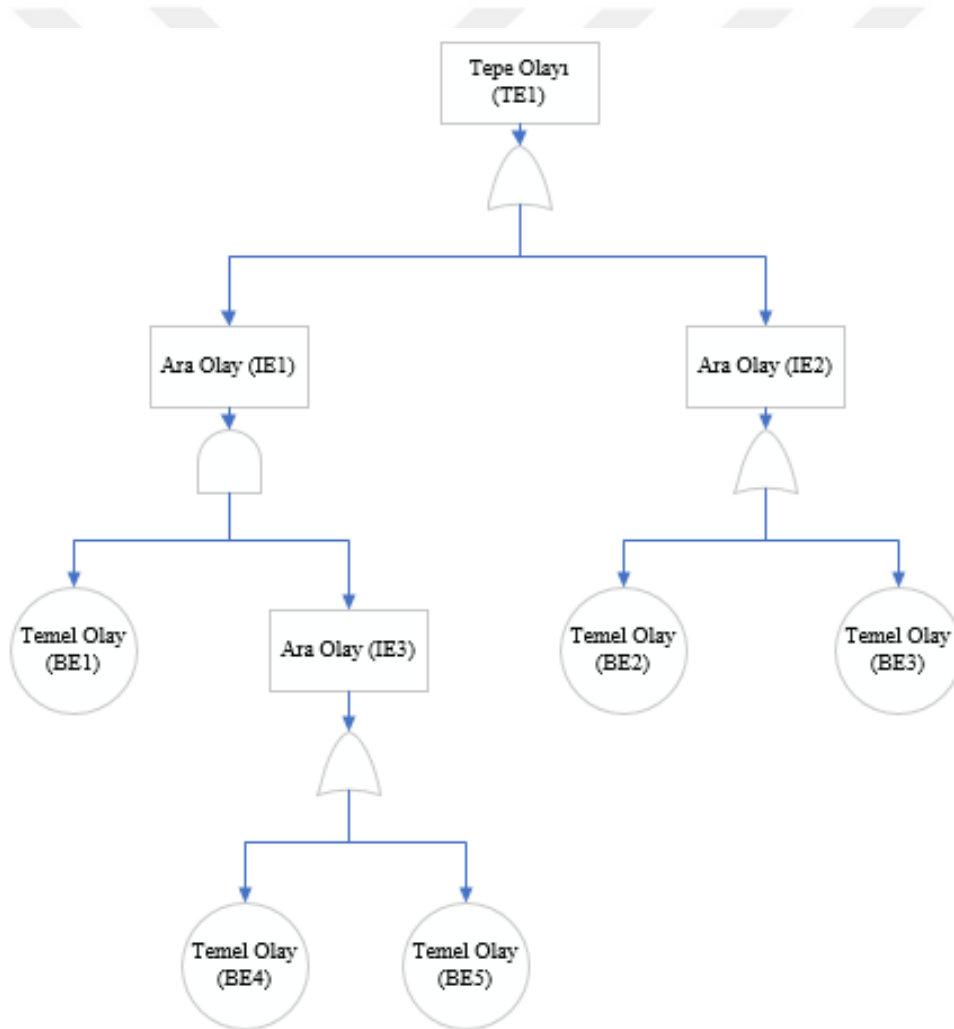
$$IE1 = BE1 \cap IE3 \quad (3.15)$$

$$IE2 = BE2 \cup BE3 \quad (3.16)$$

$$IE3 = BE4 \cup BE5 \quad (3.17)$$

Denklem 3.14'teki ara olaylara karşılık gelen denklemler yerlerine yerleştirilerek denklem tekrar düzenlendiğinde denklem 3.18 elde edilmektedir.

$$TE3 = (BE1 \cap (BE4 \cup BE5)) \cup (BE2 \cup BE3) \quad (3.18)$$



Şekil 3.4 : Örnek bir hata ağacı modeli.

3.2 Bulanık Mantık Kümesi Teorisi (Fuzzy Logic Set Theory)

1965'teki modern anlamda ortaya çıkışından bu yana, Bulanık Mantık Teorisi çeşitli şekillerde ve birçok disiplinde ilerlemiştir. Bu teorinin uygulamaları; yapay zeka, bilgisayar bilimi, tıp, kontrol mühendisliği, karar verme teorisi, mantık, yönetim bilimi, yöneylem araştırması ve robotik gibi disiplinlerde yaygın olarak görülmektedir. Matematiksel gelişmeler çok yüksek bir standarda ulaştığı ve hala gelişmeye devam ettiği bilinmektedir. 1992'den itibaren bulanık mantık teorisi ve sinir ağları teorisi; evrimsel programlama alanı olan hesaplamalı zeka veya esnek hesaplama adı altında bilinir hale gelmiştir. Zadeh ve Goguen tarafından bulanık mantık teorisi konusundaki ilk yayınlarda, yazarlar klasik küme kavramını genelleştirmek niyetiyle bulanıklaştırma önermesini sunmuşlardır. Bu önermede insan dili; insan yargılaması, değerlendirmesi ve kararlaştırılması olarak yer almaktadır.

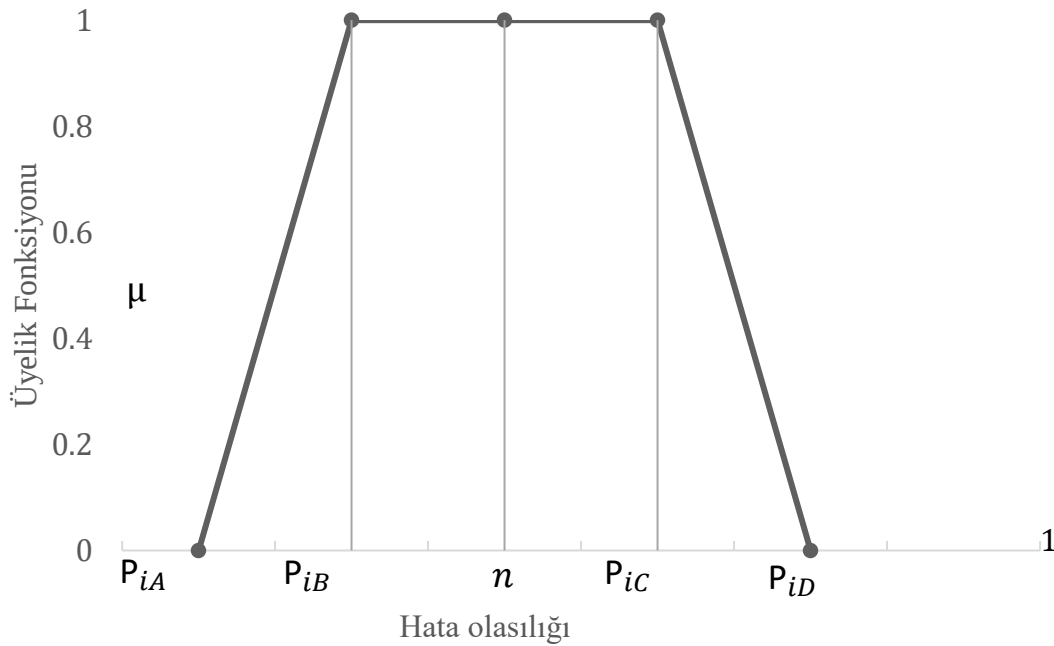
Modern anlamda bulanık mantık; belirsiz durumlar için kullanılabilecek sözlü ifadelerin matematiksel bir çerçeveye yerleştirilmesi işlemi olarak kullanılmaktadır (Zadeh, 1965). Aslında böyle bir çerçeve, belirsiz durumların kaynağının rastgele değişkenlerin varlığından ziyade daha belirgin değişkenler üzerine yoğunlaştırılması şeklinde yorumlanabilmektedir. Rastgele değişkenler; bir parametrenin değeri hakkındaki bilgi eksikliği anlamına gelmez, burada belirsizlik anlamında ifade edilmektedir. Bulanık küme teorisi, içinde kararsız kavramsal olguların kesin ve titiz bir şekilde ele alınabildiği katı bir matematiksel çerçeve sağlamaktadır. Bu şekilde kurulan bir bulanık küme teorisinde bulanık olan hiçbir şey yoktur. Bu nedenle; bulanık ilişkilerin, kriterlerin ve olguların olduğu durumlar için çok uygun bir modelleme dili olarak da düşünülebilmektedir (Huntington, 1904).

Klasik mantık teorisinde 0 ve 1 gibi kesin ve iki karşıt sınır değeri bulunurken, bulanık mantık teorisinde yaklaşık düşünce sistemi ve terimleri de göz önünde bulundurulduğu için ara değerler de yer almaktadır. Bu ara değerler bulanık sayıları ifade etmektedir. Bulanık mantık konusunun temel elemanı bulanık kümedir ve üyelik fonksiyonu denilen bulanık sayılar ile karakterize edilmektedirler. Bulanık kümeleri karakterize eden üyelik fonksiyonları değişik biçimlere sahip olmaktadır. Bu biçimler; üçgen, yamuk, gaussian ve çan eğrisi (Gauss) fonksiyonu biçiminde olabilmektedir. Ayrıca sigmoid, sinüsoid ve Cauchy gibi fonksiyonlar da ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmektedir (Sen, 2020). Denklem 3.19'da bir pozitif yamuk bulanık sayıyla

ilgili üyelik fonksiyonu gösterilmiştir. BE_i olayının gerçekleşebilmesi olasılığı ($\tilde{P}$); A, B, C ve D kenarları ile temsil edilen yamuk bulanık sayısının üyelik fonksiyonu Şekil 3.5'te μ ile gösterilmiştir (C. T. Chen ve diğ., 2006).

$$\mu_{\tilde{P}_{BE_i}(p)} = \begin{cases} 0 & 0 \leq p \leq P_{iA} \\ 1 - \frac{P_{iB} - p}{P_{iB} - P_{iA}} & P_{iA} \leq p \leq P_{iB} \\ 1 & P_{iB} \leq p \leq P_{iC} \\ 1 - \frac{p - P_{iC}}{P_{iD} - P_{iC}} & P_{iC} \leq p \leq P_{iD} \\ 0 & P_{iD} \leq p \leq 1 \end{cases} \quad (3.19)$$

Bulanık hata ağacı analizinde, bütün temel olayların oluşma olasılığı bulanık sayılarla ifade edilmektedir. Dolayısıyla, tepe olayın oluşma olasılığının tahmin edilebilmesi için bir hata ağacının VE ile VEYA kapılarına da bulanık mantık aritmetik işlemleri uygulanması gerekmektedir. Bulanık mantık aritmetik işlemleri; bulanık küme teorisinin kurallarını ve genişleme ilkesinin kullanımını içermektedir.



Şekil 3.5 : Üyelik fonksiyonunun hata olasılığının yamuk ile gösterilmesi (C. T. Chen ve diğ., 2006).

Bulanık küme teorisinin temel kavramları; tamamlayıcı, destek, α -kesimi, dışbükeylik, normallik, kardinalite ve bulanık kümenin n 'inci kuvveti olarak listelenmektedir (S.-J. Chen ve Hwang, 1992). $\bar{A}$ ile gösterilen A bulanık kümesinin tamamlayıcısı şu şekilde gösterilmektedir:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \forall x \in U \quad (3.20)$$

Bulanık bir kümede sıfır olmayan üyelik fonksiyonlarına sahip elemanların dikkate alınması gerekmektedir. Bu elemanlar bulanık kümenin desteği olarak ifade edilirler ve şu şekilde gösterilmektedir:

$$S(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (3.21)$$

A bulanık kümesinin α -kesimi; elemanları en az α derecesine kadar A bulanık kümesine ait olan sıradan bir küme olarak ifade edilmektedir. Aynı zamanda α -kesimi, bir bulanık küme desteğinin daha genel bir durumu olmaktadır. A bulanık kesimi için α -kesimi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$A_\alpha = \{x \in U \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (3.22)$$

Bir bulanık kümenin dışbükeyliği, uygulama açısından önemli bir özellik olmaktadır. Genel olarak bulanık küme dışbükeyliği şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)) \quad (3.23)$$

Bunun dışında kalan normallik, kardinallik ve bulanık kümenin m'inci kuvveti gibi kavramlar da dışbükeyliğe dahil olmaktadır.

Bir bulanık A kümesi, ancak ve ancak bir veya daha fazla x varsa normal olmaktadır.

A bulanık kümesinin kardinalitesi, U'nun A özelliğine sahip elemanlarının oranını değerlendirmektedir. U sonlu olduğunda şu şekilde ifade edilmektedir:

$$|A| = \sum \mu_A(x), \quad x \in U \quad (3.24)$$

Sonsuz U için kardinalite şu şekilde ifade edilmektedir:

$$|A| = \int_x \mu_A(x) dx \quad (3.25)$$

A bulanık kümesinin bağıl ya da göreceli kardinalitesi, A kümesinde bulunan U öğelerinin A'daki üyelik derecelerine göre ağırlıklandırılmış oranı olarak yorumlanabilmekte ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$||A|| = \frac{|A|}{|U|} \quad (3.26)$$

Bulanık kümenin m'inci kuvveti şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\mu_A^m = [\mu_A]^m \quad (3.27)$$

Dilsel modellemelerin matematiksel dönüşümü konusunda, bulanık kümenin m'inci kuvvet fonksiyonu oldukça kullanışlı olmaktadır. Örneğin, bir bulanık küme ifadesi olan “iyi” yorumunu dilsel olarak kuvvetlendirmek için “çok iyi” ifadesi kullanılırken bunun bulanık kümedeki karşılığı m'inci kuvveti yani bu örnekte 2'inci kuvveti olarak hesaplanabilmektedir (Dernoncourt, 2013).

Bir hata ağacının niteliksel değerlendirmesinden elde edilen minimum kesim kümeleri hata ağacı analizinin olasılıksal değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Bu olasılık yaklaşımında, sistem bileşenlerinin verilerindeki belirsizlikler; hem kesim kümelerinden tepe olaya kadar yayılır hem de hata ağacının duyarlılık analizini etkilemektedir. Bu nedenle temel olayların oluşma olasılıkları kesin olmazsa; bütün hata ağacının analizi, sistem güvenilirliği konusunda yanlış bir sonuç verebilecektir. Bulanık mantık bazlı olasılık analizi, bir temel olay verisini bulanık kümede tanımlamaya çalışmakta ve bunu sonraki hesaplamalarda kullanmaktadır. Son olarak; kesin bir tepe olay sonucu elde edebilmek için bu bulanık değer durulaştırılmalıdır (Ferdous, 2006). Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için izlenen prosedürler şu şekilde listelenmiştir:

- Temel olay olasılık verilerinin bulanık olasılık verilerine dönüştürülmesi,
- Tepe olayın bulanık olasılık verilerinin hesaplanması,
- En muhtemel hata veya arıza olasılığının tahmin edilmesi şeklinde olacaktır.

Bu metodoloji ile yapılan bulanık olasılık analizi, temel olay verilerini bulanık kümelere dönüştürmek için üç adım kullanmakta ve bir hata ağacının en tepe olayının gerçekleşme olasılığını hesaplamaktadır (Ferdous, 2006). Bu adımlar sırasıyla:

- I. Temel olayların net veri bulanıklaştırması,
- II. Bulanık tepe olay gerçekleşme olasılığının hesaplanması,
- III. Bulanık tepe olay gerçekleşme olasılığının durulaştırılması, şeklinde sıralanmaktadır.

3.3 Hassasiyet Analizi

Tepe olayının gerçekleşme olasılığı yalnızca mevcut sistemin koşulları hakkında fikir vermektedir. Hassasiyet analizi, tepe olayın oluşmasına etkisi olan her bir temel olayın yüzdesel olarak katkısının değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca sistemin en zayıf halkasının bulunarak modifikasyon kararı alınması, daha iyi bir tasarım alternatifine gidilmesi ve karar verilen çözümün sistemin emniyeti üzerine etkisinin nasıl değerlendirileceği konularının belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Contini ve diğ., 2000).

Hata ağacı modelinde minimum kesim kümeleri, sistemi tepe olayının gerçekleşmesine götüren temel olayların bir kombinasyonu olarak görülmektedir. Bu kesim kümeleri, hata ağacı analizinin en kritik unsurlarını oluşturmaktadır ve sistemin yapısal açıklarını belirleyebilmek için kullanılmaktadır. Bu kümelerin sayısı arttıkça sistem daha tehlikeli hale gelmektedir.

$$T = MCS_1 + MCS_2 + \dots + MCS_N = \prod_{i=1}^{n_c} MCS \quad (3.28)$$

3.4 Uzman Değerlendirmesi

Uzman değerlendirme, genellikle belirsiz olayların olasılıklarını hesaplamak için kullanılan bilimsel bir fikir birliği metodolojisi olarak ifade edilmektedir. Verilerin yetersiz olduğu ya da hiç ulaşılamadığı veya güvenilir olmadığı durumlarda, belirsizlik ile başa çıkabilmek için kullanılan bir yöntem olarak bilinmektedir (Ramzali ve diğ., 2015). Belirsiz olayların ve insan hatasından kaynaklanan olayların gerçekleşme olasılıklarının sadece olasılık değerleriyle hesaplanması zor olabilmektedir. Sözel değişkenler, geleneksel nicel ifadelerin makul bir şekilde karakterize edilebilmesi için etkili bir kavram olarak bilinmektedir (Zadeh, 1965). Buna göre bir sözel değişkenin değerleri doğal veya yapay dilde sözcükler veya cümleler olmaktadır. Chen ve Hwang; 1992 yılında yaptıkları çalışmada, sekiz farklı dönüşüm ölçeği sunmuşlardır. Bu dönüşüm ölçekleri için literatürdeki ilgili çalışmalar incelenmiş ve bu araştırmada kullanılmak üzere sentezlenmiştir (Wenstöp, 1976; Yager, 1979; Rajkovic, 1979; Yao ve Wong, 1992; Tong ve Efstathiou, 1982; P. Chen, 1988). Bu çalışmalara göre; farklı tecrübe ve bilgi birikimine sahip uzmanların görüşleri sözel olarak eşdeğer anlamda alınabilir ancak bu görüşleri sayısallaştırırken belirli bir ağırlık ölçeği kullanılması

gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada uzmanların sözel ifadelerine karşılık gelen değerlendirmeler bulanık sayılara dönüştürülürken Benzerlik Toplama Yöntemi (SAM) kullanılmıştır (Hsu ve Chen, 1996).

3.4.1 Elde edilen olasılıkların birleştirilmesi

Elde edilen olasılıkların toplanması: “S” ile gösterilen ifade E_u ve E_v uzman çifti arasındaki benzerlik derecesini belirlemek için kullanılmaktadır. $S_{uv}(R_u, R_v)$, uzman görüşlerini ifade etmektedir. Bu bağlamda $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ ve $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ kümeleri iki standart yamuk bulanık sayılarını ifade etmektedir.

$$S(A, B) = 1 - \frac{1}{\sum_{i=1}^4 |a_i - b_i|}, \quad S(A, B) \in [0,1] \quad (3.29)$$

A ve B arasındaki benzerlik arttıkça, görüşler arasındaki benzerlik de artmaktadır. Bir sonraki adımda uzmanlar arasındaki Ortalama Anlaşma (AA) derecesinin hesaplanması gösterilmektedir ve “M” toplam uzman sayısını ifade etmektedir.

$$AA(E_u) = \frac{1}{M-1} \sum_{u \neq v}^M S(R_u, R_v) \quad (3.30)$$

Bir sonraki adımda uzmanların Göreceli Anlaşma (RA) derecesi belirlenmektedir.

$$RA(E_u) = \frac{AA(E_u)}{\sum_{u=1}^M AA(E_u)} \quad (3.31)$$

Daha sonra uzmanların Fikir Birliği (Anlaşma) Katsayısı (CC) tahmin edilmektedir. Bu işlem için; $E_u (u=1, 2, \dots, M)$ eşitliği kullanılabilmekte ayrıca bu eşitlikte kullanılan (β) yumuşatma faktörü olarak ifade edilmektedir. $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ şeklinde ifade edilmektedir.

$$CC(E_u) = \beta \cdot w(E_u) + (1 - \beta) \cdot RA(E_u) \quad (3.32)$$

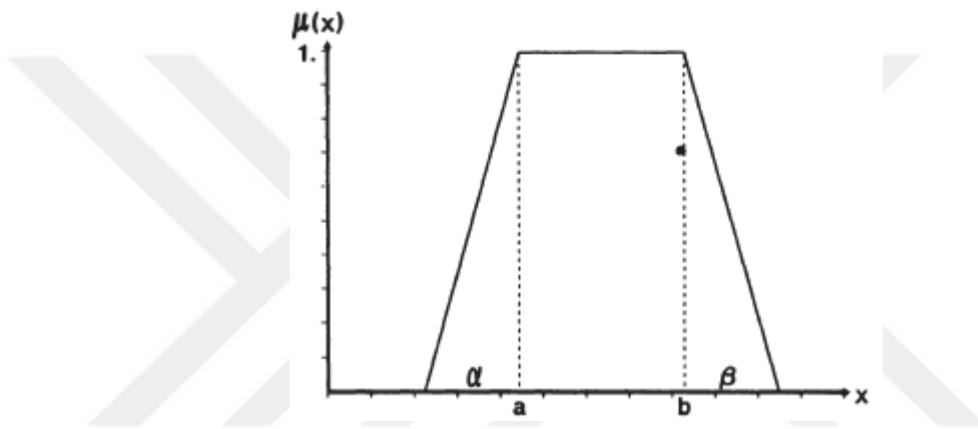
Bu adımın son aşaması, Uzman Görüşlerinin Toplanması (AG), bununla ilgili eşitlik denklem 3.32’te gösterilmektedir.

$$R_{AG} = \sum_{u=1}^M CC(E_u) \cdot R_u \quad (3.33)$$

Bonissone 1980 yılında yaptığı çalışmada, karar problemlerindeki bulanık ya da kesin bilginin parametre tabanlı bir ifadeyle yaklaşık olarak tahmin edilebileceğini varsaymıştır (Bonissone, 1980). Bu parametre tabanlı ifade L-R tipi yamuk bulanık sayılardır ve Şekil 3.6’da gösterilmiştir (a, b, α, β).

Uzman görüşleri toplanırken kullanılan sözel terimleri sayısal ifadeler dönüştürmek için bu yamuk bulanık sayılar kullanılmaktadır. Çizelge 3.2’de yamuk bulanık sayılar ile sözel terimlerin sayısallaştırılmasına bir örnek verilmiştir (Bonissone, 1980).

Ayrıca Şekil 3.7’de sözel değişkenleri temsil eden bulanık sayıların grafiği yer almaktadır.



Şekil 3.6 : L-R tipi yamuk ve bulanık sayılar (a, b, α, β).

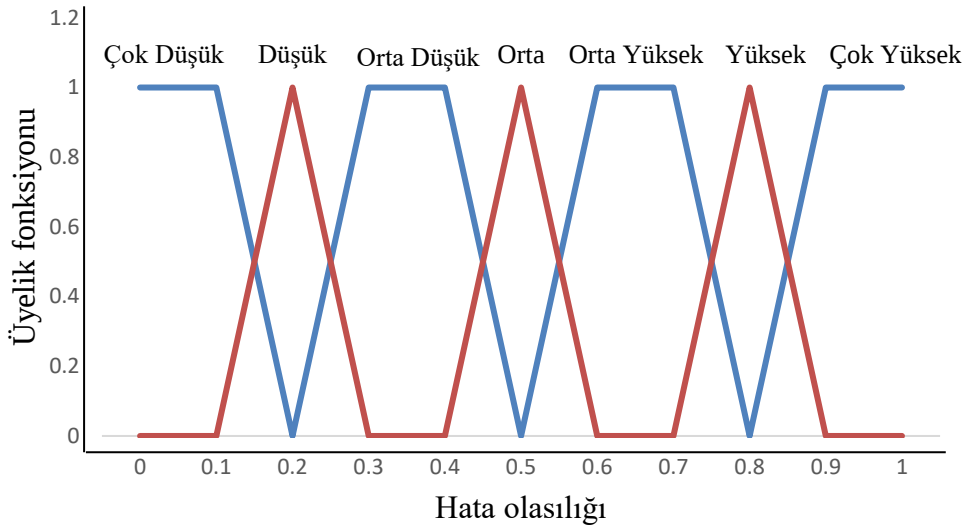
Çizelge 3.2 : Olasılıklar için kullanılan sözel terimler ve yamuk bulanık sayılarla ifadeleri (Bonissone, 1980).

Sözel Terimler	Bulanık Sayılar
Çok düşük (VL)	(0.0, 0.0, 0.1, 0.2)
Düşük (L)	(0.1, 0.2, 0.2, 0.3)
Orta düşük (ML)	(0.2, 0.3, 0.4, 0.5)
Orta (M)	(0.4, 0.5, 0.5, 0.6)
Orta yüksek (MH)	(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)
Yüksek (H)	(0.7, 0.8, 0.8, 0.9)
Çok Yüksek (VH)	(0.8, 0.9, 1.0, 1.0)

3.4.2 Birleştirilmiş uzman kararlarının durulaştırılması

Bulanık bir ortamda karar verebilmek için bulanık sayılar olarak birleştirilen uzman görüşlerinin durulaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle yamuk bulanık sayılar, kesin değerlere dönüştürülmektedirler. Bu amaçla Sugeno (1999) tarafından geliştirilen Ağırlık Merkezi (COG) veya Alan Merkezi (COA) tekniği uygulanmaktadır. İlgili eşitlik denklem 3.33'te gösterilmektedir ve “X” bulanık olasılığı, “ $u_i(x)$ ” birleştirilmiş üyelik fonksiyonunu ve “X” çıkış değişkenini ifade etmektedir.

$$X^* = \frac{\int u_i(x)xdx}{\int u_i(x)} \quad (3.34)$$



Şekil 3.7 : Sözel değişkenleri temsil eden bulanık sayıların üyelik fonksiyonları grafiği.

3.4.3 Minimum kesim kümelerinin (MCS) öneminin hesaplanması

Tepe olaya götüren en yüksek olasılıklı yolu belirlemek için kesim kümelerinin önemini ölçme işlemi uygulanmaktadır. Kesim kümelerinin hata ağacı içinde önemini ölçülebilmesi için her bir minimum kesim kümesinin bulanık fonksiyon çıktısının durulaştırma yöntemiyle kesin değere dönüştürülmesi gerekmektedir (Klir ve Yuan, 1995). Tepe olaya kesim kümesinin etkisi aşağıdaki denklem ile tahmin edilebilmektedir. Bu denklemde I^{ci} , kesim kümesinin önemini temsil ederken Q_j , kesim kümelerinin frekansının bulanık olasılığını, Q_0 ise tepe olayın oluşma olasılığını ifade etmektedir.

$$I^{ci} = \frac{Q_j}{Q_0} \times 100 \quad (3.35)$$

Bu tezin uygulamasında minimum kesim kümelerinin sıralama işlemi sistemin hassasiyet analizini ölçmek ve temel olayların tepe olayın oluşmasına etkilerini netleştirebilmek için kullanılmıştır. Bu sıralama işlemi için Vesely-Fussel Önem Ölçüm Yöntemi (V-FIM) kullanılmıştır ve $I_i^{FV}(t)$ şeklinde ifade edilmektedir. Ayrıca $Q_i(t)$, “i” kesim kümesinin hata oluşturma olasılığını ve $Q_s(t)$, tepe olayın oluşma olasılığını ifade etmektedir (Badida ve diğ., 2019).

$$I_i^{FV}(t) = \frac{Q_i(t)}{Q_s(t)} \quad (3.36)$$



4. GEMİ TURBOŞARJIR SİSTEMİ ARIZALARININ BULANIK MANTIK HATA AĞACI METODU İLE ANALİZİ

Bu tez çalışmasının temel amacı; gemi kritik ekipmanlarından olan turboşarjır sistemini ana makine özelinde değerlendirerek olası arıza ve hataların oluşma ihtimallerini analiz etmek ve bulunan sonuçlara göre önlemler belirlemektir. Böylece arıza ve hataların oluşma ihtimalleri azaltılarak turboşarjır sisteminin daha verimli çalışması sağlanacaktır. Enerjinin geri kazandırılması yasasına bağlı olarak çalışan turboşarjır sistemi yakıt tüketiminin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve en önemlisi de gemilerden kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması konusunda büyük rol sahibi olacaktır.

Turboşarjır sistemi hem iki stroklu hem de dört stroklu ana makinesi olan gemilerde ortak olan ekipmanlar olarak bilinmektedir. Önceki bölümlerde detaylı olarak açıklandığı gibi iki stroklu makinelerin süpürme portlu farklı yapılarından dolayı turboşarjır sistemlerinde de bazı farklılıklar olmaktadır. Ayrıca turboşarjır sistemi bütün gemi ana makinelerinin ortak ekipmanı olduğu gibi gemi yardımcı makinelerinden dizel jeneratörlerin de ortak ekipmanı olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu bölümde hem makine dairesi operasyonlarında kritik ekipman sayılan hem de enerji verimliliğine büyük ölçüde katkıda bulunan gemi turboşarjır sistemlerinin olası hata ve arızalarının risk analizi yapılmıştır. Yöntem olarak hata ağacı analizi ve bulanık mantık yaklaşımı belirlenmiştir. Bu araştırma yönteminin uygulanabilmesi için bir yol haritası çıkarılmıştır. Şekil 4.1’de grafiği bulunan bu yol haritasının ilk adımı olarak sistemin analizi yapılmıştır. Daha sonra Tepe Olay (TE) olarak ana makine (ME) turboşarjır (T/C) sorunu belirlenmiştir. Bununla birlikte hata ağacı modelini oluşturmak için gerekli olan ara olaylar ve temel olaylar birbirleriyle olan ilişkileri de göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bir sonraki adımda, toplanan bu veriler ile Hata Ağacı Modeli oluşturulmuştur. Daha sonra M/E T/C hata veya arızasının gerçekleşme olasılıklarını tahmin etmek amacıyla, bir önceki adımda

belirlenen ara ve temel olayların gerçekleşme ihtimallerini tahminlemek için sorular oluşturulmuştur. Bir sonraki adımda bu sorular uzmanlara sorularak tahmin verileri toplanmıştır. Daha sonra, toplanan bu veriler bulanık mantık yaklaşımı ile analiz edilmiştir. Böylece her bir alt ve ara olayın, tepe olayın gerçekleşmesine olan bireysel etkileri bulunmuştur. Bulanık sayı değerleri olarak bulunan bu değerler durulaştırılarak net bir puanlama sistemine dönüştürülmüştür. Bu puan sistemiyle sistemin başarısızlık oranları bulunmuştur. Sonuç olarak hem Tepe Olayın Başarısızlık Olasılığı hem de her bir kesme kümesinin tepe olayın gerçekleşmesine olan etkisi bulunmuştur. Temel soruna etkisi en fazla olan olaylar üzerinden bir önleyici ve düzeltici faaliyet belirleme çalışması yapılmıştır ve bunun enerji verimliliğine etkileri araştırılmıştır.



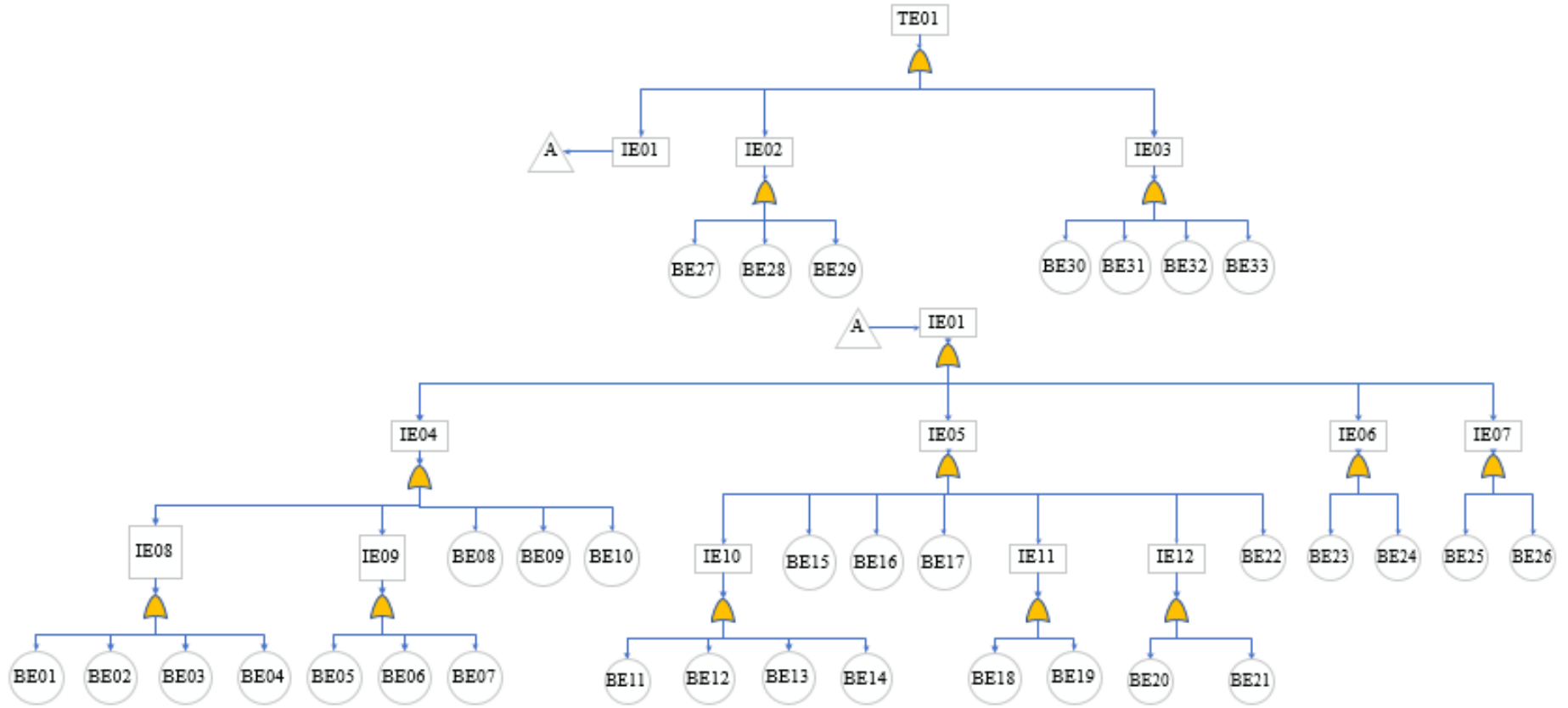
Şekil 4.1 : Bulanık hata ağacı analizi için temsili bir yöntem haritası.

Öncelikle turboşarjör sisteminde en yaygın olarak meydana gelebilecek mekanik arızalar ve personel ya da dış etkenlerden kaynaklanabilecek hatalar belirlenmiştir. Bu mekanik arızalar; turboşarjör sisteminin operasyonuna göre belirlenmiş dört temel ekipman üzerinden değerlendirilmiştir. Olası arıza ve hatalar belirlenirken, üretici firmaların sirküler olarak gemilere sağladığı raporlar ve turboşarjör sistemlerine ait üretici firma kitapları incelendikten sonra bir liste oluşturulmuştur (ABB Turbo Systems, 2005; MAN Diesel & Turbo engines, 2016; Mitsubishi MET Turbocharger, 2008). Daha sonra bu liste hata ağacı analizine uygun olacak şekilde kategorize

edilmiştir. Ayrıca bu liste hazırlanıp kategorize edilirken literatürdeki turboşarj arıza ve hatalarını içeren çalışmalardan da yararlanılmıştır (Adamkiewicz, 2012; Andersson ve Kisbenedek, 2018; Knežević ve diğ., 2020).

Yapılan bu kategorizasyon ile ara olaylar ve temel olaylar belirlenmiştir. Tepe olay, ara olaylar ve temel olaylar uygun kapılarla birlikte hata ağacına yerleştirilmiş, böylece hata ağacı modeli Şekil 4.2’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Ayrıca Çizelge 4.1’de de tepe olay, ara olaylar ve temel olaylar da harf kodlarıyla birlikte listelenmiştir.





Şekil 4.2 : Gemi turboşarjır sistemi hata ağacı analizi modeli.

Çizelge 4.1 : Hata ağacı modelindeki olayların harf kodları ile listesi.

Olay Kodu	Olay Türü
TE01	Gemi ana makine turboşarjır arızası
IE01	Mekanik faktörler
IE04	Hava tarafı arızaları
IE08	Hava kısıtlaması
BE01	Kirli hava filtresi
BE02	Tıkalı kompresör hava giriş kanalı
BE03	Tıkalı hava kanalı (Kompresörden emme manifolduna)
BE04	Tıkalı ya da kısıtlı emme manifold
IE09	Hava sızıntısı
BE05	Hava temizleyiciden kompresöre giden beslemede hava sızıntısı
BE06	Kompresörden emme manifolduna giden beslemede hava sızıntısı
BE07	Emme manifoldu ile ana makine arasında hava sızıntısı
BE08	Kompresör kanadı arızası
BE09	Labirent seal hasarı veya sızdırması
BE10	Surging (Sörçing)
IE05	Egzoz tarafı arızaları
IE10	Egzoz gazı sızıntısı
BE11	Türbin çıkışında egzoz sızıntısı
BE12	Türbin girişi ile egzoz manifoldu bağlantısında egzoz sızıntısı
BE13	Türbin çıkışından sonraki devrede egzoz sızıntısı
BE14	Egzoz manifoldunda çatlak, conta deformasyonu ya da eksikliği
BE15	Tıkalı veya kısıtlı turboşarjır yağ tahliye devresi
BE16	Tıkalı veya kısıtlı ana makine crankcase havalandırıcısı
BE17	Turboşarjır yataklarında sludge veya kurum birikmesi
IE11	Egzoz kanalında kirlilik
BE18	Egzoz manifoldunda yabancı madde (Makineden gelen)
BE19	Tıkalı veya kısıtlı egzoz sistemi
IE12	Türbin kanatlarında bozukluk
BE20	Kirlenmiş türbin kanatları
BE21	Hasarlı türbin kanatları
BE22	Nozzle ring'te hasar oluşumu

Çizelge 4.1 (devam) : Hata ağacı modelindeki olayların harf kodları ile listesi.

Olay Kodu	Olay Türü
IE06	Şaft sorunları
BE23	Yatakların hasar görmüş olması
BE24	Yağlama kaybı
IE07	Hava soğutucu arızaları
BE25	Tıkanmış soğutucu boruları
BE26	Soğutucu hava tıkanıklıkları
IE02	İnsan faktörü
BE27	Uygunsuz makine komutları
BE28	Emniyetsiz davranış
BE29	Eğitim ve tecrübe eksikliği
IE03	Dış faktörler
BE30	İlişkili ekipmanlarda oluşan arıza
BE31	Yetersiz ekipman
BE32	Olumsuz ortam koşulları
BE33	Olumsuz hava koşulları

Hata ağacında bulunan bu olayların gerçekleşebilme olasılıklarını hesaplayabilmek için gemi makineleri işletme ve operasyonunda tecrübeli uzmanlardan güvenilir görüşler alınma yoluna gidilmiştir. BE01 ile BE33 arasındaki temel olaylar için hata olasılıkları bulanık mantık ile belirlenmiştir. Bu adımda uzmanlar tarafından kullanılan sözel değişkenlerin sayısal ifadelere dönüştürülebilmesi için yamuk bulanık sayılar kullanılmıştır.

Uzmanlardan sözel değerlendirmeler alınırken daha önceki bölümde açıklanan yöntemlerden yedi değişkenli sistem kullanılmıştır. Buna göre Çok Düşük (VL), Düşük (L), Orta Düşük (ML), Orta (M), Orta Yüksek (MH), Yüksek (H) ve Çok Yüksek (VH) sözel ifadeleri kullanılmıştır. BE01 ile BE33 arasındaki olayların hata tahminini yapabilmek için uzmanlardan alınan sözel değerlendirmeler Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Araştırmaya katılan uzmanlar için belirlenen ağırlıklı değerlendirme oranları Çizelge 4.3’de gösterilmiştir ve uzmanların ağırlık faktörleri bu tabloya göre hesaplanmıştır.

Çalışmaya katılan uzman grubuna ait bilgiler Çizelge 4.4’de gösterilmektedir. Uzmanlardan alınan sözel değerlendirmeler ile hata ağacına ait veriler elde edildikten sonra, uzmanların karakteristik özellikleri üzerinden bir ağırlık puanı hesabı da yapılarak bulanık yamuk sayıları olarak toplanan veriler birleştirilmiştir.

Çizelge 4.2 : Temel olayların ihtimalleri için yapılan uzman değerlendirmeleri.

	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
BE 01	H	H	H	MH	MH	H	H	H	M
BE 02	MH	MH	M	M	MH	ML	ML	M	MH
BE 03	M	M	M	M	MH	L	ML	MH	ML
BE 04	M	M	M	L	L	L	M	M	ML
BE 05	ML	ML	M	ML	M	ML	ML	M	M
BE 06	ML	L	MH	L	MH	ML	ML	M	M
BE 07	ML	L	MH	L	MH	ML	ML	M	M
BE 08	ML	MH	M	ML	MH	L	MH	MH	ML
BE 09	M	MH	MH	MH	M	ML	MH	ML	M
BE 10	MH	MH	MH	MH	MH	MH	ML	MH	MH
BE 11	M	M	MH	MH	ML	ML	MH	MH	M
BE 12	M	M	M	ML	MH	ML	M	MH	M
BE 13	M	ML	ML	ML	ML	ML	M	M	M
BE 14	MH	MH	H	H	MH	M	H	M	MH
BE 15	L	MH	M	M	M	L	ML	MH	H
BE 16	M	MH	ML	M	M	M	H	M	MH
BE 17	L	H	H	H	ML	ML	H	MH	VH
BE 18	MH	MH	VH	ML	H	L	M	ML	H
BE 19	M	H	H	M	H	L	M	H	H
BE 20	MH	M	H	VH	MH	M	H	MH	VH
BE 21	M	H	H	H	VH	ML	H	MH	VH
BE 22	MH	H	VH	VH	MH	ML	H	H	VH
BE 23	L	H	MH	M	VH	L	MH	ML	VH
BE 24	L	VH	H	M	VH	L	M	ML	VH
BE 25	L	M	H	H	ML	ML	H	M	M
BE 26	L	M	ML	M	ML	ML	M	ML	M
BE 27	H	H	H	H	MH	H	M	MH	MH
BE 28	H	H	ML	ML	M	MH	H	M	MH
BE 29	MH	H	VH	VH	M	H	H	H	MH
BE 30	M	ML	MH	H	M	M	H	ML	M
BE 31	M	ML	M	M	M	ML	M	ML	M
BE 32	ML	L	ML	MH	MH	ML	H	M	M
BE 33	ML	L	H	ML	MH	L	ML	M	M

Uzmanların Ortalama Anlaşma (AA), Göreceli Anlaşma (RA) ve Anlaşma Katsayısı (CC) değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Uzmanların karakteristik özelliklerine göre ağırlık faktörleri.

Kriterler	Derecelendirme	Ağırlık Faktörü
Deniz Hizmet Süresi	1-2 yıl	1
	3-4 yıl	2
	5-7 yıl	3
	8-10 yıl	4
	10+ yıl	5
Kara Hizmet Süresi	1-2 yıl	1
	3-4 yıl	2
	5-7 yıl	3
	8-10 yıl	4
	10+ yıl	5
Eğitim Seviyesi	Lise	1
	Yüksek Okul	2
	Lisans	3
	Yüksek Lisans	4
	Doktora	5

Çizelge 4.4 : Çalışmaya katılan uzmanların karakteristik özellikleri ve ağırlık faktörleri.

Uzmanlar	Uzmanlık Derecesi	Deniz Hizmet Süresi	Kara Hizmet Süresi	Eğitim Seviyesi	Ağırlık Faktörü
Uzman 1 (U1)	İkinci Mühendis	7	0	Lisans Derecesi	0,10
Uzman 2 (U2)	Makine Enspektörü	6	1	Lisans Derecesi	0,10
Uzman 3 (U3)	İkinci Mühendis	5	0	Lisans Derecesi	0,10
Uzman 4 (U4)	İkinci Mühendis	5	0	Yüksek Lisans	0,10
Uzman 5 (U5)	İkinci Mühendis	7	0	Yüksek Lisans	0,10
Uzman 6 (U6)	Akademisyen	4	3	Yüksek Lisans	0,12
Uzman 7 (U7)	İkinci Mühendis	5	1	Yüksek Lisans	0,12
Uzman 8 (U8)	Baş Mühendis	10	0	Lisans Derecesi	0,13
Uzman 9 (U9)	Baş Mühendis	10	0	Lisans Derecesi	0,13

Uzman yargıları birleştirildikten sonra bir sonraki adım verilerin durulaştırılmasıdır. Bulanık sayılar olarak elde edilen değerler bu adımda kesin sayısal değerlere dönüştürülür. Böylece temel olayların olasılık değerleri elde edilmiş olmaktadır.

Çizelge 4.5 : BE01 için bulunan uzmanlara ait AA, RA ve CC değerleri.

Uzman	AA	RA	CC
1	0,925	0,12	0,107
2	0,925	0,12	0,107
3	0,925	0,12	0,107
4	0,868	0,11	0,104
5	0,868	0,11	0,104
6	0,925	0,12	0,117
7	0,925	0,12	0,117
8	0,925	0,12	0,122
9	0,737	0,09	0,110

Bulanık mantık ve uzman görüşleri ile elde edilen hata olasılıkları, hata ağacı diyagramındaki mantık kapılarına göre tekrar hesaplanmıştır. Sonuç olarak tepe olayın (TE01) oluşma ihtimali 3,20E-01 olarak bulunmuştur. Ayrıca Çizelge 4.6’da minimum kesim kümelerine ait olasılık değerleri ve V-FIM değerleri verilmiştir. Böylece minimum kesim kümelerinin sıralanması ile hassasiyet analizi yapılmıştır. Bu aynı zamanda her bir temel olayın, tepe olayın oluşması üzerinde bireysel etkilerinin ortaya çıkması anlamına gelmektedir.

Elde edilen analiz sonuçlarına göre tepe olayın oluşmasına neden olabilecek temel olaylar, gerçekleşme olasılıklarına göre sıralanmıştır. Bu sonuçlara göre; olasılık değeri yüzde 2’den büyük olan temel olaylar beş adet olacak şekilde belirlenmiştir ve gerçekleşme ihtimalleri yüksekten düşüğe olmak üzere aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. BE22: Nozzle Ring’te hasar oluşumu,
2. BE29: Eğitim ve tecrübe eksikliği,
3. BE01: Kirli hava filtresi,
4. BE21: Hasarlı türbin kanatları,
5. BE28: Emniyetsiz davranış şeklinde belirlenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre gerçekleşme ihtimali en yüksek ilk beş ihtimal olarak belirlenen bu temel olaylar, turboşarjının verimli çalışmasının önüne geçebilecek ya da çalışmasını tamamen engelleyebilecek şekilde arıza ve hatalara neden olabilecek en yüksek ihtimalli olaylar olarak bulunmuştur. Bu aynı zamanda bu temel olaylarla ilgili bütün operasyonları tehlikeli ve önemli kategorisine almamızı gerektirmektedir.

Gemi turboşarjör sistemleri enerjinin geri dönüşümü prensibiyle çalıştıkları için enerji verimliliğine ve yakıt tüketimine doğrudan etki ederek çalışmaktadırlar. Bu nedenle bu tehlikeli ve önemli kategorisindeki olaylar üzerine düşünülmesi ve gerekli aksiyonların alınması gerekmektedir.

Çizelge 4.6 : Minimum kesim kümelerine ait olasılık ve V-FIM değerleri.

Minimum kesme seti	Olasılık değeri	V-FIM
BE01	2,31E-02	7,21E-02
BE02	6,29E-03	1,96E-02
BE03	3,93E-03	1,23E-02
BE04	2,07E-03	6,46E-03
BE05	2,69E-03	8,40E-03
BE06	2,67E-03	8,34E-03
BE07	2,67E-03	8,34E-03
BE08	4,50E-03	1,41E-02
BE09	6,19E-03	1,93E-02
BE10	1,10E-02	3,43E-02
BE11	6,39E-03	2,00E-02
BE12	5,03E-03	1,57E-02
BE13	2,72E-03	8,49E-03
BE14	1,47E-02	4,59E-02
BE15	4,61E-03	1,44E-02
BE16	7,10E-03	2,22E-02
BE17	1,30E-02	4,06E-02
BE18	8,43E-03	2,63E-02
BE19	1,30E-02	4,06E-02
BE20	1,97E-02	6,15E-02
BE21	2,27E-02	7,09E-02
BE22	2,79E-02	8,71E-02
BE23	8,46E-03	2,64E-02
BE24	9,10E-03	2,84E-02
BE25	6,28E-03	1,96E-02
BE26	2,37E-03	7,40E-03
BE27	1,82E-02	5,68E-02
BE28	2,03E-02	6,34E-02
BE29	2,75E-02	8,59E-02
BE30	6,84E-03	2,14E-02
BE31	3,46E-03	1,08E-02
BE32	4,47E-03	1,40E-02
BE33	2,91E-03	9,09E-03

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde bir Gemi Turboşarjır Sisteminin Bulanık Hata Ağacı Analizi sonuçlarına göre bulunan, gerçekleşme ihtimali en yüksek olan beş temel olay için önleyici ve düzeltici çalışmalar üzerinde durulmaktadır.

- 1- Nozzle Ring'te hasar oluşumu: Nozzle Ring, turboşarjır sisteminin en önemli parçalarından biri olarak görülmektedir. Dizel makinelerde ağır yakıtların yakılması nedeniyle turboşarjırların türbin kanatları ve nozzle ring'lerinde kirlenme, verimsiz yanma ve egzoz gazı içerisindeki yanmamış maddeler dolayısıyla hasar görme olayları meydana gelmektedir. Hali hazırda üretici ve işletmeciler firmalar nozzle ring'in önemini farkında oldukları için hem operasyonel anlamda önlemler almakta hem de modifikasyon ya da malzeme değişimi gibi yollara gitmektedirler.

Bu çalışmada kısa, orta ve uzun vadeli düzeltici faaliyetler üzerinde durulmaktadır.

Kısa vadede; yanma olayı sonucu oluşan egzoz gazı turboşarjır içerisinden geçerken neden olduğu birikintilere; kurum, erimiş kül, cüruf, tamamı yanmamış yakıt ve inorganik bileşikler gibi yanma ürünleri neden olmaktadır. Nozzle ring'in en verimli şekilde çalışması için turboşarjırın türbin tarafına yapılan kuru ve ıslak temizlik işlemleri konusunda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Makine ve turboşarjır modellerine göre değişmekle birlikte kuru yıkama için kullanılan granüllerin kalınlığı ve özellikleri değiştirilmesi veya hem ıslak hem de kuru yıkama sıklıklarının üretici firmadan gelecek geri dönüşlere ve servis mektuplarına göre değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu ıslak ve kuru yıkamanın doğru ve etkili yapılması için bütün vardiya mühendislerine eğitim verilmesi ve bu eğitimlerin düzenli aralıklarla tazelenmesi gerekmektedir.

Orta vadede; nozzle ring'in temizlenme ve çatlaklar ile korozyon için yapılan görsel kontrolü için uygun görülen planlı bakım tutum (PMS) aralığının

düşürülmesi gerekmektedir. Örneğin, iki farklı üretici firmanın nozzle ring kontrol ve temizliği için maksimum kontrol aralıkları birinde her 12000 saat çalışma süresi iken diğerinde 8000 saat olarak belirtilmiştir. Ayrıca yoğun makine performansı, olumsuz hava koşullarında uzun süre çalıştırma ve yakıt analizi uygun değerler içinde olduğu için kullanılan ancak nozzle ring'te kirlenme ve hasar oluşmasına neden olan kalıntıların ortaya çıkmasına neden olabilecek sınır değerlerde olan yani kötü özellikli olan yakıtların yakılması sonrası bu periyotların da kısaltılması ve ilgili raporlamaların yapılması da önemli olduğu düşünülmektedir.

Uzun vadede; nozzle ring'in geliştirilmesi için ar-ge çalışmaları devam etmektedir. Bazı üretici firmalar hali hazırda; uzatılmış kullanım ömrüne sahip yeniden tasarlanmış dökme demir nozzle ring tasarımları üzerine çalışmaktadır. Uygun makine ve turboşarjır modeline göre bu yenilenmiş nozzle ring'lerin donatılması uzun vadede nozzle ring'in hasar görmesinin önüne geçeceği gibi daha verimli çalışabilecektir.

- 2- Eğitim ve tecrübe eksikliği; özellikle dinamik çalışma ortamlarında tehlike ve risk teşkil eden ekipmanların verimli çalışabilmesi gereken en önemli kriterlerden biri doğru operasyonu ve ortamın emniyeti sağlamak olacaktır. Bu nedenle ilgili personelin eğitim almış olması gerekmektedir. Ayrıca insan hatasını minimuma düşürebilmek için bu eğitimin düzenli periyotlarla sürekli tazelenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla turboşarjır sisteminin verimli ve emniyetli operasyonu için vardiya zabitlerinin eğitim alması ve bu eğitimlerin de düzenli olarak tazeleniyor olması gerekmektedir.

Ayrıca günümüz dünya şartlarında her teknolojik ekipmanın sürekli gelişim gösterdiği de göz önünde bulundurulmalı ve gerekli görülebilecek durumlarda bu eğitim periyodlarına ekleme yapılması gerekmektedir.

- 3- Kirli hava filtresi; hava filtresinin kirlenmesi ve bu nedenle oluşabilecek hava akış kanallarının kirlenmesi, enerji dönüşümünün kalitesini önemli ölçüde ve olumsuz olarak etkilemekte ve yakıt tüketiminin artmasına da doğrudan neden olabilmektedir. Hava filtresinin kirlenmesi; hava filtreleme özelliklerinin kaybı, sızdırmazlık özelliğinin azalması veya kaybı ve akış direncinde artış gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Kirlilik arttıkça özellikle hava akış direnci artacağı için yanma için gerekli hava sağlanamayacak ve hem yanma basıncı hem de enjektör zamanlaması olumsuz olarak etkilenecektir. Yanma sürecine doğrudan

ve olumsuz olan bu etkilerin turboşarjır ve makine verimini direkt olarak düşüreceği bilinmektedir. Yanma sürecindeki bozukluklar özellikle egzoz gazı makine çıkış ve türbin çıkış sıcaklıklarını yükselteceğinden ana makinenin slow-down ve shut-down alarmlarına geçmesine sebep olabilmektedir.

Turboşarjır üreticileri, hava filtresinin değiştirilmesi veya temizliği için gereken maksimum operasyon sürelerini belirtmektedirler. Özellikle ilgili personelin bu işi yapması ve zabıtlar tarafından kontrol edilmesi oldukça önemli olarak görülmektedir. İşletmecilerin de teknik departmanlarının PMS sisteminde işin düzenli yapıldığından; gerekli ve uygun malzeme tedariğinin sağlandığından emin olması gerekmektedir.

Ayrıca filtre bakım-tutum periyodları içerisindeyken de olumsuz durumlara karşı görsel kontrollerin yapılması da önemli olmaktadır. Özellikle, tozlu ve kumlu bölgelerde seyir veya uzun liman ve demir periyodları sırasında sıklıkla kontrol edilmesi gerekmektedir.

Hava filtresinin kirlenmesi, ana makine çalışma parametrelerinin bazılarını doğrudan etkileyecektir. Bu nedenle özellikle şarj havası basıncının da sıklıkla kontrol edilmesi gerekmektedir.

- 4- Hasarlı türbin kanatları; türbin kanatları, silindirlerde yanma sonucu oluşan ve yüksek sıcaklıklarda olan egzoz gazlarına maruz kalmakta dolayısıyla kullanılan yakıtın özellikleri ve yanma kalitesi gibi şartlardan direkt olarak etkilenmektedir. Verimsiz yanma nedeniyle egzoz gazına karışan, yanmamış karbon ve kurum parçaları türbin kanatlarında ve nozzle ring'te kirlenmeye ve hasara neden olabilmektedir.

Ayrıca silindirlerden gelecek kırık piston segmanları veya kırık valf parçaları gibi malzemeler türbin kanatlarında ciddi hasarlara neden olabilmektedir.

Türbin kanatlarında meydana gelebilecek bir hasarın, makinenin yanma sürecine ve yanma kalitesine doğrudan etki edeceği düşünülmektedir. Bu da ortalama efektif basıncın düşmesi, maksimum yanma basıncının azalması ve sıkıştırma basıncının düşmesi gibi sonuçların oluşmasına neden olmaktadır.

Türbin kanatlarında hasar oluşmaması için alınması gereken en önemli tedbirin türbin tarafı yıkama operasyonunun iyileştirilmesi olduğu düşünülmektedir. Kuru veya ıslak yıkama uygulamasının, üretici firmanın talimatları doğrultusunda uygun periyodlarla yapılması gerekmektedir. Ayrıca daha önce sözü edildiği gibi kötü yakıt yakılması, makinenin diğer faktörlerden dolayı

uzun süre kötü yanma ile çalıştırılmış olması ve olumsuz hava koşullarında uzun süre seyir yapma gibi olağandışı durumlarda, türbin yıkama periyodlarının azaltılması gerekmektedir.

Ayrıca türbin tarafı yıkama ekipmanlarının bakımlarına da dikkat edilmesi gerekmektedir. Hem su sprey sistemi hem de granül çekirme ünitesi operasyonlarının etkili bir şekilde yapıldığından emin olunması gerekmektedir. Aksi takdirde, bu operasyonlar makine çalışırken yapıldığı için ve özellikle kuru temizlik tam yüklerde yapılabildiği için yanlış bir yıkama operasyonu yapıldığında; ana makine parametrelerinde anlık olumsuz etkilere neden olarak slow-down ve shut-down gibi alarmların gelmesine sebep olabilmektedir. Buna ek olarak türbin kanatlarında oluşabilecek bir hasar, özellikle yüksek devirlerde çalışırken şaft üzerindeki dengeyi bozarak şafta ve yataklara ciddi hasarlar da verebilmektedir.

Sonuç olarak türbin kanatlarında hasar oluşmasına engel olmak için yıkama operasyonunun düzgün ve verimli yapılması ile ana makine egzoz çıkış sıcaklığı ve basıncı başta olmak üzere ilgili parametreler düzenli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir.

- 5- Emniyetsiz davranış; çalışanlardan tarafından uygulanması için geliştirilen emniyet standartlarına ve kurallarına uyulmaması durumu olarak ifade edilmektedir. Bunun sonucunda; emniyetsiz davranış eyleminde bulunan çalışanın kendisi veya bir başkası için yaralanma veya ölüm tehlikesi, ekipmanların zarar görmesi ya da işveren için itibar veya finansal anlamda kayıplar oluşabilmektedir. Bu tür insani davranışlar, çalışanların duyarsız tutumlarından, bilgi ve tecrübe eksikliğinden, emniyet önlemleri konusunda farkındalık eksikliğinden veya emniyet bilincinden genel olarak yoksun olmaktan kaynaklanabilmektedir.

Risk barındıran iş ortamlarında bütün çalışanlar risk almaktadırlar ve bunun sonucunda hatalar meydana gelebilmektedir. İş unvanı ya da sınıfı ne olursa olsun, her çalışanın emniyet konusunda uyarma, düzeltme ve raporlama yetki ve imkanına sahip olması gerekmektedir.

Emniyetsiz davranışların önüne geçmenin en verimli yolunun kuşkusuz her çalışana genel bir emniyet bilinci kazandırmak olduğu düşünülmektedir. Sürekli uyanık, farkında ve alarm durumunda olmayı gerektiren bu bilinç sayesinde emniyetsiz davranışların önüne geçilebileceği öngörülmektedir.

Ayrıca bazen işi yapan kişiler sadece işe odaklanıp çevreden gelecek tehlikeleri ya da uygunsuz durumları farkedemeyecekleri için özellikle kritik operasyonlarda sadece emniyetten sorumlu bir gözcü ataması yapılması gerekmektedir.

Ayrıca özellikle gemi makine dairesi operasyonlarında neredeyse hepsi risk arz ettiği için yapılacak her iş öncesinde tool-box adı verilen, görev ve sorumlulukların paylaştırılıp, gerekli ekipmanların ve iş sırasının ilgili personele anlatılması ve en önemlisi bütün gerekli emniyet prosedürlerinin tekrar gözden geçirildiği ve hatırlatıldığı emniyet toplantılarının yapılması emniyetsiz davranışların engellenmesi konusunda oldukça etkili olacaktır.

Bulanık hata ağacı analizi sonuçlarına göre oluşma ihtimali 0,02 üzerinde olan temel olayların oluşma sebepleri ve turboşarjır sistemi ve makine üzerine etkileri açıklanmıştır. Bu olayların oluşmaması için alınabilecek önlemler paylaşılmıştır.

Bulanık hata ağacı metodunun, turboşarjır sisteminin çalışma süresi boyunca meydana gelebilecek arıza ve hataların teşhis edilmesi ve oluşma ihtimallerine göre sıralanarak gerekli önlemlerin alınması ve iyileştirmelerin yapılabilmesi için oldukça etkili bir yöntem olduğu görülmüştür.

Ancak göz önünde bulundurulması gereken çok önemli bir nokta bulunmaktadır: Bulanık Hata Ağacı Analizi sonuçlarına göre gerçekleşme olasılığı çok düşük olan veya hata ağacı içerisindeki temel olaylardan olmayan bir olayın gerçekleşme ihtimali her zaman var olacaktır. 999 kere yapılan bir operasyonda alınmayan bir önlem 1000. operasyon sırasında meydana gelebilir ve gerçekleşme ihtimali düşük gibi görünse de sonuçları çok büyük olabilmektedir.

Ayrıca gemi makine sistemlerinin ve turboşarjır teknolojisinin sürekli gelişmekte ve değişmekte olduğunun da unutulmaması gerekmektedir. Alternatif yakıt türlerinin kullanılması, başka ekipmanların veya turboşarjırın modifikasyonları gibi etkenlerin de yanma verimlerini ve dolayısıyla turboşarjır verimini doğrudan etkileyebilecek faktörler olduklarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Bu araştırma sayesinde, gemi turboşarjır sistemlerinin arıza ve hatalarının azaltılması hatta gerekli önleyici faaliyetlerin uygulanarak, erken arıza tespiti ve PMS sisteminde yapılacak düzeltmelerle turboşarjır veriminin optimum düzeyde tutulması amaçlanmaktadır. Böylece turboşarjırın hem kendi çalışma prensibi gereği enerjinin

geri dönüştürülmesi yoluyla hem de yakıt tüketimine doğrudan etkisi sayesinde enerji verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Yakıt tüketiminin azalması ve enerji verimliliğinin artması ile içten yanmalı makinelerde kullanılan yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan gazların neden olduğu çevre kirliliğinin de azalacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmanın; gemi turboşarjır sistemlerinin daha verimli çalışması ile enerji verimliliğinin artırılması ve gemilerden kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması konusunda faydalı olması beklenmektedir.



KAYNAKÇA

ABB. (2005). *ABB Turbo Systems Operation Manual TPL69-85A*.

ABB Turbo Systems. (2005). *Turbocharger Operation Manual*.

Adamkiewicz, A. (2012). Scientific Journals Zeszyty Naukowe An analysis of cause and effect relations in diagnostic relations of marine Diesel engine turbochargers. İçinde *Zeszyty Naukowe* (C. 31, Issue 103).

Anderson, K., & Bows, A. (2014). Executing a Scharnow turn: reconciling shipping emissions with international commitments on climate change. [Http://Dx.Doi.Org/10.4155/Cmt.12.63,3\(6\),615-628](http://Dx.Doi.Org/10.4155/Cmt.12.63,3(6),615-628).
<https://doi.org/10.4155/CMT.12.63>

Andersson, N., & Kisbenedek, E. (2018). *Review on Recent Advances for Marine Turbocharger Technologies For Two-stroke Diesel Engines*.

Badida, P., Balasubramaniam, Y., & Jayaprakash, J. (2019). Risk evaluation of oil and natural gas pipelines due to natural hazards using fuzzy fault tree analysis. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 66, 284-292. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2019.04.010>

Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management*, 182, 72-88.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.12.080>

Bonissone, P. P. (1980). *A fuzzy sets based linguistic*.

Chen, C. T., Lin, C. T., & 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, P. (1988). Empirical and theoretical evidence of economic chaos. *System Dynamics Review*, 4(1-2), 81-108.
<https://doi.org/10.1002/SDR.4260040106>

Chen, S.-J., & Hwang, C.-L. (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. 289-486. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4_5

Contini, S., Scheer, S., & Wilikens, M. (2000). Sensitivity analysis for system design improvement. *Proceedings of the 2002 International Conference on Dependable Systems and Networks*, 243-248.
<https://doi.org/10.1109/ICDSN.2000.857545>

Corbett, J., James, W., Carr, E., Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Prank, M., & Sofiev, M. (2016). Study on effects of the entry into force of the global

0.5% fuel oil sulphur content limit on human health. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.

Dernoncourt, F. (2013). *Introduction to fuzzy logic*.

Energy Transitions Commission. (2020). *The First Wave A Blueprint for Commercial Scale Zero Emission Shipping Pilots*.

Eyring, V., Isaksen, I. S. A., Berntsen, T., Collins, W. J., Corbett, J. J., Endresen, O., Grainger, R. G., Moldanova, J., Schlager, H., & Stevenson, D. S. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4735-4771.
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2009.04.059>

Ferdous, R. (2006). *Methodology for computer aided Fuzzy Fault Tree Analysis*.

Haimes, Y. Y. (2008). Risk Modeling, Assessment, and Management, Third Edition. *Risk Modeling, Assessment, and Management, Third Edition*, 1-1012.
<https://doi.org/10.1002/9780470422489>

He, Z., Yang, Y., Han, H., Wang, J., Zhang, Y., & Li, H. (2021). A key performance indicator-based fault detection scheme for marine diesel turbocharging systems. *Journal of the Franklin Institute*, 358(17), 9346-9363.
<https://doi.org/10.1016/J.JFRANKLIN.2021.09.024>

Hsu, H.-M., & Chen, C.-T. (1996). Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. *Çinde Fuzzy Sets and Systems* (C. 79).

Hüffmeier, J., & Johanson, M. (2021). State-of-the-art methods to improve energy efficiency of ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4).
<https://doi.org/10.3390/jmse9040447>

Huntington, E. v. (1904). Sets of Independent Postulates for the Algebra of Logic. *Çinde Source: Transactions of the American Mathematical Society* (C. 5, Issue 3).

IEA OIMD. (2019). *IEA Oil 2019-2024*.

IMO. (2019). *Marine Environment Protection Committee 320(74) 2019 Guidelines for Consistent Implementation the 0.50% Sulphur Limit Under Marpol Annex VI*.

IMO. (2020). *Reducing the Sulphur Content in Ships*.
[http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/Sulphur2020 infographic 2 page.pdf](http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/Sulphur2020%20infographic%20page.pdf)

Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship Energy Efficiency and Maritime Sector Initiatives to Reduce Carbon Emissions. *Energies*, 15(21), 7910.
<https://doi.org/10.3390/en15217910>

Kabir, S., Geok, T. K., Kumar, M., Yazdi, M., & Hossain, F. (2020). A Method for Temporal Fault Tree Analysis Using Intuitionistic Fuzzy Set and Expert Elicitation. *IEEE Access*, 8, 980-996.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961953>

Khasnis, A. A., & Nettleman, M. D. (2005). Global warming and infectious disease. *Archives of Medical Research*, 36(6), 689-696.
<https://doi.org/10.1016/J.ARCMED.2005.03.041>

- Klir, G. J., & Yuan, B.** (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic- theory and applications*.
- Knežević, V., Orović, J., Stazić, L., & Čulin, J.** (2020). Fault tree analysis and failure diagnosis of marine diesel engine turbocharger system. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(12), 1-19.
<https://doi.org/10.3390/jmse8121004>
- Knežević, V., Orović, J., & Stazić, L.** (2020). *Marine Science and Engineering Fault Tree Analysis and Failure Diagnosis of Marine Diesel Engine Turbocharger System*. <https://doi.org/10.3390/jmse8121004>
- Maciej Serda, Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqw, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. v, ...** (2002). فاطمی, ح. Design of propulsion and electric power generation systems. *Uniwersytet Śląski*, 7(1), 343-354.
<https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Mallouppas, G., & Yfantis, E. A.** (2021). Decarbonization in Shipping industry: A review of research, technology development, and innovation proposals. İçinde *Journal of Marine Science and Engineering* (C. 9, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jmse9040415>
- MAN Diesel & Turbo Engines.** (2012). *Introduction to the small bore two-stroke ME-B engines*.
- MAN Diesel & Turbo Engines.** (2016). *STX Engine Instruction Book, L23/30H*.
- Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., & Gemeni, V.** (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. İçinde *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (C. 24, Issue 5, ss. 477-523). <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>
- MEPC.** (2009). I:\CIRC\MEPC\01\684.doc.
- MEPC.** (2011). Annex 19: Resolution MEPC.203(62). 203(July), 1-17.
- MEPC.304(72).** (2018). RESOLUTION MEPC.304(72) (adopted on 13 April 2018) *Initial Imo Strategy On Reduction Of Ghg Emissions From Ships*.
- Mitsubishi MET Turbocharger.** (2008). *Turbocharger Instruction Manual-MET66MA*.
- Özdemir, M. M.** (2018). Denizcilikte Yelkenliden Buharlılara Geçiş Dönemindeki Tereddütler ve Tartışmalar. *Atatürk ve Türkiye Cumhuriyeti Tarihi Dergisi Journal of Atatürk and the History of Turkish Republic*, 1/3, 111-124.
- Rajkovic, V.** (1979). Multiattribute Decisionmaking Using a Fuzzy Heuristic Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9(6), 326-333. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310221>
- Ramzali, N., Lavasani, M. R. M., & Ghodousi, J.** (2015). Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing Fuzzy event tree analysis. *Safety Science*, 78, 49-59.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.004>

- Reniers, G., Dullaert, W., & Soudan, & K.** (2005). Preventing external domino accidents: a framework for enhancing cooperation in the Chemical Process Industry (CPI). İçinde *Transactions on The Built Environment* (C. 82). www.witpress.com,
- Roberts, N. H., & Haasl, D. F.** (1981). *U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Fault Tree Handbook"*.
- Sen, Z.** (2020). *Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme- Zekai Şen- Google Kitaplar*. <https://l24.im/rK3Uf>
- Serra, P., & Fancello, G.** (2020). Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/su12083220>
- Shell.** (2020). *In collaboration with Industry Perspectives*. www.shell.com/DecarbonisingShipping
- Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keeffe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D. S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J. J., & Hoen, M., A.** (2014). Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. *International Maritime Organization (IMO)*, 327. [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third Greenhouse Gas Study/GHG3 Executive Summary and Report.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf)
- Stone, R., & Macmillan, E. M.** (1992). *Introduction to Internal Combustion Engines*.
- Stopford, M.** (2008). Maritime economics: Third edition. *Maritime Economics: Third Edition*, 1-815. <https://doi.org/10.4324/9780203891742/MARITIME-ECONOMICS-3E-MARTIN-STOPFORD>
- Summers, M.** (2007). *ABB turbochargers-history and milestones*.
- Tomasoni, A. M.** (2010). *Models and methods of risk assessment and control in dangerous goods transportation (DGT) systems, using innovative information and communication technologies*. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00006223>
- Tong, R. M., & Efstathiou, J.** (1982). A critical assessment of truth functional modification and its use in approximate reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*, 7(1), 103-108. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(82\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0165-0114(82)90044-6)
- Ünver, B., Gürgen, S., Sahin, B., & Altın, İ.** (2019). Crankcase explosion for two-stroke marine diesel engine by using fault tree analysis method in fuzzy environment. *Engineering Failure Analysis*, 97, 288-299. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2019.01.007>
- Van Duijne, F. H., van Aken, D., & Schouten, E. G.** (2008). Considerations in developing complete and quantified methods for risk assessment. *Safety Science*, 46(2), 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.05.003>
- Van Ta, T., Minh Thien, D., & Trong Cang, V.** (2017). To cite this article: Tran Van Ta, Doan Minh Thien, Vo Trong Cang. Marine Propulsion System

Reliability Assesment by Fault Tree Analysis. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Special Issue: Transportation Engineering Technology-Part III*, 5(1), 1-7.
<https://doi.org/10.11648/j.ijmea.s.2017050401.11>

Wenstøp, F. (1976). Deductive verbal models of organizations. *International Journal of Man-Machine Studies*, 8(3), 293-311.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(76\)80002-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(76)80002-8)

Yager, R. R. (1979). On solving fuzzy mathematical relationships. *Information and Control*, 41(1), 29-55.
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(79\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(79)80004-2)

Yao, Y. Y., & Wong, S. K. M. (1992). A decision theoretic framework for approximating concepts. *International Journal of Man-Machine Studies*, 37(6), 793-809.
[https://doi.org/10.1016/0020-7373\(92\)90069-W](https://doi.org/10.1016/0020-7373(92)90069-W)

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. İçinde *INFOR~ATIO~ AND CONTROL* (C. 8)

Url-1 <<https://www.imarest.org/themarineprofessional/on-the-radar/6103-turbocharging-at-sea>> erişim tarihi 01.02.2023.

Url-2 <<https://www.sekizsilindir.com/2016/04/turbonun-tarihcesi.html>>
erişim tarihi 12.01.2023.

Url-3 <<https://www.diesलगeneratortech.com/generator-sets/how-does-exhaust-gas-turbocharger-work-in-diesel-genset.html>>
erişim tarihi 13.01.2023.

Url-4 <<https://www.hse.gov.uk/simple-health-safety/risk/index.html>>
erişim tarihi 15.01.2023.

Url-5 <https://tr.wikipedia.org/wiki/Hata_a%C4%9Fac%C4%B1_analizi>
erişim tarihi 15.01.2023.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Çağatay Serçe

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2015-2018, Tersan Shipping ve Pakoil Denizcilik'te Uzakyol 3. Mühendis,
- 2018-2020, Zenith Gemi İşletmeciliği Uzakyol 3. Mühendis
- 2022, Carnival Cruise Line Uzakyol 3. Mühendis

BİLDİRİLER:

- Serce, C., Elidolu, G., Arslanoglu, Y. 2022 Evaluating the risks of marine turbocharger failure using fuzzy fault tree analysis method. Conference: 4th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, December 14-16 2022 Ankara, Turkey.