

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SUALTI PATLAMALARININ SAHA ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL
MODELLEMELERLE İNCELENEREK CİVARDAKİ DENİZ ARAÇLARINDA
HASAR TAHMİNLERİ YAPILMASI**

DOKTORA TEZİ

Alpaslan TATLISULUOĞLU

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

NİSAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SUALTI PATLAMALARININ SAHA ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL
MODELLEMELERLE İNCELENEREK CİVARDAKİ DENİZ ARAÇLARINDA
HASAR TAHMİNLERİ YAPILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Alpaslan TATLISULUOĞLU
(508132105)**

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serdar BEJİ

NİSAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 508132105 numaralı Doktora Öğrencisi Alpaslan TATLISULUOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SUALTI PATLAMALARININ SAHA ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL MODELLEMELERLE İNCELENEREK CİVARDAKİ DENİZ ARAÇLARINDA HASAR TAHMİNLERİ YAPILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Serdar BEJİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kadir SARIÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yalcın YÜKSEL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Barış BARLAS
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Nisan 2022**
Savunma Tarihi : **22 Nisan 2022**





Melek, Selcen, Evren ve Alp Demir'e,



ÖNSÖZ

Savaş gemilerinin harekât sahasında bekası için sualtı tehditlerinin analiz edilmesi hayati öneme sahiptir. Söz konusu tehditler arasında sualtı silahları (Torpidolar, DSH (Denizaltı Savunma Harbi) Roketleri, Mayınlar, Su Bombaları, Plastik Patlayıcılar gibi) önemli bir yere sahiptir. Özellikle 2'nci Dünya Savaşı ile birlikte bilhassa denizaltı harbi teknolojisi hızla ilerlemiş ve çok düşük maliyetler ile üretilen sualtı silahları savaş gemilerinin batmasına veya büyük hasarlar verdirerek harekât sahasından çekilmelerine sebep olmuştur.

Bu sebeple “*Mükemmel ve Kaadir Bir Türk Donanmasına Malik Olmak Gayesi*” ile gelişen teknoloji ile birlikte stratejik önemi bulunan sualtı silahlarının etkilerinin analiz edilmesi birçok yönden gereklilik arz etmektedir. Bu tezde söz konusu sualtı silahlarının etkileri bağlamında sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok basıncının bir suüstü platformuna etkileri incelenmiştir.

Doktora eğitimim boyunca bana her türlü destek ve yardımı esirgemeyen başta kıymetli hocam Prof. Dr. Serdar BEJİ olmak üzere, Dr. Gökhan BUDAK, Ahmet Gültekin AVCI ve Fatih AKÇAKOYUNLUOĞLU'na, ayrıca meslek hayatım ve akademik çalışmalarım süresince karşılaştığım zorluklarda bana payanda olan ve hayat gemimizde dümeni birlikte tuttuğum eşim Evren TATLISULUOĞLU ve oğlum Alp Demir TATLISULUOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Nisan 2022

Alpaslan TATLISULUOĞLU
(Dz.Kur.Kd.Alb.)
(Harekât Başkanı)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	6
1.2 Literatür Araştırması	6
2. SUALTI PATLAMALARININ FİZİKSEL TARİFİ	11
2.1 Patlayıcı Maddeler	11
2.2 Şok Dalgası Basıncı	13
3. SUALTI PATLAMASI SAHA ÖLÇÜMLERİ.....	15
3.1 Sualtı Patlaması Denemesinde Basınç Değerlerinin Tespit Edilmesi.....	22
3.2 Şok Dalgası Basıncı	23
3.3 Ölçülen Basınç Değerleri İle Katsayıların Yeniden Değerlendirilmesi	25
3.4 Saha Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	29
4. SUALTI PATLAMA MODELİ VE SİMÜLASYONLAR.....	31
4.1 Sualtı Patlama Simülasyonlarının Hazırlanması	31
4.1.1 Arbitrary lagrangian-eulerian (ALE) metodu	31
4.1.2 Sınır şartları ve kabuller	32
4.1.3 Simülasyon elemanları	33
4.2 Platformun Doğal Frekansı	39
4.3 Simülasyon Süresi ve Adımları	41
5. SUALTI PATLAMASI İLE ORTAYA ÇIKAN ŞOK DALGASININ CİVARDAKİ SUÜSTÜ PLATFORMLARINA ETKİLERİNİN SİMÜLASYONU	45
5.1 Simülasyon-I	46
5.1.1 Yer değiştirmeler	47
5.1.2 Hızlar	47
5.1.3 İvmeler	48
5.2 Simülasyon-II	49
5.2.1 Yer değiştirmeler	49
5.2.2 Hızlar	50
5.2.3 İvmeler	50
5.3 Simülasyon-III.....	51
5.3.1 Yer değiştirmeler	51

	<u>Sayfa</u>
5.3.2 Hızlar	51
5.3.3 İvmeler	52
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
6.1 Sonuç	57
6.2 Öneriler.....	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65



KISALTMALAR

DSH	: Denizaltı Savunma Harbi
UNDEX	: Underwater Explosion
ALE	: Arbitrary Lagrangian-Eulerian
OŞF	: Omurga Şok Faktörü
KSF	: Keel Shock Factor
LPD	: Landing Helicopter Dock
CG	: Cruiser Guided Missile
MRP	: Mining and Reclamation Practises
USS	: United States Ship
TNT	: Trinitratoluene
RDX	: Royal Demolition Explosive
CEL	: Coupled Eulerian-Lagrange



SEMBOLLER

A	: Alan
B	: Genişlik
C	: Sesin su içindeki Hızı
E	: Hata
F	: Kuvvet
G,g	: Yerçekimi ivmesi
I	: İmpuls
L	: Uzunluk
M	: Kütle
P	: Basınç
R,r	: Mesafe
T	: Zaman
u	: Zerreçik hızı
W	: Ağırlık
Δ	: Deplasman
ρ	: Yoğunluk
μ	: Viskozite
γ	: Şok dalgasının gaz kabarcığına nazaran hızı
Ω	: Kinetik Entalpi
θ	: Deniz yüzeyine paralel yatay bir referans çizgisi ile omurgayı patlayıcıya bağlayan doğru arasındaki açı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Gemi onarım ve mayın maliyetleri.....	4
Çizelge 2.1 : Patlayıcılar.....	12
Çizelge 3.1 : Sensörlerin patlayıcıya nazaran mesafeleri	19
Çizelge 3.2 : Basınç değerleri (MPa).....	22
Çizelge 3.3 : Basınç değerleri (libre/ft ²)......	23
Çizelge 3.4 : Farklı k1; α 1 çiftleri ile hesaplanan basınç değerleri ile ölçülen basınç değerlerinin karşılaştırılması.....	29
Çizelge 4.1 : Simülasyonlara ait değişkenler.....	35
Çizelge 4.2 : 5 adet sensörden elde edilen basınç değerleri	41
Çizelge 5.1 : KSF değerleri ve buna karşılık gelen maksimum kalıcı deformasyonlar, hızlar ve ivmeler.....	54



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : USS Tripoli (LPD 10)	2
Şekil 1.2 : USS Tripoli'deki hasar	2
Şekil 1.3 : USS Princeton (CG 59)	3
Şekil 1.4 : USS Princeton'daki hasar	3
Şekil 1.5 : USS Samuel B.Roberts	4
Şekil 1.6 : USS Samuel'deki hasar	4
Şekil 1.7 : USS Gerald R.Ford'a istinaden yapılan şok analizi	5
Şekil 3.1 : Sualtı patlaması düzeneği	16
Şekil 3.2 : L çerçeve ve patlayıcı	17
Şekil 3.3 : L çerçeve ve sensör bağlantısı	17
Şekil 3.4 : Sensör bağlantısı	18
Şekil 3.5 : 1 numaralı sensör basınç değeri	19
Şekil 3.6 : 2 numaralı sensör basınç değeri	20
Şekil 3.7 : 5 numaralı sensör basınç değeri	20
Şekil 3.8 : 6 numaralı sensör basınç değeri	20
Şekil 3.9 : 8 numaralı sensör basınç değeri	21
Şekil 3.10 : 7 numaralı sensör basınç değeri	21
Şekil 3.11 : 3 numaralı sensör basınç değeri	21
Şekil 3.12 : 4 numaralı sensör basınç değeri	22
Şekil 3.13 : Ölçülen ve hesaplanan basınç değerleri	28
Şekil 4.1 : Platform ve patlayıcının yerleşimi	35
Şekil 4.2 : Geometrik olarak basitleştirilmiş prizmatik duba şeklinde gemi modeli	36
Şekil 4.3 : Geometrik olarak basitleştirilmiş gemi modeli- yayılı yükler (üstten görünüş)	36
Şekil 4.4 : Geometrik olarak basitleştirilmiş gemi modeli- yayılı yükler (alttan görünüş)	37
Şekil 4.5 : Basitleştirilmiş gemi modelinde iç yapı elemanları	37
Şekil 4.6 : Basitleştirilmiş gemi modelinde kabuk elemanları	38
Şekil 4.7 : Simülasyonlarda uygulanan ağ düzeni	38
Şekil 4.8 : Gemi benzeri prizmatik dubanın karinasında seçilen düğüm noktaları	39
Şekil 4.9 : Prizmatik dubanın burulma modu	39
Şekil 4.10 : Prizmatik dubanın düşey eğilme modu	40
Şekil 4.11 : Prizmatik dubanın yanal eğilme modu	40
Şekil 4.12 : Bir numaralı sensördeki basınç değişimi	41
Şekil 4.13 : İki numaralı sensördeki basınç değişimi	42
Şekil 4.14 : Üç numaralı sensördeki basınç değişimi	42
Şekil 4.15 : Dört numaralı sensördeki basınç değişimi	42
Şekil 4.16 : Beş numaralı sensördeki basınç değişimi	43
Şekil 4.17 : İki boyutlu şok dalgasının yayılımı	43

Şekil 5.1 :	Modellenen su ortamının ölçüleri.....	45
Şekil 5.2 :	Modellenen su ortamı ve prizmatik duba	46
Şekil 5.3 :	Prizmatik dubada izlenen düğüm noktaları	46
Şekil 5.4 :	Simülasyon I için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen yer değiştirmeleri	47
Şekil 5.5 :	Simülasyon I için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen hız değişimleri.....	48
Şekil 5.6 :	Simülasyon I için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen ivme değişimleri	48
Şekil 5.7 :	Simülasyon II için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen yer değiştirmeleri	49
Şekil 5.8 :	Simülasyon II için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen hız değişimleri.....	50
Şekil 5.9 :	Simülasyon II için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen ivme değişimleri	50
Şekil 5.10 :	Simülasyon III için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen yer değiştirmeleri	51
Şekil 5.11 :	Simülasyon III için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen hız değişimleri.....	52
Şekil 5.12 :	Simülasyon III için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen ivme değişimleri	52
Şekil 5.13 :	Simülasyon III, patlama öncesi yapı elemanları.....	53
Şekil 5.14 :	Simülasyon III, patlama sonrası yapı elemanları	54
Şekil 5.15 :	Maksimum yer değiştirme ile KSF arasındaki ilişki	55

SUALTI PATLAMALARININ SAHA ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL MODELLEMELERLE İNCELENEREK CİVARDAKİ DENİZ ARAÇLARINDA HASAR TAHMİNLERİ YAPILMASI

ÖZET

Savaş gemilerinin harekât sahasında bekası için sualtı tehditlerinin analiz edilmesi hayati öneme sahiptir. Söz konusu tehditler arasında sualtı silahları en önemli husus olarak dikkat çekmektedir. Özellikle İkinci Dünya Savaşı ile birlikte bilhassa denizaltı harbi teknolojisi hızla ilerlemiş ve çok düşük maliyetler ile üretilen sualtı silahları savaş gemilerinin batmasına veya büyük hasarlar verdirerek harekât sahasından çekilmelerine sebep olmuştur. Gelişen teknoloji ile birlikte stratejik önemi bulunan sualtı silahlarının etkilerinin analiz edilmesi birçok yönden gereklilik arz etmektedir. Bu tezde, öncelikle kontrollü bir sualtı patlatmasına ilişkin ölçüm sonuçları verilmekte, elde edilen sonuçlar analiz edilmekte ve ardından da söz konusu sualtı silahlarının etkileri bağlamında sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok basıncının gemi benzeri bir yapıya etkileri incelenmektedir.

Sualtı patlamaları, havada meydana gelen patlamalara benzer özelliklerde şok dalgaları oluşturur. Suyun elastik özelliklerinden dolayı sualtı şok dalgalarının süreleri daha kısadır ancak tepe basınçları oldukça büyüktür. Sualtı şok dalgasındaki enerji katedilen mesafe ile hızla azalır (nerdeyse logaritmik olarak). Bu nedenle, sualtı patlamalarından kaynaklanan şok dalgaları, havadaki patlamalar tarafından oluşturulanlarla aynı düzeyde hasara neden olmaz. Öte yandan, genel olarak gemilerin, özellikle savaş gemileri için sualtı patlamalarına karşı mukavemet ve stabilitesinin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle şok dalgalarının ölçülmesi ve analiz edilmesi hayati öneme sahiptir.

Bu çalışmanın ilk kısmında denizde kontrollü bir sualtı patlamasının patlama basıncı ölçümleri yapılmıştır. Yirmi beş kg-TNT eşdeğeri bir patlayıcı infilak ettirilmiş ve patlama basınçları, sualtı ortamında rezonanssız yüksek voltaj çıkışında çalışan sekiz farklı yüksek performanslı basınç sensörü ile kaydedilmiştir. Kaydedilen tepe basınç değerleri, literatürde kabul edilen ampirik sualtı patlaması (UNDEX) basınç formülü ile kıyaslanmıştır. Söz konusu formülün sabitleri, ölçülen verilere en iyi şekilde uyması için iki farklı biçimde en küçük kareler yöntemi kullanılarak yeniden belirlenmiştir. Yeni belirlenen sabitlerin literatürde kabul görmüş formülün katsayıları ile karşılaştırıldığında nispeten küçük farklar tespit edilmiştir.

Savaş gemilerinin stabilitesi, sistem ve alt sistemlerinin düzgün çalışmasını doğrudan tehdit eden sualtı patlamaları, hasar tahmini açısından ele alınmalıdır. Bu nedenle bu çalışmanın ikinci kısmında, LS-DYNA'nın Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) metodu/sayısal tekniği, gemi benzeri bir yapının yapısal bileşenleri üzerindeki şok etkilerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Hesaplanan maksimum kalıcı deformasyonlar, doğrusal bir orantılılık faktörü elde etmek için karşılık gelen Omurga Şok Faktörü (OSF-Keel Shock Factor (KSF)) değerleriyle eşleştirilmektedir. Formülün tatmin edici tahminleri, şok dalgalarına maruz kalan gemi benzeri yapılara

verilen hasarın büyüklüğünün bir ölçüsü olarak KSF'nin kullanılmasının oldukça kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Bu kasamda; bir gemi kirişini temsil eden barç benzeri bir yapı üzerindeki 3 boyutlu bir sualtı patlamasının etkileri, ALE yaklaşımı ile LS-DYNA yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar yoluyla araştırılmıştır. KSF'deki değişimlerin etkilerini araştırmak için üç farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. $KSF \approx 1$ için tasarlanan ikinci simülasyon, genel kullanıma açık olmasa da saha ölçümlerinin mevcut olduğu duruma benzer bir durumu temsil etmektedir. Hesaplanan maksimum kalıcı deformasyonların ölçülenlere yakınlığı, sayısal simülasyonların güvenilirliğinin bir göstergesidir. Ayrıca, simülasyon verilerinin kullanılmasıyla, burada ele alınan yapı için maksimum deformasyonlar ve karşılık gelen KSF değerleri arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Kalıcı deformasyonlar için iyi bir tahmin değeri veren bu basit ilişki, farklı yapısal özelliklere sahip gemi benzeri formlar için daha gelişmiş ve daha genel formüllerin öncüsü olarak görülebilir. Son olarak, hesaplanan başlangıç hızları (kick of velocity) göz önüne alındığında platformda, $KSF \approx 1$ olduğunda ciddi hasarlar, $KSF \geq 1$ olduğunda ise ölümcül hasarlar oluşacağı değerlendirilmektedir.



INVESTIGATION OF UNDERWATER EXPLOSIONS BY FIELD MEASUREMENTS AND NUMERICAL MODELINGS TO ESTIMATE DAMAGES ON NEARBY PLATFORMS

SUMMARY

Analyzing underwater threats is of vital importance for the survival of warships on the operation field. Among the threats in question, underwater weapons draw attention as the most important ones. Especially during the Second World War the submarine warfare technology advanced rapidly and the underwater weapons produced at low costs caused the warships to sink or withdraw from the operation area due to damages sustained. As always, the advancing technology makes it necessary to analyze the effects of strategically important underwater weapons from every possible aspect. In this thesis, field measurements of a controlled underwater detonation are presented and analysed first and then the effects of the shock pressure caused by an underwater explosion on a ship-like structure are investigated.

Air and underwater explosion blast waves have been of great interest to the military. An explosion created by a mine for instance produces a pressure pulse or shock wave. When a shock wave impacts a structural surface, it usually causes severe structural and equipment damage besides personnel casualties.

Underwater explosions create shock waves with similar characteristics to explosions in air. Due to the elastic properties of water, underwater shock waves have shorter durations but their peak pressures are quite large. The energy in an underwater shock wave decreases rapidly (almost logarithmically) with distance traveled. Therefore, unlike airborne shock waves, underwater explosions do not maintain their strong damaging capabilities at longer distances. Nevertheless, the assessment of the strength and stability of ships in general against underwater explosions is very important, especially for warships, by analyzing the impact of shock waves on structures in water.

In the first part of this study, burst pressure measurements of a controlled underwater explosion at sea were made. A twenty-five kg-TNT equivalent explosive was detonated and detonation pressures were recorded with eight different high-performance pressure sensors operating at a non-resonant high voltage output in underwater environments. The recorded peak pressure values were compared with the empirical underwater explosion (UNDEX) pressure formula accepted in the literature. The constants of the formula in question are redetermined using the least squares method in two different ways to best fit the measured data. The newly determined constants are compared with the coefficients of the formula accepted in the literature and found to be quite small.

Naval institutions usually provide guidelines and specifications for shock testing and hardening of shipboard equipment. Unfortunately, shock trials also need extensive planning and coordination. Furthermore, an environmental lawsuit can delay shock trials. With recent computer hardware technology advances and increased research in

numerical simulation of partial differential equations, finite element modeling and simulation provides a viable, cost effective alternative to live fire testing under realistic combat conditions. These software packages have enabled researchers to produce detailed finite element models in a timely manner. Sufficient fidelity mesh modeling is required to produce acceptable results.

Underwater explosions that directly threaten the stability of warships and the proper functioning of their systems and subsystems should be considered in terms of damage estimation. Thus, in the second part of the study LS-DYNA's Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method/numerical technique is employed to analyze shock effects on a ship-like structure. The calculated maximum permanent deformations are matched with the corresponding Keel Shock Factor (KSF) values to obtain a linear proportionality factor. Satisfactory estimates of the formula show that it is quite acceptable to use KSF as a measure of the magnitude of damage to ship-like structures exposed to shock waves. In this frame, investigations of the effects of a 3D underwater explosion on a barge-like structure representing a ship beam by the use of using LS-DYNA software for three different cases reveal that the second simulation designed for $KSF \approx 1$ actually represents the critical case of severe and dangerous damage situation. Furthermore, the closeness of the calculated maximum permanent deformations to the measured ones is an indication of the reliability of the numerical simulations. Using the simulation data, a linear relationship has been established between the maximum deformations and the corresponding KSF values for the particular structure discussed here. This simple relationship, which provides a good first estimate of permanent deformations, can be seen as a precursor to better established and more general formulas for ship-like forms with different structural properties. Work in this direction continues. Finally, considering the calculated initial velocity (kick of velocity), it is possible to conclude that serious damage will occur to a platform when $KSF \approx 1$ and fatal damage when $KSF \geq 1$.

In this study, evaluations were made on the damages caused by the shock wave that emerged with the underwater explosion on the nearby surface platforms. However, the effects of the gas bubble formed by the underwater explosion have not been studied. In this context, examining the hydrodynamic effects of the gas bubble formed by the underwater explosion is a suitable subject for future studies.

In addition, the fact that unmanned submarines and autonomous underwater vehicles will be used for offensive purposes in the near future will make it necessary to include autonomous underwater vehicles that are lighter, less costly, require less manpower and will be used more effectively in anti-submarine warfare concept. In this context, it is considered that more than one autonomous underwater vehicle can conduct underwater listening within the scope of anti-submarine warfare in an area established with a determined depth and route, and also provide deterrence by detonating it near or on the target with explosives of various weights to be deployed on them. These issues will also require examining the effects of explosions that will occur at more than one point underwater.

In addition, the analysis of structure-fluid interaction is very important in underwater explosion applications. At the same time as examining the behavior of a ship or platform exposed to the shock wave generated by an underwater explosion, the interaction of the structure with the fluid should also be examined. The fluid around a shock-loaded structure moves rapidly, thus creating additional effects on the

structure. In this context, studies on the solid-fluid interaction model, including the effects of cavitation, are considered as studies that should be considered in the future.



1. GİRİŞ

Günümüzün küreselleşen dünyasında, deniz ve okyanus sularının altındaki sualtı gücü teknolojik gelişmelere bağlı olarak gün geçtikçe daha stratejik bir hale gelmiştir. Bu bağlamda, özellikle deniz kaynakları ve deniz güvenliği dikkate alındığında; küresel, kıtasal ve bölgesel deniz gücünün önemi ortaya çıkmaktadır. Bu çerçevede, askeri amaçlı yapılan çalışmalarla başlayan sualtı patlatmaları süreci insani birtakım gerekler ve zorunluluklar nedeniyle gelişme göstermeye başlamıştır.

Savaş gemilerinin harekât sahasında bekası için sualtı tehditlerinin analiz edilmesi hayati öneme sahiptir. Söz konusu tehditler arasında sualtı silahları (torpidolar, DSH (Denizaltı Savunma Harbi) roketleri, mayınlar, su bombaları, plastik patlayıcılar gibi) önemli bir yere sahiptir. Özellikle İkinci Dünya Savaşı ile birlikte denizaltı harbi teknolojisi hızla ilerlemiş ve çok düşük maliyetler ile üretilen sualtı patlatma sistemleri ile savaş gemilerinin batmasına veya büyük hasarlar verdirerek harekât sahasından çekilmelerine sebep olduğu görülmüştür.

Sualtı patlamaları ve sonucunda ortaya çıkan şok dalgaları gemiler ve özellikle de savaş gemileri için büyük öneme sahiptir. Patlama ile ortaya çıkan şok dalgası çevresinde bulunan bir geminin materyaline zarar verebileceği gibi, gemi dahilindeki sistemlere ve daha önemlisi gemide bulunan insanlara da zarar verebilmektedir. Bu nedenlerle özellikle savaş gemilerinin yapı elemanlarının/karınalarının sualtı patlamaları şok etkilerine karşın güçlendirilmiş olmaları gerekmektedir. Sualtı patlatması ile batan/hasar alan savaş gemilerinden bazıları burada incelenecektir. Amerika Birleşik Devletleri donanmasında helikopterli çıkarma gemisi olarak hizmet etmiş USS Tripoli (LPH 10) Birinci Körfez Savaşında 18 Şubat 1991 tarihinde Basra Körfezin'deki Faylaka adaları açıklarında Irak donanması tarafından döşenmiş demirli bir mayının yakınında patlaması sonucunda geminin su hattı altında karınanın sancak tarafında 6x9 metre ebatlarında hasar meydana gelmiş ve harekâttan sakıt duruma gelmiştir, Gemi zorlukla Bahreyn'e intikal etmiş ve onarım faaliyetlerine başlanmıştır [1].



Şekil 1.1 : USS Tripoli (LPH 10) [1].



Şekil 1.2 : USS Tripoli'deki hasar [1].

Amerika Birleşik Devletleri donanmasında Ticonderoga sınıfı fırkateyn olarak hizmet etmiş USS Princeton (CG 59) Birinci Körfez Savaşında 18 Şubat 1991 tarihinde Basra Körfezi Faylaka adaları açıklarında Irak donanması tarafından döşenmiş 2 adet İtalyan yapımı MRP akustik mayının infilakı sonucu gemide görevli 7 personel çeşitli yerlerinden yaralanmış, ayrıca geminin omurgası, dümeni ve şaftında muhtelif hasarlar meydana gelmiştir [2].



Şekil 1.3 : USS Princeton (CG 59) [2].



Şekil 1.4 : USS Princeton'daki hasar [2].

Amerika Birleşik Devletleri donanmasında Oliver Hazard Perry sınıfı fırkateyn olarak hizmet etmiş USS Samuel B. Roberts 14 Nisan 1988 tarihinde Basra Körfezi'nde kontak tipi bir mayının infilakı sonucu makine dairesi karinasında hasar meydana gelmiştir. Oluşan delikten makine dairesine deniz suyu girişi olmuş, su imlası sonucu geminin stabilitesi bozulmuştur. Harekâttan sakıt kalan gemi yedeklenerek Dubai'ye intikal ettirilmiş ve orada gemi havuzlanarak onarımına başlanmıştır [3].



Şekil 1.5 : USS Samuel B. Roberts [3].



Şekil 1.6 : USS S.B. Roberts'daki hasar [3].

Yukarıda verilen sualtı patlatma örnekleri ve etkileri incelendiğinde tahrip kalıplarının maliyeti ve verdikleri tahmini hasar onarım maliyetleri aşağıda belirtilmiştir.

Çizelge 1.1 : Gemi onarım ve mayın maliyetleri.

	Onarım Maliyeti	Mayın Maliyeti
USS S. B. Roberts	96 Milyon \$	1500 \$
USS Tripoli	3.5 Milyon \$	1500 \$
USS Princeton	24 Milyon \$	10,000 \$

Daha çarpıcı örnekler ise Çanakkale Deniz Savaşı'nda yaşanmıştır. Karanlık Liman'a döşenen mayınların savaşın kaderini nasıl değiştirdiği bilinmektedir. Bu sebeple özellikle savaş gemilerinin, kriz ve harp dönemlerinde karşı karşıya kalabilecekleri olası sualtı patlamalarına yönelik olarak gemilerin bekası ve muharebe sahasında tevdi edilen vazifelerinin etkinlikle icrası için şok ölçümlerinin yapılması, bu ölçümler ile elde edilen verilerin gemi manevralarına/gemi emercensi rollerine etkilerinin gemi personeli tarafından bilinmesi gerekmektedir. Söz konusu ölçümler kapsamında en güvenilir yol olarak, gerçek şartlarda yapılacak denemeler ile elde edilecek veriler ışığında değerlendirmelerin yapılması olacaktır. Ancak, günümüzde gerçek şartlarda deneysel ölçüm hazırlıklarının hem çok zor olması hem de çok maliyetli olması bu deneylerin yeterince icra edilmemesine neden olmaktadır. Örneğin, ABD savaş gemilerinin gerçek koşullarda patlamaların şokuna dayanıklı olup olmadığını ölçmek için yüksek patlayıcı bir dizi test gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Amerikan Donanması'na ait USS Gerald R. Ford uçak gemisinin Atlas Okyanusu'nda 18 Haziran 2021 tarihinde 18 tonluk patlayıcı kullanılarak şok dayanımı ölçülmüştür. Patlayıcının bu denli büyük kullanılması 3.9 büyüklüğünde sismik harekete sebep olmuştur [4]. Ayrıca, fiili şok dayanımı ölçümü için uzun süren planlamaların yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu ve başka sebeplerden dolayı şok analizlerin sayısal yöntemler kullanılarak yapılması maliyet etkinlik sebebiyle tercih edilmektedir.



Şekil 1.7 : USS Gerald R. Ford'a istinaden yapılan şok testi [4].

1.1 Tezin Amacı

Sualtı patlaması sonucunda oluşan şok dalgasının maksimum seviyesinde iken yakınında bir suüstü gemisi veya denizaltının bulunması bahse konu platformların bekası açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada uluslararası literatürde genel kabule sahip ve 1940'lı yıllarda ortaya atılan şok dalgası basınç denkleminin [5] kontrollü bir sahada, belirlenen ağırlıkta bir patlayıcının sualtında infilak ettirilmesi ve belirli mesafelerde bulunan sensörler vasıtasıyla oluşan şok basıncının ölçümü ile doğruluğunun ispatlanması tezin amaçlarından ilkinin oluşturmaktadır.

İkinci aşamada, bir gemi kirişini temsil eden prizmatik duba benzeri bir yapı üzerindeki 3 boyutlu bir sualtı patlamasının etkileri, ALE yaklaşımı ile LS-DYNA yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar yoluyla araştırılması amaçlanmaktadır. Müteakiben elde edilen veriler ışığında KSF (Keel Shock Factor) ya da Türkçe karşılığıyla OŞF'nin (Omurga Şok Faktörü) kabul edilebilirliği incelenmektedir. Bu incelemelere esas olan simülasyon verilerinin kullanılmasıyla, çalışmada ele alınan yapı için maksimum deformasyonlar ve karşılık gelen OŞF değerleri arasında fonksiyonel bir ilişki kurulması amaçlanmaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Sualtı patlamalarının saha ölçümleri ve sayısal modellemeleri inceleyerek civardaki deniz araçlarında hasarın tahmin edilebilmesi için öncelikle sualtı patlamalarının hidrodinamik analizlerinin yapılması; müteakiben, su yüzeyine ulaşan şok dalgasının deniz araçları üzerindeki etkilerinin kıymetlendirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple literatür taraması iki alanda yapılmıştır.

Üzerinden yaklaşık 75 yıl gibi uzun bir süre geçmesine rağmen Cole tarafından 1948 yılında yazılan kitap günümüzde dahi en önemli kaynak olma özelliğini korumaktadır. Bu kitapta, özellikle sualtı patlamasının hidrodinamik açıdan tarifi yapılmış, tahrip sonucu ortaya çıkan şok dalgası ve gaz kabarcığının büyüklüğü ve dinamiği hakkında bilgiler verilmiştir [5]. Çalışmalar hitamında, sualtı patlaması sonucu ortaya çıkan şok dalgası basıncını sayısal olarak veren yarı ampirik formüller halen genel olarak kabul görmekte ve kullanılmaktadır.

Ding ve Buijk (2014) sualtında gerçekleşen bir patlamanın yine sualtında askıda bulunan silindirik bir model yapı üzerine etkilerini incelenmiştir. Bu kapsamda; MSC DYTRAN isimli bir programdan istifade ile bir model geliştirilmiştir. Patlama sonunda modelin hasara uğradığı ve içerisine su girişinin olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel veriler olmamasına rağmen, tamamen sayısal bir programın analiz sonuçları ile alınan verilerin doğru olduğu kıymetlendirilmiştir [6].

Rajendran ve Narasimhan (2006) bir sualtı patlamasının şok basıncının muhtelif ebatlardaki levhalar üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak karşılaştırmasını yapmıştır [7].

Pana ve diğerleri (2015) deneysel olarak 10 gramlık patlayıcı kullanılarak yapılan bir sualtı patlaması şok basınçları ile aynı düzeneğin ANSYS AUTODYN programından istifadeyle sayısal modeli ile elde edilen şok basınçlarının karşılaştırmasını yaparak sonuçlar üzerinde değerlendirmeler yapmıştır [8].

Trevino (2000) doktora tezinde ALE sayısal yöntem kullanılarak su ve hava içerisinde meydana gelen bir kısım patlama ile patlama sonucu oluşan şok basıncının bir yapı üzerindeki etkilerini kıymetlendirmiştir [9]. Yine bir doktora çalışmasında, Webster (2009) sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok dalgasının suüstü platformlar üzerindeki etkileri incelenmiştir [10]. Best (1991) doktora tezinde sualtı patlaması sonucu oluşan şok dalgasının suda yayılımına yönelik tespitlerde bulunmuştur [11].

Sualtı patlaması sonucu ortaya çıkan şok basıncını sayısal olarak veren ampirik formüllerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar da rapor edilmiştir [12-14].

Ayrıca, bir kısım araştırmacı tarafından ilgili bilgisayar destekli sayısal programların kullanılması ile hazırlanan simülasyonlarda sualtı patlamalarının fiziksel sonuçları incelenmiştir [15-16]. Bu bağlamda, Huang ve diğerleri (2019) tarafından sualtında şerit patlayıcıların infilakı ile meydana gelen şok dalgasının maksimum basınç ve impuls değerleri incelenmiştir. Müteakiben, deneylerden elde edilen veriler ışığında sayısal modeller kullanılarak söz konusu şok dalgasının metal plakalar üzerindeki deformasyonu incelenmiştir [15]. Kwon ve Fox (1993) silindir şeklindeki bir yapının sualtı patlaması sonucu ortaya çıkan şok dalgasına maruz kalması ile platformun doğrusal olmayan yapısal tepkisini hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle ölçmüştür [16].

Sayısal yöntemler kullanılarak sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok dalgasının yapılara olan etkileri de incelenmektedir. Ramajeyathilagam ve Vendhan (2004) tarafından sualtında patlama testleri yapılarak ince plakalar üzerindeki etkiler incelenmiş ve hesaplamalardaki hata paylarının ve plakalar üzerlerinde belirlenen noktalardaki deformasyonun tespitine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Deneyler sonucunda plakalar üzerinde meydana gelen deformasyonları üç grupta tarif etmişlerdir. Bunlar, kopma olmayan büyük deformasyonlar, kısmi deformasyonlar ve kopma/yırtılmalar. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile kalıcı deformasyonların tespitine yönelik olarak değerlendirmeler yapılmıştır [17].

Shin (2004) tarafından sonlu elemanlar modeli ile birlikte çift asimptotik yaklaşım kullanılarak platform üzerinde şok analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler test verileri ile karşılaştırılmıştır [18].

Hung ve diğerleri (2005) tarafından sualtı patlamaları ile şok parametreleri belirlenmiş, elde edilen basınç ve sönüm süreleri sayısal modellerle ulaşılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca şok dalgasının platform üzerinde yapacağı deformasyona yönelik değerlendirmeler yapılmıştır [19].

Hsu ve diğerleri (2014) tarafından su içerisinde bulunan silindirik bir yapının sualtı patlaması sonucu oluşan şok dalgalarına maruz kalması ile yapı üzerindeki gerilmelerin ölçümü yapılmıştır. Müteakiben elde edilen veriler sayısal yöntemler kullanılarak ulaşılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır [20].

Bu tezin ikinci kısmı sualtı patlamaları ve bunların yapılara etkilerinin sayısal modellenmeleri konusundaki çalışmalarla ilgilidir. Chisum (1996) doktora tezinde patlama sonrasında patlayıcının bulunduğu ortamdaki sıvı elemanları ciddi bir şekilde etkilendikleri için Lagrange tabanlı sonlu elemanlı mesh yapısının uygulanmasının doğru sonuçlar vermeyeceğini iddia ederek şok dalgasının hassas olarak ölçülebilmesi maksadıyla seçilecek zaman adımlarının çok küçük aralıklarla yinelenmesine ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Bunun sonucunda hesaplama süresinin uzamasına neden olacağı ve mesh bozulmalarının büyük olması durumunda ise sayısal yaklaşım hataları kaçınılmaz olacağı savunulmuştur [21].

Mair (1999) tarafından sualtı patlamalarını ve ilgili yapısal davranışları modellemede farklı yöntemlerin kapsamlı bir incelemesi sunarak CEL ve ALE'nin kullanılması ile ulaşılabilecek verilerin diğer sayısal programların vereceği verilere nazaran daha kapsamlı sonuçlara ulaşılabileceği ileri sürülmüştür [22]. Rajendran (2009)

ANSYS/LS-DYNA programını kullanarak sualtı patlaması ile oluşan şok dalgasının yapı üzerinde elastik ve elastik olmayan etkilerine yönelik sayısal deneyler yapmıştır [23]. Wang ve diğerleri (2016) sualtı patlamalarının sebep olduğu şok dalgasının sayısal simülasyonlarla analizinde mesh büyüklüğü etkisini incelenmiştir [24].

Barras ve diğerleri (2012) sualtı patlamaları sonucu ortaya çıkan gaz kabarcığının dinamik davranışı inceleyerek analitik bağıntıların verdiği değerlerle yapılan hesaplama sonuçlarını karşılaştırmıştır [25]. Murata ve diğerleri (1999) şok basıncın fluoropolymer barındıran sensörler ile ölçüm denemeleri sonucunda oluşan şok basınç ve gaz kabarcığı hakkında değerlendirmeler yapmıştır [26]. Wang ve diğerleri (2014) sualtı patlaması şok basıncın yayılma karakteristiği ile kavitasyon etkilerini incelemiştir [27].

Petrov ve diğerleri (2015), Euler ve Lagrange yaklaşımı ile satha yakın bir noktada infilak eden bir patlayıcının ortaya çıkardığı şok ve gaz kabarcığının analizini yapmıştır [28]. Zhang ve diğerleri (2014) tarafından sualtı patlaması ile ortaya çıkan gaz kabarcığının civardaki bir suüstü platformuna etkileri incelenmiştir [29].



2. SUALTI PATLAMALARININ FİZİKSEL TARİFİ

2.1 Patlayıcı Maddeler

Patlayıcı maddeler hararet veya şok tesiri ile kimyasal değişikliğe uğrayan, yüksek derecede ısı ve yüksek hacimde gaz oluşturan, katı, sıvı veya gaz halindeki kimyasal maddelerdir. Kuvvetli patlayıcıların pek çoğu kapalı bir sistemde olmadıkları veya bir şok tesirine maruz kalmadıkları sürece tutuşturuldukları zaman patlamazlar sadece yanarlar. Patlayıcı maddeler, kararsız haldeki kimyasal madde veya madde karışımları olup, darbe veya kıvılcım gibi bir etkiye maruz kalması sonucu kendi kendine ilerleyen son derece hızlı kimyasal reaksiyonlarla kararlı bileşiklere dönüşürken yüksek ısı, ses, gaz ve bunlara bağlı darbe etkisi ortaya çıkarır. Yanma süresi çok hızlı olduğundan yanma için gerekli oksijen havadan sağlanamaz. Bu nedenle patlayıcı maddenin yapısında oksijen ihtiva eden madde bulunması gerekir. Patlayıcı maddeler güçlerine göre alçak patlayıcılar ve yüksek patlayıcılar olarak ikiye ayrılırlar. Alçak ya da düşük güçte patlayıcılar nispeten yavaş (saniyede 400 metreye kadar) infilak eder veya belirli bir dayanma süresinden sonra katı halden, gaz haline dönüşür. Buna dumansız ve kara barutlar örnek olarak verilebilir. Yüksek patlayıcılarda ise gaz haline dönüşümde sürecinde patlama hızı saniyede 1000 m den 8500 m ye kadar ulaşır. Bu patlayıcılar ani patlama etkisinin gerektiği bazı mayın mermi ve bomba v.b. yerlerde kullanılır (TNT, C3, C4 gibi).

Patlayıcılarda göz önünde tutulması gereken hususlar; ağırlık kuvveti, hacim kuvveti, yoğunluk, detonasyon hızı, duyarlılık, suya direnç, duman karakteri, raf ömrü, desensitizasyona direnç, çevre sıcaklığına tolerans olarak belirlenebilir. Özellikle yeni nesil patlayıcılar için söz konusu hususlar önem arz etmektedir.

Her bir patlayıcı farklı reaksiyon özelliklerine sahip olması sebebiyle mühendislik çalışmalarında patlayıcılar ile yapılan hesaplamalarda standart bir patlayıcı kabul edilir ki bu da TNT'dir. Böylece hesaplamalar açısından tüm patlayıcılar TNT eşdeğerine dönüştürülür, bu amaçla TNT dönüşüm tabloları kullanılır [30].

Çizelge 2.1 : Patlayıcılar [31].

Patlayıcı Türü	İnfilak Hızı (m/sn)	İnfilak Hızı (ft/sn)	Duman Zehirliliği Durmu	Suya Dayanıklılık
Amonyum Nitrat	2700	8900	Tehlikeli	Zayıf
PETN	8300	27200	Hafif	Çok İyi
RDX	8350	27400	Tehlikeli	Çok İyi
TNT	6900	22600	Tehlikeli	Çok İyi
Tetrit	7100	23300	Tehlikeli	Çok İyi
Nitrogliserin	7700	25200	Tehlikeli	İyi
Kara Barut	400	1300	Tehlikeli	Zayıf
Amatol 80/20	4900	16000	Tehlikeli	Zayıf
A3 Bileşimi	8100	26500	Tehlikeli	İyi
B Bileşimi	7800	25600	Tehlikeli	Çok İyi
C4 Bileşimi (M112)	8040	26400	Hafif	Çok İyi
H6 Bileşimi	7190	23600	Tehlikeli	Çok İyi
Amonyum Nitrat	2700	8900	Tehlikeli	Zayıf
Tetritol 75/25	7000	23000	Tehlikeli	Çok İyi
Pentolit 50/50	7450	24400	Tehlikeli	Çok İyi
M1 Askeri dinamit	6100	20000	Tehlikeli	Zayıf
İnfilaklı Fitol	7300	24000	Hafif	Çok İyi

2.2 Şok Dalgası Basıncı

Sualtında patlayıcının infilakı ile patlayıcıdan küresel yayımlı bir şok dalgası gelişir ve çevreleyen sıvıda hızla yayılır. Şok dalgasından müteakiben patlamanın merkezinde bir gaz balonu şok dalgasına kıyasla çok daha yavaş bir hızda oluşur. Bu iki fiziksel olayı doğru bir perspektife oturtmak için, şok dalgasının yayılma aşaması milisaniyeler düzeyindeyken, gaz balonunun ya da kabarcığının genişleme ve büzülme aşamasının saniyeler düzeyinde olduğu belirtilmelidir. Bu nedenle, bu iki fiziksel olayın zaman aralığı ciddi farklılığa sahiptir. Zaman aralıklarındaki bu büyük fark, her iki aşamayı da birlikte incelemeyi amaçlayan hesaplama yöntemleri için zorluklar doğurmaktadır.

Şok dalgasının yayılımını için şöyle bir benzetme yapılabilir. Şok dalgası yayılımı, bir ucundan çekiçle vurulan elastik bir çubuk boyunca aksel olarak enine yayılan elastik dalgalara benzetilebilir. Şok dalgası oluşup patlayıcı çapının yaklaşık 2-3 katı mesafesine ulaştığında, şok dalgasının yayılma hızı sabit kalır ve lineer akustik davranışa geçer. Ancak, patlayıcı çapının 2-3 katı mesafesi içerisinde yayılma lineer değildir [32]. Çoğu sualtı patlaması uygulamalarında, yakın mesafedeki linner olmayan yayılım göz ardı edilerek lineer akustik yayılımın geçerli olduğu kabul edilir. Çok yakın veya yakın temas senaryoları için doğrusal olmayan yayılma özellikleri dikkate alınmalıdır.

Zamanın bir fonksiyonu olarak basınç değişim eğrisinden ve ifadesinden görülebileceği gibi, şok dalgası basıncı üstel bir fonksiyonla temsil edilebilir. Basınç fonksiyonu sıfır zamanında tepe değerinde başlar ve zaman içinde $t=0$ milisaniyede $1/e$ seviyesine düşer.

Sualtı patlama deneyleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak bir sualtı patlaması sonucu oluşacak şok dalgasının neden olduğu maksimum ya da tepe (peak) basınç değeri ampirik olarak

$$P_m = k \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

bağıntısı ile verilmektedir [5]. Yukarıdaki ifadede, geleneksel olarak W: pound cinsinden tahrip kalıbının ağırlığı, R: feet cinsinden mesafe ve $\alpha=1.16$ olarak alınan bir sabit ($W^{1/3}/R > 0.3$ haricinde) şeklinde verilir. Bu bağıntı tüm çalışmalarda esas alınmakta olup, ileride üzerinde ayrıntılı olarak durulacaktır.



3. SUALTI PATLAMASI SAHA ÖLÇÜMLERİ

Sualtındaki patlamalar karmaşık fiziksel durumlar ortaya çıkarmaktadır. Bir sualtı patlamasıyla birlikte patlayıcının merkezinden itibaren patlayıcının dışına doğru infilak dalgasının yayılımı başlar, söz konusu infilak dalgası yaklaşık küresel bir geometriye sahiptir ve yüksek sıcaklık ile basınca sahiptir. İnfilak dalgasının su içinde yayılması büyük bir basınç kuvvetini suya aktarır ve su içerisinde bir şok dalgasının oluşumuna neden olur [27]. Şok dalgasının başlangıçtaki hızı sesin sudaki hızı olan 1500 m/s nin çok üzerindeyken zaman içinde üstel olarak azalarak ses dalgası hızına iner. Öte yandan patlamanın neden olduğu yüksek sıcaklık ve basınç suyun buharlaşmasını ve buna bağlı gaz kabarcığı oluşumuna yol açar. Gaz kabarcığının içerisindeki yüksek sıcaklık kabarcığın büyümesine neden olur. Bir taraftan suyun kaldırma kuvveti kabarcığı yüzeye taşıırken diğer taraftan kabarcığın hacmen büyümesi iç basıncın düşmesine ve belli bir seviyeden sonra hidrostatik dış basıncın etkisi ile tekrar hacmen küçülmesine neden olur. Bu hacimsel genişleme ve büzülme ard arda salınımlar halinde birkaç kez tekrarlanır.

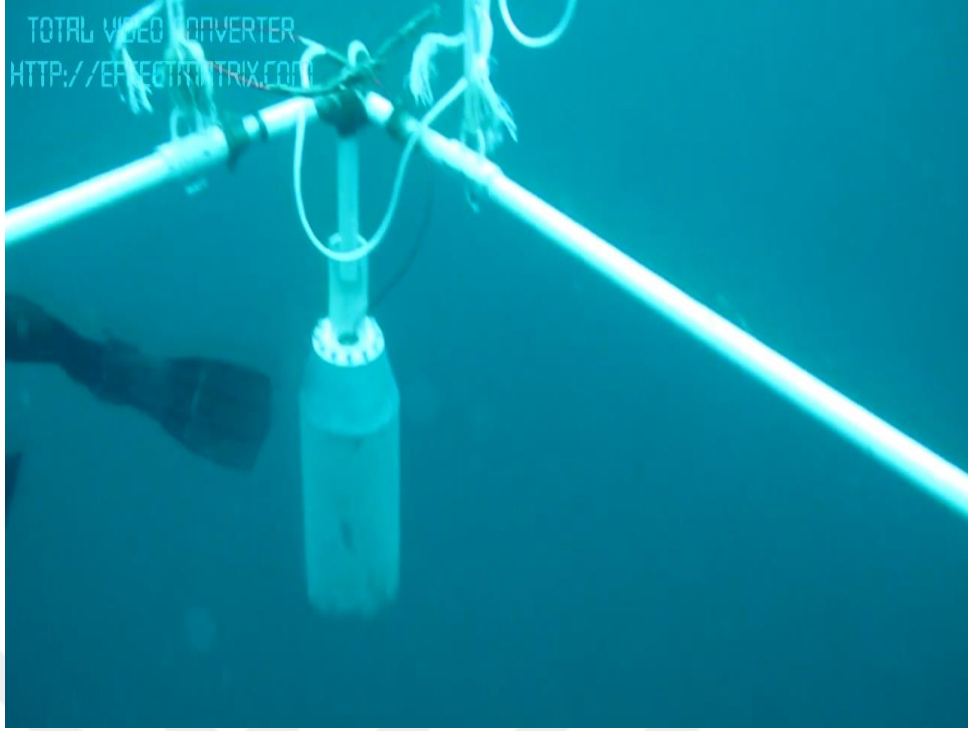
Yukarıda açıklandığı üzere, patlama ile birlikte oluşan temel iki olayı -şok dalgasının yayılımı ve gaz kabarcığının oluşumu- periyotları açısından incelediğimizde şok dalgasının gaz kabarcığının en büyük hacme sahip olduğu düzeye ulaşması $t_s \sim 6 \times 10^{-3}$ s iken gaz kabarcığı aynı mesafeye $t_s \sim 1$ s sürmektedir [28]. Böylece söz konusu iki davranışın (şok dalgası dinamiği ve gaz kabarcığı dinamiği) birbirinden bağımsız olarak incelenebileceği ortaya çıkmaktadır.

Sualtı patlamaları temaslı ve temassız olmak üzere iki farklı yaklaşımla ele almak uygun olacaktır. Patlayıcının doğrudan hedef ile temas etmesi durumunda, patlama hitamında temas bölgesinde bölgesel bir hasar meydana gelirken temassız sualtı patlamalarında, hedef tamamen patlama sonrasında oluşan şok dalgası ve kabarcığın etkisine maruz kalarak, önemli ölçüde plastik deformasyona uğrar. Bu çalışmada, bir suüstü platformuna belirli bir mesafede meydana gelen patlama sonucu açığa çıkan şok dalgasının etkilerinin tespiti hedeflendiğinden, saha ölçümlerinde temassız sualtı patlaması söz konusudur.

The diagram illustrates a cable-stayed bridge model for a fire experiment. The bridge deck is 18 m long. A fire source (red star) is located on the left side, with a width of 2 m. The fire source is positioned 6 m from the left end of the deck. The bridge deck is supported by a central pier (R=3 cm) and two side piers (R=3 cm). The water level (Su Hattı) is indicated at the top. Dimensions include a total length of 18 m, a fire source width of 2 m, and various vertical and horizontal distances. A legend at the bottom identifies symbols for weight (Ağırlık), explosive (Patlayıcı), steel pipe (Çelik Boru), rope (Halat), sensor (Sensör), buoy (Şamandıra), steel pipe (Çelik Boru), and wire (Misina).

	Ağırlık		Sensör
	Patlayıcı		Şamandıra
	Çelik Boru (R=1 cm)		Çelik Boru (R=3 cm)
	Halat (R=4 cm)		Misina

16



Şekil 3.2 : L çerçeve ve patlayıcı.

Söz konusu L çerçeve ve patlayıcının sualtında konumlandırılmasında dalgıçlar kullanılmış, infilak öncesi tüm kontroller hassas bir şekilde tamamlanmıştır.



Şekil 3.3 : L çerçeve ve sensor bağlantısı.



Şekil 3.4 : Sensor bağlantısı.

Basınç-zaman değişimleri, rezonanssız, yüksek voltaj çıkışlı, PCB serisi basınç sensörleri tarafından kaydedilmiştir. Söz konusu PCB serisi basınç sensörleri dinamik basınç sensörleri olarak tarif edilmekte olup yüksek statik basınç ortamlarında dinamik basınç dalgalanmalarını, titreşimleri ve türbülansı algılama imkân kabiliyetine sahiptir. Bu kapsamda, sualtı patlamalarında ortaya çıkacak şok dalgasının basınç değerlerini ölçmede etkinlikle kullanılacağı değerlendirilmiştir.

Test düzeneğinde, 1-7 numaralı sensörler aynı düzlemde konumlandırılmalarına karşın 8 numaralı sensör diğerlerinin bulunduğu düzleme dik bir düzlem üzerinde konumlandırılmıştır. Böylece, 7 ve 8 numaralı sensörlerin patlayıcıdan olan mesafeleri eşit olarak 9 m. ancak bulundukları düzlemler birbirine diktir. Düzlemlerin bu şekilde seçilimi, patlamada doğrultudan ötürü kaynaklanabilecek farklılıkları gözlemek amacıyla. Gerçekte de bu iki sensörün basınç kayıtları, patlayıcıdan aynı mesafede olmalarına karşın, gerek tepe değerlerde gerekse zamana bağlı değişimlerde belirgin farklılıklar göstermiştir. Sensörler ile patlayıcı arasındaki mesafeler Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

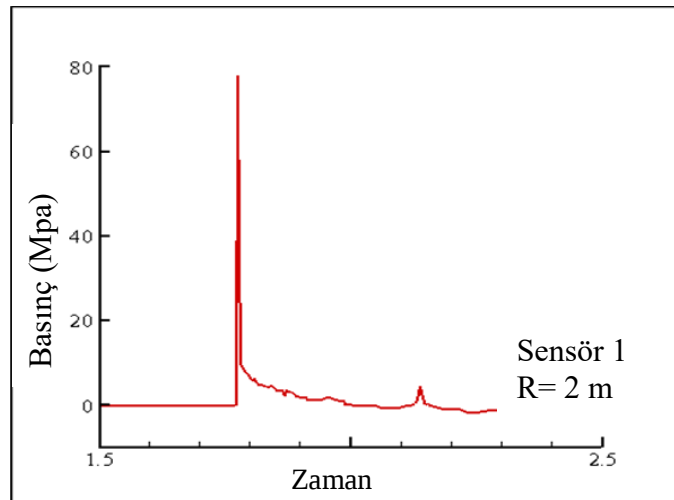
Çizelge 3.1 : Sensörlerin patlayıcıya nazaran mesafeleri.

<i>Sensör Numarası</i>	<i>Patlayıcıdan Mesafe (m)</i>	<i>Patlayıcıdan Mesafe (ft)</i>
1	2,0	6,560
2	6,0	19,680
3	12,0	39,360
4	18,0	59,040
5	7,6	24,928
6	7,7	25,256
7	9,0	29,520
8	9,0	29,520

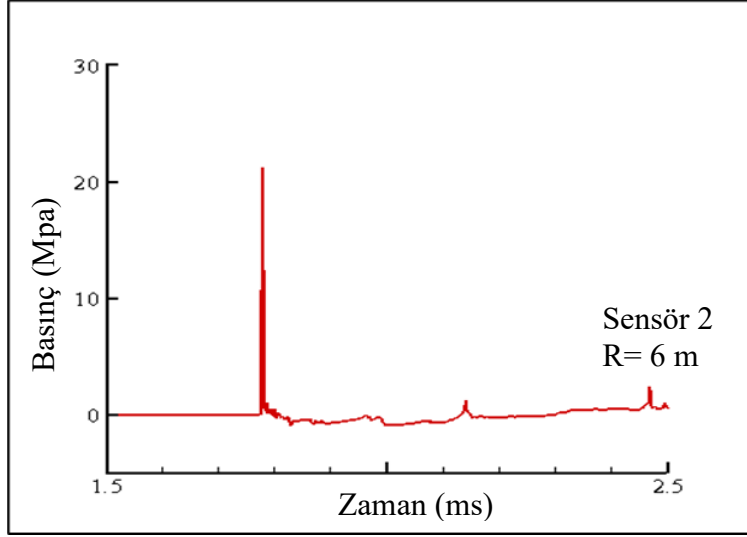
Patlama sonucu elde edilen şok basınç değerleri aşağıdaki grafiklerde, Şekil 3.5-12, gösterilmektedir. Grafiklerdeki şok basınç değeri sonrasında kaydedilen ikincil değerler dikkate alındığında her bir sensör için ikincil değerlerin birbirlerinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Bahse konu farklılıkların

- Birincil kabarcığın titreşimlerinden,
- Deniz tabanının sebep olduğu basınç yansımalarından,
- Serbest su yüzeyinin neden olduğu basınç yansımalarından,

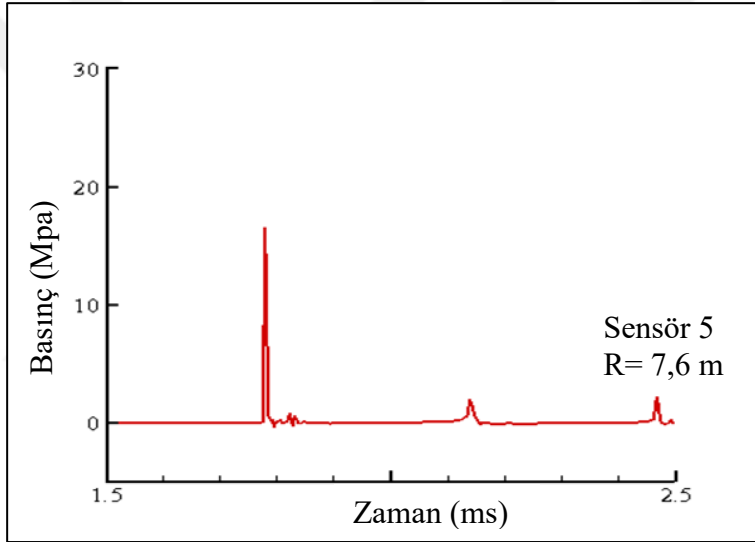
kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.



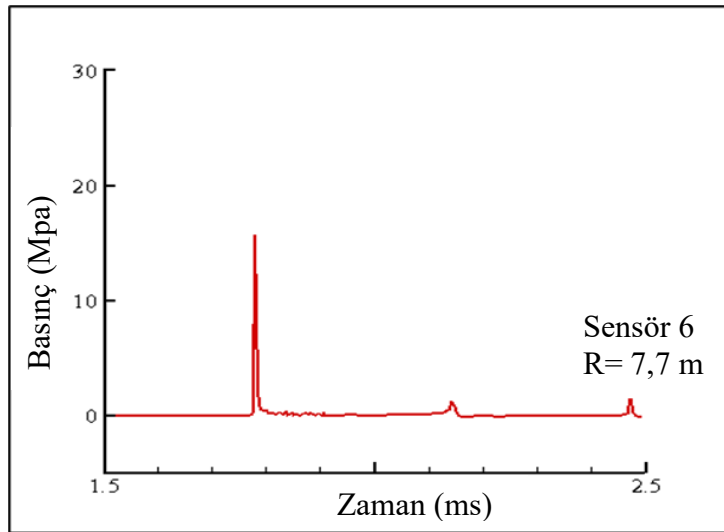
Şekil 3.5 : 1 numaralı sensör basınç değeri.



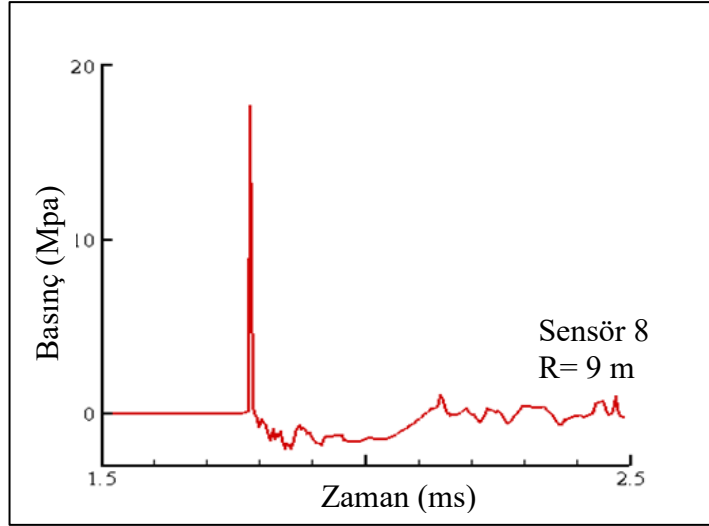
Şekil 3.6 : 2 numaralı sensör basınç değeri.



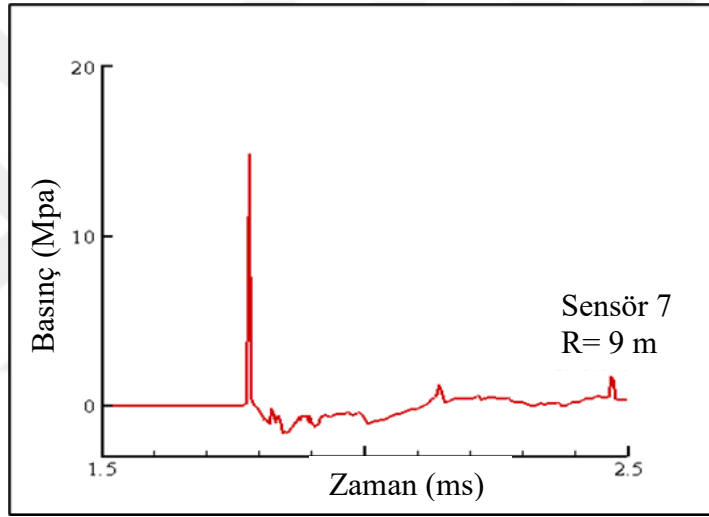
Şekil 3.7 : 5 numaralı sensör basınç değeri.



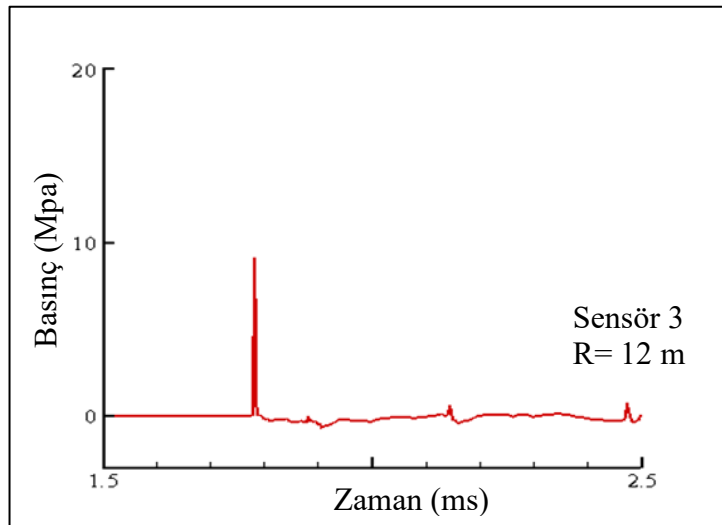
Şekil 3.8 : 6 numaralı sensör basınç değeri.



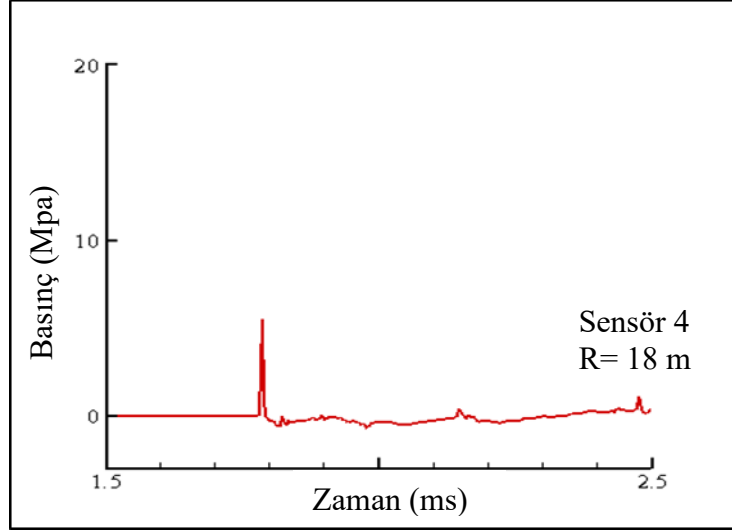
Şekil 3.9 : 8 numaralı sensör basınç değeri.



Şekil 3.10 : 7 numaralı sensör basınç değeri.



Şekil 3.11 : 3 numaralı sensör basınç değeri.



Şekil 3.12 : 4 numaralı sensör basınç değeri.

3.1 Sualtı Patlaması Denemesinde Basınç Değerlerinin Tespit Edilmesi

Sualtı patlaması sonucunda elde edilen basınç değerleri ile Bölüm 2’de belirtilen amprik formül (2.1) ile hesaplanan şok basınçları aşağıda belirtilen çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Basınç değerleri (MPa).

Sensör Numarası	Patlayıcıya Olan Mesafe- R (Metre)	Hesaplanan Şok Basıncı P (MPa)	Testte Ölçülen Şok Basıncı P (MPa)
1	2	79,2	77,5
2	6	22,9	21,1
3	12	10,5	9
4	18	6,6	5,5
5	7,6	17,5	16,4
6	7,7	17,3	15,5
7	9	14,5	14,8
8	9	14,5	17,7

Çizelge 3.3 : Basınç değerleri (lb/ft²).

Sensör Numarası	Patlayıcıya Olan Mesafe- R (Feet)	Hesaplanan Şok Basıncı P (lb/ft ²)	Testte Ölçülen Şok Basıncı P (lb/ft ²)
1	6,56	11487,17	11240,60
2	19,68	3321,42	3060,34
3	39,36	1522,92	1305,36
4	59,04	957,26	797,72
5	24,93	2538,20	2378,66
6	25,26	2509,19	2248,12
7	29,52	2103,08	2146,59
8	29,52	2103,08	2567,21

Şok dalgası tepe (pik) basınç değeri, bir deniz yapısında patlayıcının yaratacağı olası hasarın değerlendirilmesinde en önemli parametredir. Bu nedenle, bu değer platformların şok dayanımları değerlendirmesinde öncelik taşımaktadır.

Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te tüm sensörlerde ölçülen basınç değerleri ile patlayıcı ile sensörler arasındaki mesafeler belirtilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere 7 ve 8 numaralı sensörlerin patlayıcıya olan mesafeleri aynı olmakla birlikte yönleri farklıdır. Bu iki sensörde ölçülen maksimum basınç değerleri arasında %18'lik bir fark bulunmaktadır. Bu farkın sensörlerin farklı yönlerde bulunmasından dolayısıyla doğrultusal etkilerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

3.2. Şok Dalgası Basıncı

Bir şok dalgası, patlamanın kimyasal olarak gerçekleşmesinin ardından aynı anda denecek kadar kısa bir sürede (10^{-7} saniyeden daha az) maksimum seviyesine (pik ya da tepe noktası) ulaşır. Müteakiben bu maksimum basınç yaklaşık olarak üstel bir şekilde azalmaya başlar. Basıncın üstel sönümünü matematiksel olarak modelleyen yarı ampirik formüller geliştirilmiştir [5, 12].

$$p(t)=p_m e^{-t/\theta} \quad (3.1)$$

Bu formülde $p(t)$ anlık basıncı, p_m maksimum basıncı, t zamanı ve θ basıncın maksimum değerinin $1/e$ 'sine düştüğü sönüm süresini ($p(\theta) = p_m/e$) ifade etmektedir. (3.1)'deki formül $0 \leq t \leq \theta$ şartında geçerlidir. Maksimum basınç p_m ve sönüm süresi θ , patlayıcı miktarına ve patlayıcı ile gözlemin yapıldığı nokta arasındaki mesafeye bağlıdır. p_m ve θ değerleri aşağıda belirtilen ampirik ilişkilerle ifade edilir.

$$p_m = k_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{\alpha_1} \quad (3.2)$$

$$\theta = k_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{\alpha_2} \quad (3.3)$$

p_m : Maksimum şok basınç değeri

W : Tahrib kalıbının TNT eşdeğeri olarak kütlesi

R : Mesafe

k_1, α_1 ile k_2, α_2 düzeltme parametreleri olarak tarif edilir.

Düzeltilme parametreleri yapılan deneyler ve matematiksel analizler sonucunda p_m , psi ve θ , milisaniye olarak alındığında $k_1 = 21600$, $\alpha_1 = 1.13$ ve $k_2 = 0.058$, $\alpha_2 = -0.22$ değerlerinin uygun olduğu belirlenmiştir [12]. Büyüklükler SI birimleri cinsinden ifade edildiğinde ise

$$p_m = 52.4 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13} \quad (3.4)$$

$$\theta = 92.5 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{-0.22} \quad (3.5)$$

olarak verilir ki burada p_m megapaskal (MPa), W kilogram (kg), R metre (m) ve θ mikrosaniye (μs) dir. Maksimum basınç değeri için yukarıda verilen (3.4) ifadesi Zamyshlyayev ve Yakovlev [13] tarafından yakın mesafeler için değiştirilmiştir. Buna göre elde edilen denklem aşağıda belirtilmiştir. Burada r patlayıcının yarıçapıdır ve tüm birimler denklem (3.4) için belirtilen birimlerle aynıdır. Düzeltmenin yalnızca patlayıcıya yakın bölgede $6 < R/r < 12$ yapıldığına dikkat edilmelidir, daha uzak bölgelerde p_m ifadesi (3.4) ile aynıdır.

$$\begin{aligned}
p_m &= 44.1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.5} ; \quad 6 < \frac{R}{r} < 12 \\
p_m &= 52.4 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13} ; \quad 12 \leq \frac{R}{r} < 240
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

3.3 Ölçülen Basınç Değerleri İle Katsayıların Yeniden Değerlendirilmesi

Tablo 1'de verilen veriler kullanılarak denklem (3.2)'deki k_1 , α_1 katsayıları **en küçük kareler** yöntemiyle yeniden belirlenmiştir. Bu bağlamda öncelikle denklem (3.2)'nin doğal logaritması alınır.

$$\ln p_m = \ln k_1 + \alpha_1 \ln \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right) \tag{3.7}$$

Ölçülen ve tahmin edilen basınç değerleri arasındaki farkların kareleri olarak tanımlanan toplam hata

$$E^2(k_1, \alpha_1) = \sum_{i=1}^N \left[\ln p_{m_i} - \ln k_1 - \alpha_1 \ln \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right) \right]^2 \tag{3.8}$$

olacaktır. Burada N, toplam veri noktası sayısını temsil etmektedir. En küçük kareler yöntemi, eldeki verilerin kullanılarak toplam hatayı en aza indirecek şekilde k_1 ve α_1 parametrelerinin hesaplanmasını amaçlar. Bu amaca ulaşmak için hata fonksiyonu $E^2(k_1, \alpha_1)$ 'nin k_1 ve α_1 'e göre ayrı ayrı türevleri alınarak sıfıra eşitlenir. Bu noktaların toplam hatayı en az yapan değerlere karşı gelmesi beklenir. Denklem (3.8)'in türevleri alındığında bilinmeyen $\ln k_1$ ve α_1 'in belirlenmesi için aşağıdaki lineer denklemler elde edilir.

$$N \ln k_1 + \alpha_1 \sum_{i=1}^N \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right) = \sum_{i=1}^N \ln p_{m_i} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
\ln k_1 \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right) + \alpha_1 \sum_{i=1}^N \left[\ln \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right) \right]^2 \\
= \sum_{i=1}^N \ln p_{m_i} \ln \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right)
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

Saha ölçümlerinde kullanıldığı üzere $W = 25$ kg alınıp tüm sensörler ($N=8$) için Çizelge 3.2’de listelenen maksimum basınç değerleri p_{mi} ve karşı gelen nesafeler R_i kullanılarak, yukarıdaki denklemlerden $\ln k_1$ ve α_1 değerleri kolayca elde edilir. Sonuç olarak, $k_1 = 51.5$ ve $\alpha_1 = 1.18$ bulunur. Saha ölçümleri kullanılarak hesaplanan bu değerlerin, literatürde genel kabul gören $k_1 = 52.4$ ve $\alpha_1 = 1.13$ değerlerine oldukça yakın olduğu açıktır. Ayrıca, α_1 parametresi için literatürde $\alpha_1 = 1.16$ ve $\alpha_1 = 1.18$ gibi daha yüksek değerlerin de rapor edildiği [5, 18] göz önüne alındığında bulunan sonucun makul olduğu değerlendirilmektedir.

Yukarıda yapılan hesaplamalarda, (3.2) denklemi ile ifade edilen basıncın önce doğal logaritması alınmış, (3.7), ardından toplam hata ifadesinde kullanılmıştır. Bu tür üstel fonksiyonlar söz konusu olduğunda hemen her zaman logaritma alınmasının nedeni sonuçta ortaya çıkan denklemlerin, (3.9) ve (3.10), lineer ve kolayca çözülebilir olmasıdır. Ancak (3.2) ile verilen basınç ifadesi p_m , logaritması alınmadan doğrudan hata fonksiyonunda kullanılabilir. Böyle bir yaklaşım sonuçta ortaya çözülmesi zor bir denklem sistemi çıkaracaktır buna karşın minimize edilen hata gerçek hata değerine -logaritmasına değil- karşı gelecektir. Bu yaklaşım izlendiğinde toplam hata basitçe

$$E^2(k_1, \alpha_1) = \sum_{i=1}^N \left[p_{mi} - k_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right)^{\alpha_1} \right]^2 \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilir. Yukarıdaki denkleminin k_1 ve α_1 'e göre türevinin alınması sırasıyla k_1 ve α_1 'in elde edilmesi için aşağıdaki denklemleri verir.

$$k_1 \sum_{i=1}^N \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right)^{2\alpha_1} = \sum_{i=1}^N p_{mi} \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right)^{\alpha_1} \quad (3.12)$$

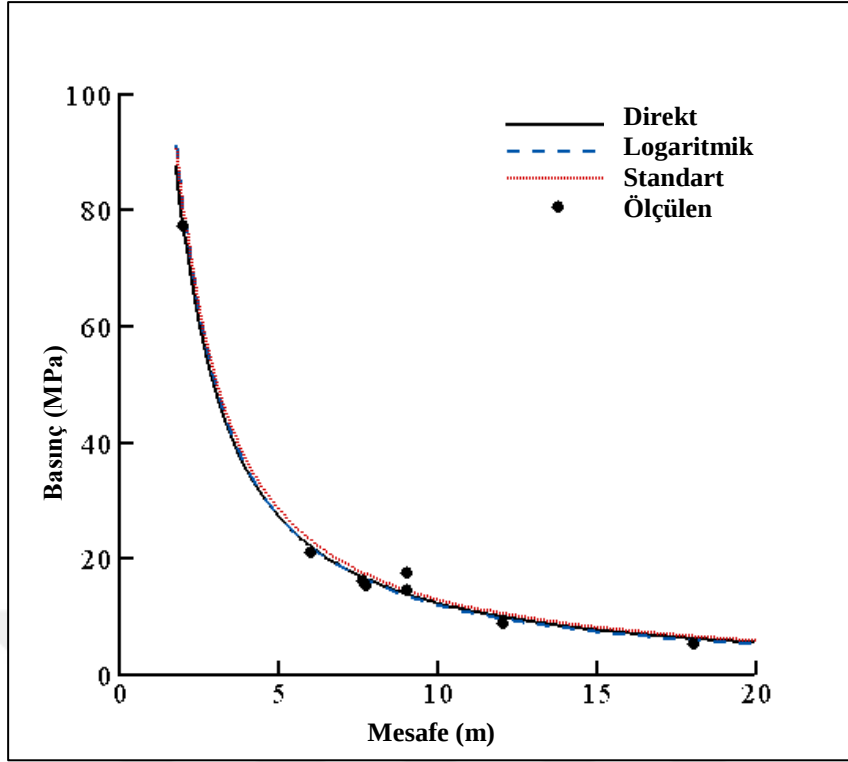
$$k_1 \sum_{i=1}^N \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right)^{2\alpha_1} \ln \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right) = \sum_{i=1}^N p_{mi} \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right)^{\alpha_1} \ln \left(\frac{W^{1/3}}{R_i} \right) \quad (3.13)$$

(3.12) ve (3.13) denklemlerinden açıkça görüldüğü üzere k_1 ve α_1 'i çözmek (3.9) ve (3.10) denklemlerinden k_1 ve α_1 'i çözmek kadar basit değildir. Çözümü elde etmek için sayısal bir tarama yapmak muhtemelen en uygun yaklaşım olacaktır. Bu amaçla, α_1 katsayısı, $\Delta\alpha = 10^{-5}$ gibi küçük artışlarla 1 den başlayarak 2 değerine ulaşana kadar artırılırken, k_1 katsayısı ise her bir α_1 değeri için (3.12) ve (3.13)'ten ayrı ayrı

hesaplanır. (3.12) ve (3.13)'ten hesaplanan iki k_1 değeri arasındaki fark, 10^{-3} gibi önceden belirlenmiş küçük bir değerden daha az olana kadar her adımda kontrol edilir. Bu kriter sağlandığında, kullanılan α_1 değeri ve buna karşılık gelen iki k_1 değerinin ortalaması çözüm olarak alınır. Bu yaklaşımla Çizelge 3.2'deki $N = 8$ veri değerleri kullanılarak $k_1 = 50.3$ ve $\alpha_1 = 1.14$ olarak belirlenmiştir. Hesaplanan bu değerler (3.9) ve (3.10) numaralı denklemlerden elde edilen $k_1 = 51.5$ ve $\alpha_1 = 1.18$ sonuçları ile karşılaştırıldığında farklılıkların çok büyük olmamakla birlikte dikkate değer olduğu görülmektedir.

En küçük kareler yönteminin bu iki farklı uygulamasında (logaritma alınarak ve logaritma alınmadan) tespit edilen katsayılardaki farklılıkların nedenlerini şöyle yorumlayabiliriz. Denklem (3.8) kullanılarak hesaplanan hatalar logaritmiktir buna karşın (3.11) denklemi ile hesaplanan hatalar ise direk ya da doğrudan hatalardır. Logaritmik fonksiyonun doğrusal ya da lineer bir fonksiyon olmaması sebebiyle de (3.8) ve (3.11) yoluyla hesaplanan hata değerleri farklıdır. Farklı hata değerlerinin minimize edilmesi ise sonuçta farklı k_1 ve α_1 değerleri vermektedir. Bu bakımdan, (3.11) denklemi ile formüle edilen doğrudan hataları en aza indiren ikinci yaklaşımın ölçülen ve hesaplanan basınç değerleri arasında daha az toplam hata ürettiği için daha doğru sonuçlar verdiği söylenebilir. (3.11) ile tanımlanan direk toplam hata ifadesi kullanılarak yapılan hesaplamalar ilk bulunan $k_1 = 51.5$ ve $\alpha_1 = 1.18$ değerleri için $E^2(k_1, \alpha_1) = 30.59$ değerini verirken ikinci hesaplama sonucu bulunan $k_1 = 50.3$ ve $\alpha_1 = 1.14$ değerleri için $E^2(k_1, \alpha_1) = 19.65$ değerini vermektedir. Görüldüğü üzere, doğrudan hata değeri gerçekten de ikinci yaklaşımla minimize edilmektedir ve ilk yaklaşımın toplam doğrudan hata değeri daha yüksektir.

Şekil 3.13'te (3.2) denklemi ile verilen basınç tepe değerleri üç farklı katsayı seti için ayrı ayrı hesaplanmış ve çizdirilmiştir: Standart veya genel olarak kullanılan parametreler, $k_1 = 52.4$, $\alpha_1 = 1.13$, logaritmik yaklaşım sonucu hesaplanan $k_1 = 51.5$, $\alpha_1 = 1.18$ ve son olarak doğrudan yaklaşım ile hesaplanan $k_1 = 50.3$, $\alpha_1 = 1.14$. Şekil 3.13'te görüldüğü üzere tüm fonksiyonlar birbirine oldukça yakındır ve farklılıklar nispeten küçüktür.



Şekil 3.13 : Ölçülen ve hesaplanan basınç değerleri.

Öte yandan, Hung ve diğerleri [19] tarafından laboratuvarda yapılan ölçümler sonucunda aynı katsayılar $k_1 = 59.5$, $\alpha_1 = 1.29$ olarak verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerlerden oldukça farklı olmaları, laboratuvar ortamındaki bir çalışmadan kaynaklanmalarına bağlanabilir. Açık deniz koşullarıyla karşılaştırıldığında, deneylerin nispeten küçük ve kapalı bölgelerde yapılmasının, özellikle yüz ve derin yansımaları (açık denizde derin çamur, kum vs olması ile laboratuvar şartlarında derin beton tabanlı olması gibi), akıntı ve dalga gibi çevresel faktörleri, ölçüm yapılan yerdeki suyun yoğunluğu gibi farklılıklar bahse konu farkın oluşmasında ana neden olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen açık deniz saha ölçümleri kullanılarak hataların doğrudan yaklaşım yoluyla belirlenmesi sonucunda hesaplanan k_1 , α_1 değerlerine göre tepe ya da maksimum basınç değeri için

$$p_m = 50.3 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.14} \quad (3.14)$$

bağıntısı önerilmektedir. Daha önce belirtildiği burada p_m megapaskal (MPa), W kilogram (kg), R metre (m) cinsindendir. Mevcut formülün (3.14) sonuçlarının Şekil 3.13'te belirtilen standart formüle oldukça yakın olduğu görülmektedir. Küçük

farklılıklar temelde saha çalışmalarında kullanılan yeni sensörlerin 1940'ların teknolojisine oranla iyi olmasına atfedilebilir ki bu da doğal olarak gözlenen farklılıklara yol açacaktır.

Çizelge 3.4 : Farklı k_1 ; α_1 çiftleri ile hesaplanan basınç değerleri ile ölçülen basınç değerlerinin karşılaştırılması.

Mesafe R (m)	Ölçülen (MPa)	Direkt (MPa)	Logaritmik (MPa)	Standard (MPa)
2.0	77,48	77,42	80,65	80,49
4.0	21,13	22,18	22,08	23,26
7.6	16,34	16,95	16,71	17,81
7.7	15,53	16,70	16,46	17,55
9.0	14,82	13,99	13,69	14,71
9.0	17,76	13,99	13,69	14,71
12.0	9,05	10,08	10,63	10,63
18.0	5,47	6,36	6,72	6,72

3.4. Saha Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Çalışmanın ilk aşamasında açık denizde kontrollü bir sualtı patlaması gerçekleştirilmiş ve bu patlama sırasında sekiz ayrı sensör tarafından kaydedilen basıncı ölçüm kayıtları sunulmuştur. Sensörlerin tümünün, sadece yaklaşık 1.8 milisaniyelik bir şok dalgasına maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Açık denizde bu tür denemelerin zorlukları sebebiyle oldukça nadiren gerçekleştirildiği dikkate alındığında bu çalışma ile elde edilen sonuçların sayısal simülasyon sonuçlarının doğruluğunun kontrolü maksadıyla kullanılabileceği ve bu bağlamda söz konusu simülasyonlar için bu çalışmanın çok faydalı olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca bu çalışma ile, yarı deneysel maksimum basınç formülünün parametreleri, hata fonksiyonunun iki farklı formülasyonu aracılığıyla hesaplanarak yeniden belirlenmiştir. Bu kapsamda hesaplanan katsayılar kullanılan hata fonksiyonuna bağlı olarak küçük farklılıklar göstermiştir. Ancak bu verilerin genel olarak kabul edilen

değerlere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu bağlamda (3.14) denklemi ile önerilen formülün sualtı patlamalarında maksimum şok basıncının tespitinde etkinlikle kullanılabileceği değerlendirilmektedir.



4. SUALTI PATLAMA MODELİ VE SİMÜLASYONLAR

Askeri denizcilik alanında kritik öneme sahip konulardan biri sualtı mayınları gibi sualtı silahlarına karşı gemi dayanımının incelenmesidir. Günümüzde deneysel olarak gerçekleştirilmesi hem çok zor hem de çok maliyetli olan bu konunun bilgisayar destekli analiz yöntemleri kullanılarak yapılmış başarılı örnekleri bulunmaktadır. Askeri mühendislik çalışmalarının birçoğunda olduğu gibi, bu konuda da karşılaşılan en büyük zorluk, literatürde yeterli açık kaynak bulunmamasıdır. Yabancı ülkelere ait mühendislik ekiplerinin birçoğu kendi bünyelerinde geliştirdikleri analiz yazılımlarını kullanmakta veya ticari yazılımlarla yaptıkları çalışmalar için literatür katkısı sunmamaktadır. Bilgisayar destekli analizlerin en zorlu aşaması olan “sonuçların değerlendirilmesi” ve “doğruluğun ve kesinliğin ölçülmesi” bölümlerinde deneysel çalışmaların ve açık literatürün eksikliği hissedilmektedir. Yapılan analizler incelendiğine analizlerin tamamına yakınının ticari bir yazılım olan ANSYS LS-Dyna programı yardımı ile yapıldığı görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada da oluşturulacak model analizinde ANSYS LS-Dyna programı kullanılmasına karar verilmiştir.

4.1. Sualtı Patlama Simülasyonlarının Hazırlanması

Bu kısımda, sualtı patlama simülasyonları için parametrelerin belirlenmesi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

4.1.1. Arbitrary lagrangian-eulerian (ALE) metodu

Sualtı patlamaları, yüksek basınçlı şok dalgalarının yanısıra sıvı ve gaz patlamaları da oluşturur. Patlama sonrasında patlayıcının bulunduğu ortamdaki sıvı elemanları ciddi bir şekilde etkilendikleri için Lagrange tabanlı sonlu elemanlı ağ yapısının uygulanması doğru sonuçlar vermeyecektir. Ayrıca şok dalgasının hassas olarak ölçülebilmesi maksadıyla seçilecek zaman adımlarının çok küçük aralıklarla yinelenmesine ihtiyaç duyulacaktır. Bu ise hesaplama süresinin uzamasına neden olacaktır. Ağ bozulmalarının büyük olması durumunda ise sayısal yaklaşım hataları kaçınılmaz olacaktır [21].

Öte yandan, Euler tabanlı sonlu eleman modellemesi kullanarak sabit bir ağ sistemi üzerinde Navier-Stokes denklemleri kullanılarak çözümler üretilebilir. Böylece, Lagrange yaklaşımından farklı olarak, sabit ağ düzenine sahip Euler kodları, ağ bozulmalarını önler. Lagrange, Euler, Coupled Eulerian–Lagrange (CEL) ve Arbitrary Lagrange–Eulerian (ALE) gibi çeşitli tekniklere sahip kodlar mevcuttur. Mair (1999) sualtı patlamalarını ve ilgili yapısal davranışları modellemede bu farklı yöntemlerin kapsamlı bir incelemesini sunmuş olup CEL ve ALE'nin diğerleri arasında daha kapsamlı sonuçlara ulaşılabilirliğini ileri sürmüştür [22].

ALE Metodu sonlu elemanlar analizinde kullanılan ayırıklaştırma yöntemlerinden Lagrange ve Euler yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım olup, bu çalışmadaki simülasyon analizlerinde ALE yönteminden faydalanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, bir sualtı patlaması civarında bulunan bir platformun yapısal davranışını tahmin etmek amacıyla da ALE formülasyon tekniğine sahip LS-DYNA isimli ticari yazılım kullanmıştır. Şok dalgası yayılımının etkileri, kodun akışkan ortamdaki patlayıcı yük modellemesi ile modellenirken, yapısal tepki sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir.

4.1.2. Sınır şartları ve kabuller

Sualtı patlama modeli hazırlanırken doğru verilere ulaşmak maksadıyla aşağıda belirtilen sınır şartları ve kabuller dikkate alınmıştır.

Patlamanın derin suda modellenmesi: Şok dalgasının meydana getireceği dip yansımalarını göz ardı etmek maksadıyla modelde ortam derin su olarak alınmıştır.

Kavitasyon: Su hattına yakın alanlarda şok dalgasının sebep olacağı hız artımı ve buna bağlı olarak basınç düşmesi ile oluşacak kavitasyon etkileri göz ardı edilmiştir.

Patlayıcının büyüklüğü: Bir sualtı patlamasında şok basıncının büyüklüğünü patlayıcının büyüklüğü ve mesafe ile ilişkilidir. Bu çerçevede, bir savaş gemisinin bir basınç mayını aktif hale getirdiği farz edilerek patlayıcının bir mayın olduğu kabul edilmiştir. Bu kapsamda modelde 1000 ve 500 kg'lık TNT eşdeğeri küresel patlayıcılar seçilmiştir.

Hidrostatik kabuller: Patlamanın olduğu akışkanın, ideal bir akışkan olduğu kabul edilmiş, bu kapsamda viskozite (iç sürtünme) ve ısı transferi ihmal edilmiştir.

Suüstü platformu: Savaş gemisi benzeri bir yapı model olarak seçilmiştir. Bu kapsamda 5 tip kiriş elemanı ve 3 çeşit stifner seçilerek profiller ve sac kalınlıkları aşağıda belirtildiği gibidir.

- 50x5 T profil
- 40x4 T profil (ara güvertede)
- 40x4 T profil (borda üst güvertede)
- 50x5 T profil (borda alt güvertede)
- 60x6 T profil (dipte)
- Enine elemanlar: 60x6 lama
- Boyuna elemanlar: 80x8 lama

Ayrıca kabuk olarak 5 ve 7 mm'lik saclar kullanılmıştır. Gemi benzeri tekne üzerinde 370 ton yayılı yük bulunduğu kabul edilmiştir.

Platformda kullanılan çeliğin belirlenmesi: Sualtı patlaması sonucu oluşan şok dalganın yapı üzerindeki gerilimleri değerlendirebilmek maksadıyla yapıda kullanılan çeliğin farklı gerinim oranlarında (strain rate), özellikle yüksek hızlılardaki davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Yapılan literatür araştırmasında, DH-36 yüksek mukavemetli çeliğin farklı gerinim oranlarında dinamik testlere tabi tutularak elde edilen deney sonuçlarına ulaşılmıştır [35]. Ayrıca, söz konusu deney sonuçlarının Johnson-Cook parametresi ile sağlamlasının yapıldığı görülmüştür. Bu sebeple platformda DH-36 çeliği kullanılmıştır.

Ağ boyutunun belirlenmesi: Platformdaki enine/boyuna elemanlar dikkate alınarak ağ boyutu 150 mm olarak belirlenmiştir.

4.1.3 Simülasyon elemanları

LS-DYNA yazılımını kullanan sayısal simülasyonlar, belirli bileşenlerin özelliklerini gerektirir. Mevcut simülasyonlar için kısaca açıklanan dört ana bileşen vardır.

Patlayıcı model: Sualtı patlama senaryoları, patlayıcı seçimi ile başlar. Bu çalışmada seçilen simülasyonlarda TNT tipi küresel patlayıcı kullanılmıştır. Yüksek patlayıcılar hızlı reaksiyona girdiğinden ve bir başlangıç hacminden yüksek sıcaklık ve basınçta gaz ürettiğinden, patlayıcı simülasyonlarda gram olarak alınan belirli bir başlangıç yük yoğunluğu ρ_c ve kütle W 'ye göre belirlenmiştir.

Akışkan modeli: Patlayıcı modele karar verildikten sonra akışkan bölgesi için ağ tasarımı yapılmıştır. Akışkanı modellemek için LS-DYNA'nın boş malzeme tanımı NULL-MAT kullanılmıştır. Gruneisen durum denklemi, sıkıştırılmış bir malzeme için basıncı yoğunluk, şok dalgası hız eğrisinin kesişme sabiti v.b. cinsinden tanımlayan su için kullanılmıştır [36]. Akışkan alanı için ortalama ağ boyutları,

mevcut simülasyonlar için 50 cm aralığında toplam 404271 düğüm noktası atanmıştır.

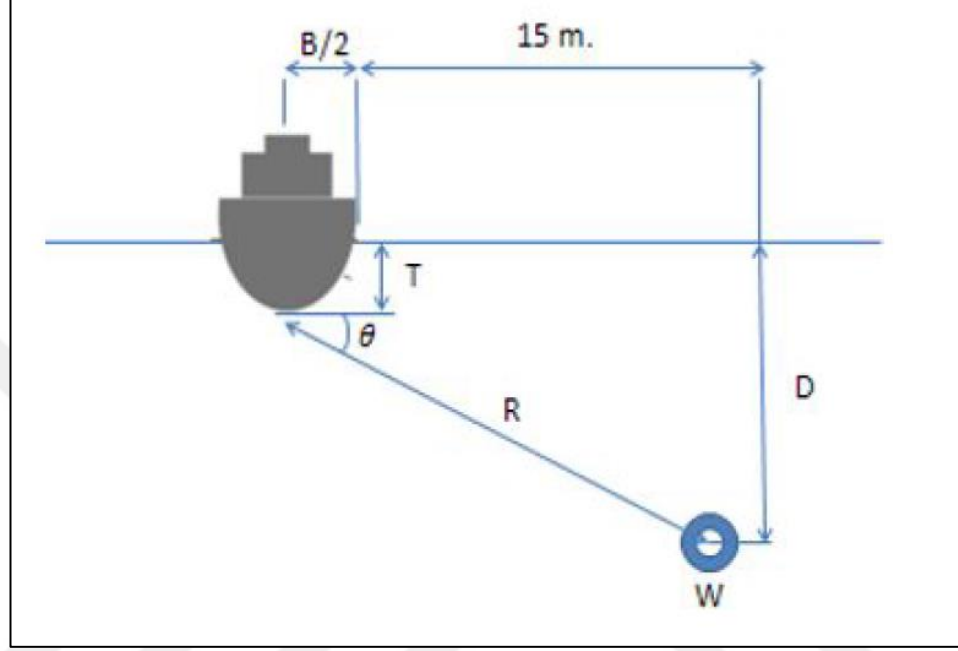
Hava modeli: Akışkan modeline benzer şekilde NULL-MAT kullanılarak hava bölgesi için ağ tasarımı yapılmıştır. Hava alanı için ortalama ağ boyutları, mevcut simülasyonlar için 50 cm aralığında toplam 156492 düğüm noktası atanmıştır.

Yapısal model: Gemi geometrisi, uygun boyuna ve enine yapısal bileşenler ve iki perde ile $L = 42$ m ve $B = 8.75$ m uzunluğunda prizmatik duba benzeri bir yapı olarak modellenmiştir. Yapının yayılı yüklerle birlikte deplasmanı 480 ton olarak belirlenmiştir. Yayılı yük olarak toplam 370 tonluk kütleler omurga hattı boyunca eşit olarak yerleştirilmiş ve ağırlık merkezinin gemi omurga hattı üzerinde olması sağlanmıştır. Kabuk kaplama, %2 C - sertleştirilmiş çelik olarak $h = 7$ mm kalınlıkta, $\rho_s = 7870 \text{ kg/m}^3$ kütle yoğunluğunda, $E = 210 \text{ GPa}$ Young modülü, $\gamma = 0.3$ Poisson oranı ve daha yüksek gerilimli çelik olarak $\sigma_y = 315 \text{ MPa}$ akma gerilimi olarak seçilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan yapısal çelik parametreleri, ticari olarak DH-36 olarak adlandırılan çeliğe karşılık gelmektedir. DH-36 çeliği üzerinde yapılan mekanik ve termo-mekanik testler sonucunda $0.001\text{-}8000 \text{ s}^{-1}$ geniş gerinim oranları ve $77\text{-}1000^\circ \text{ K}$ sıcaklıklarında %60'ı aşan gerçek gerilimler gözlemlenmiştir. DH-36 çeliğinin gözlemlenebilir veya mikro çatlaklar olmadan düşük sıcaklıklarda ve yüksek gerinim oranlarında bile iyi süneklik ve plastisiteye sahip olduğu tespit edilmiştir [35].

Böylece tasarlanan gemi benzeri prizmatik dubanın ana boyutları, $L = 42$ m, $B = 8.75$ m, $T = 5.75$ m, $\Delta = 480$ ton (yükli) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1'de platform ve patlayıcıyı ilgili yerleşim gösterilmiştir. Gemi ile patlayıcı arasındaki mesafe ve patlayıcı kütlesi platformdaki hasarın boyutu açısından en önemli parametredir. Bu bağlamda basit bir ampirik formül ile platformdaki hasara ilişkin yorum yapılabilir. Bu kapsamda **gövde şok faktörü** (Hull Shock Factor; $\text{HSF} = W^{1/2}/R$) veya şok dalgasının geliş açısını da içeren **omurga şok faktörü** (Keel Shock Factor-KSF) dikkate alınabilir [33]. Genel olarak KSF'nin bir platformun patlayıcıdan belirli bir mesafedeyken su altı patlamasının göreceli şiddeti etkilerinin nicel tahmini için basit ama güvenilir bir formül olduğu düşünülmektedir.

$$\text{KSF} = \frac{W^{1/2}}{R} \left(\frac{1 + \sin \theta}{2} \right) \quad (4.1)$$

Burada W patlayıcının kütlesi, R patlayıcı ile platform omurgası arasındaki mesafe ve θ ise deniz yüzeyine paralel yatay bir referans çizgisi ile omurgayı patlayıcıya bağlayan doğru arasındaki açıdır. Söz konusu bilgiler şekil 4.1’de gösterilmiştir. Genel olarak $KSF \geq 1$ durumunda platformda ciddi hasarların oluşması beklenmelidir.

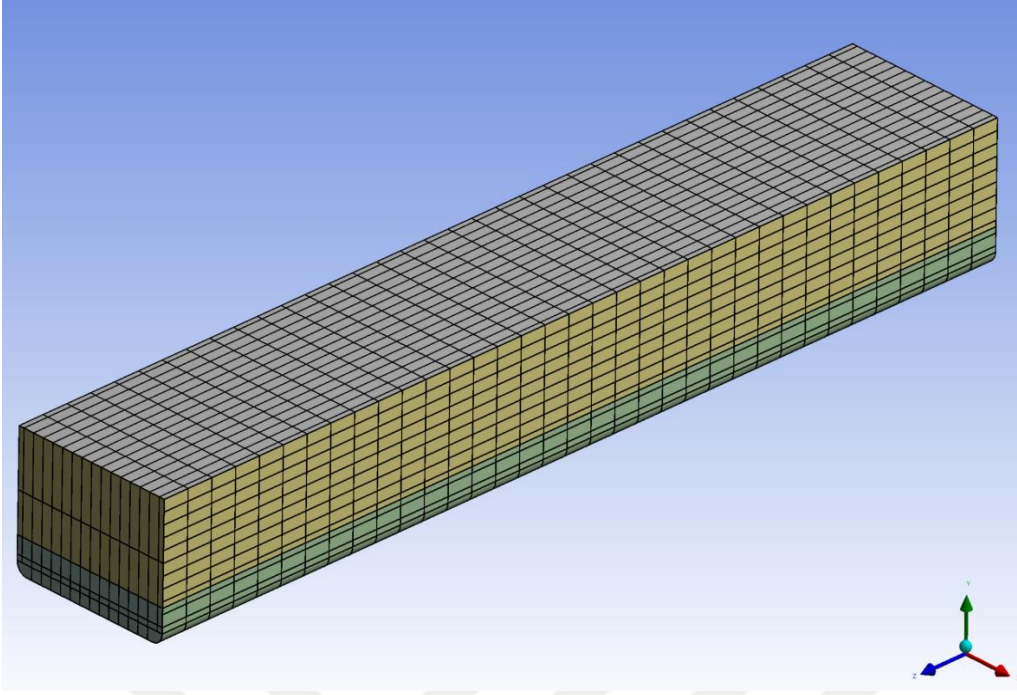


Şekil 4.1 : Platform ve patlayıcının yerleşimi.

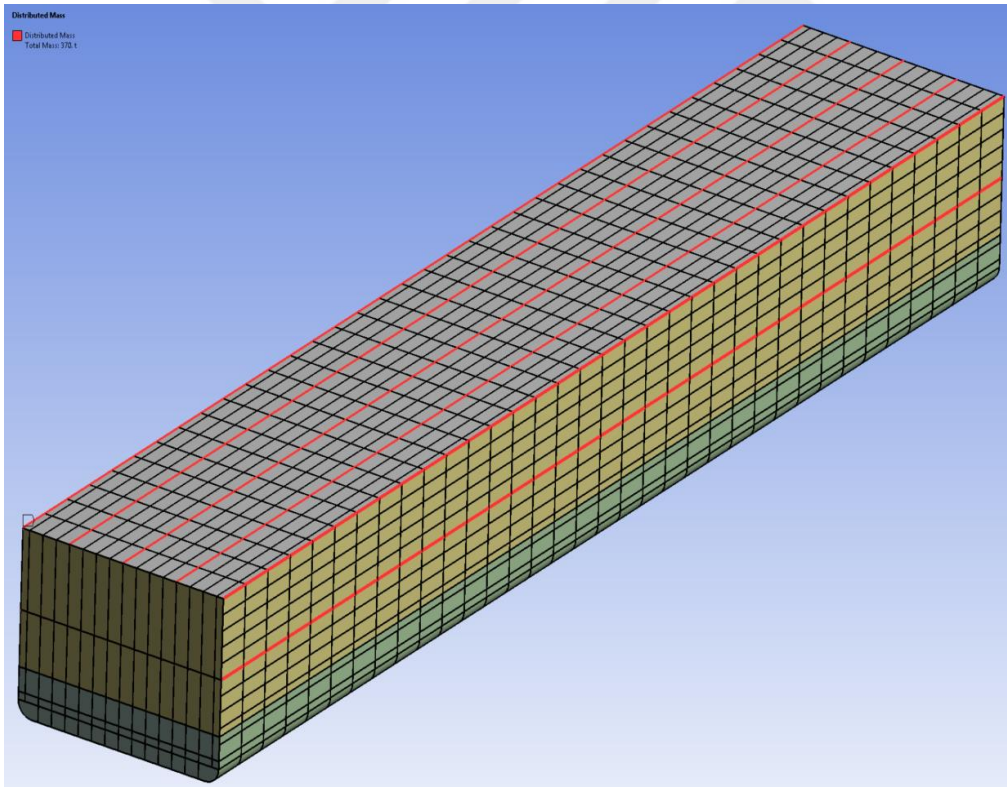
Çizelge 4.1’de listelenen parametre seti ile üç farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Üç simülasyonda R değeri sabit tutulmuş, ancak W ve θ (dolayısıyla D) değerleri değiştirilmiştir.

Çizelge 4.1 : Simülasyonlara ait değişkenler.

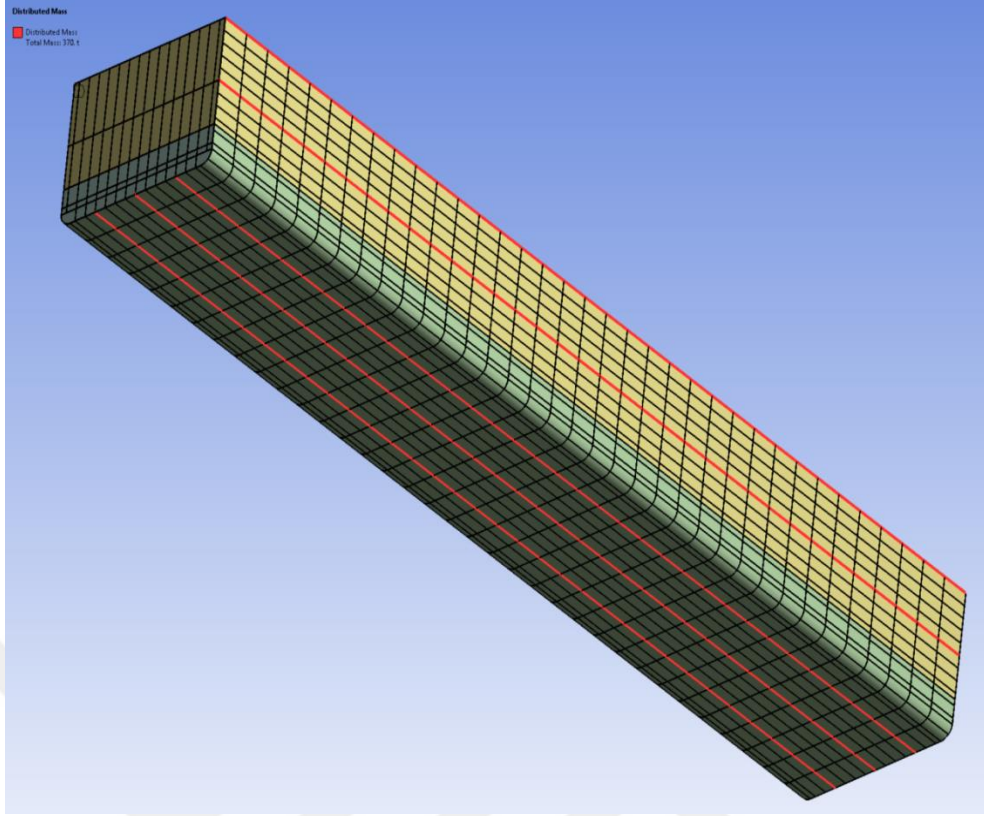
Simülasyon Numarası	Patlayıcının Ağırlığı W (kg)	Mesafe R (m)	Derinlik D (m)	Sin θ	KSF
1	500	23,1	16,5	0,465	0,71
2	1000	23,1	16,5	0,465	1,00
3	1000	23,1	23,1	1,000	1,37



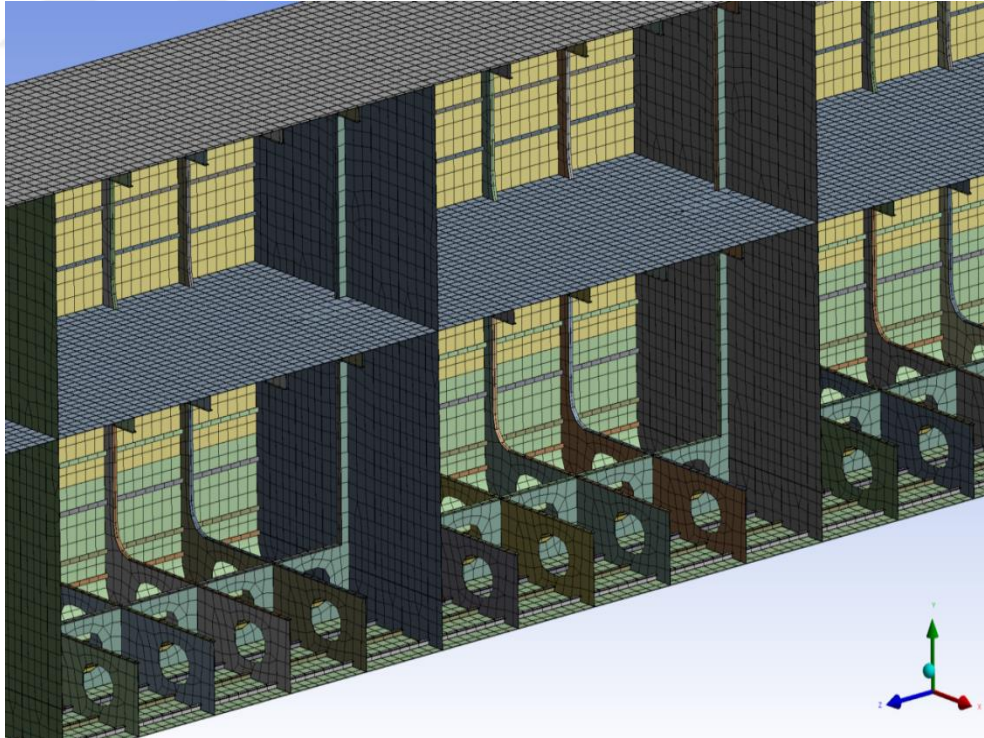
Şekil 4.2 : Geometrik olarak basitleştirilmiş prizmatik duba şeklinde gemi modeli.



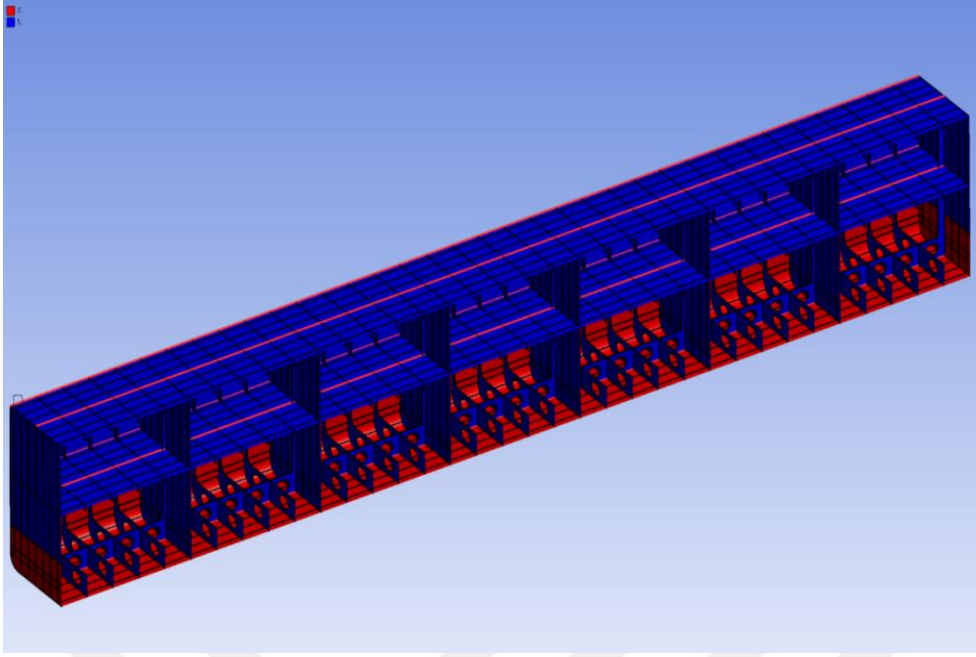
Şekil 4.3 : Geometrik olarak basitleştirilmiş gemi modelinde yayılı yüklerin dağılımı (üstten görünüş).



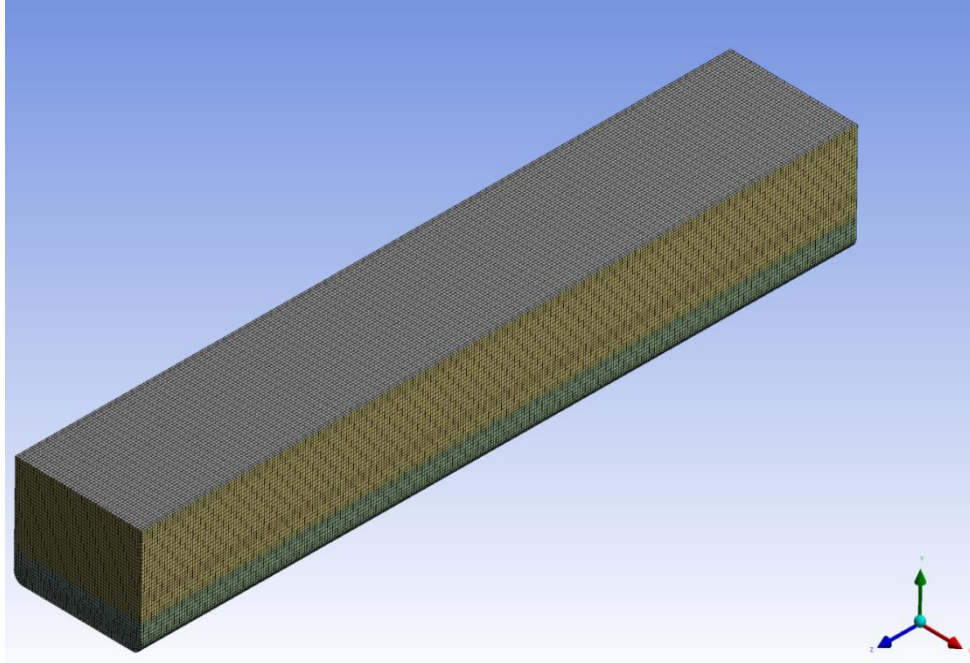
Şekil 4.4 : Geometrik olarak basitleştirilmiş gemi modelinde yayılı yüklerin dağılımı (alttan görünüş).



Şekil 4.5 : Basitleştirilmiş gemi modelinde iç yapı elemanları.

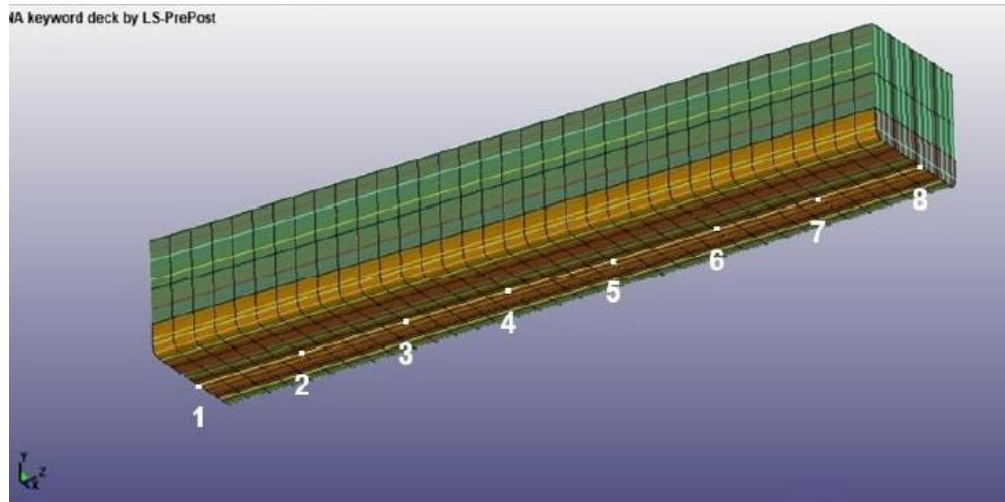


Şekil 4.6 : Basitleştirilmiş gemi modelinde kabuk elemanları.



Şekil 4.7 : Simülasyonlarda uygulanan ağ düzeni.

Platform gövdesindeki belirlenen mevkileri gözlemlemek için modelin karinasında sekiz özel düğüm noktası seçilmiştir. Bahse konu düğüm noktaları 8042545, 8042704, 8043382, 8043589, 8044020, 8044076, 8044218 ve 8044290 numaralı düğümlerdir. Şekil 4.8’de gösterildiği gibi düğüm noktaları 1-8 arası sayılarla işaretlenmiştir.



4.2 Platformun Doğal Frekansı

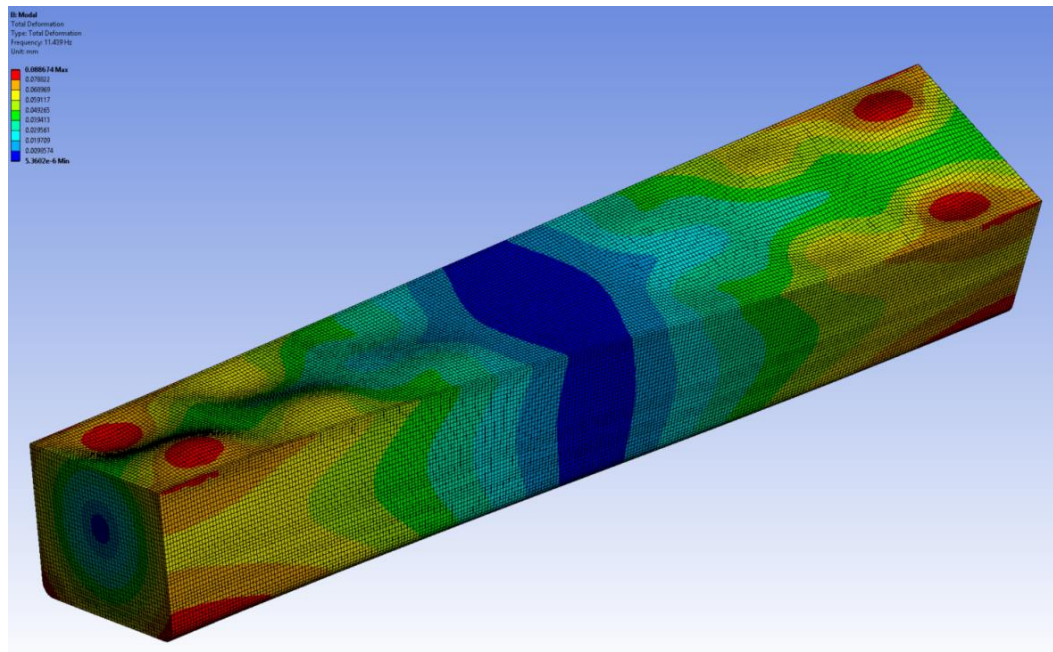
Platform üzerine etkiyecek şok basıncın etkisi ile ortaya çıkacak gerilmelerin analizi kapsamında simülasyon süresinin belirlenmesi maksadıyla ANSYS programı yardımıyla

Platform Burulma Modu Frekansı = 11.4 hertz

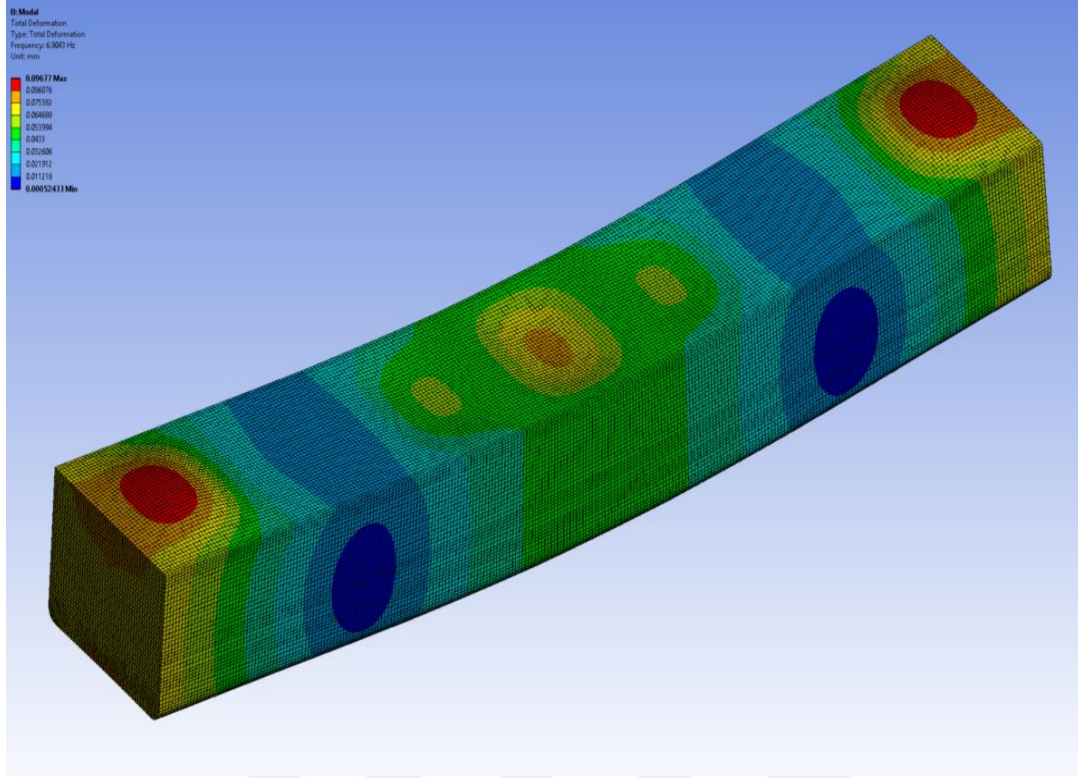
Platform Yanal Eğilme Modu Frekansı = 9.3 hertz

Platform Düşey Eğilme Modu Frekansı = 6.9 hertz

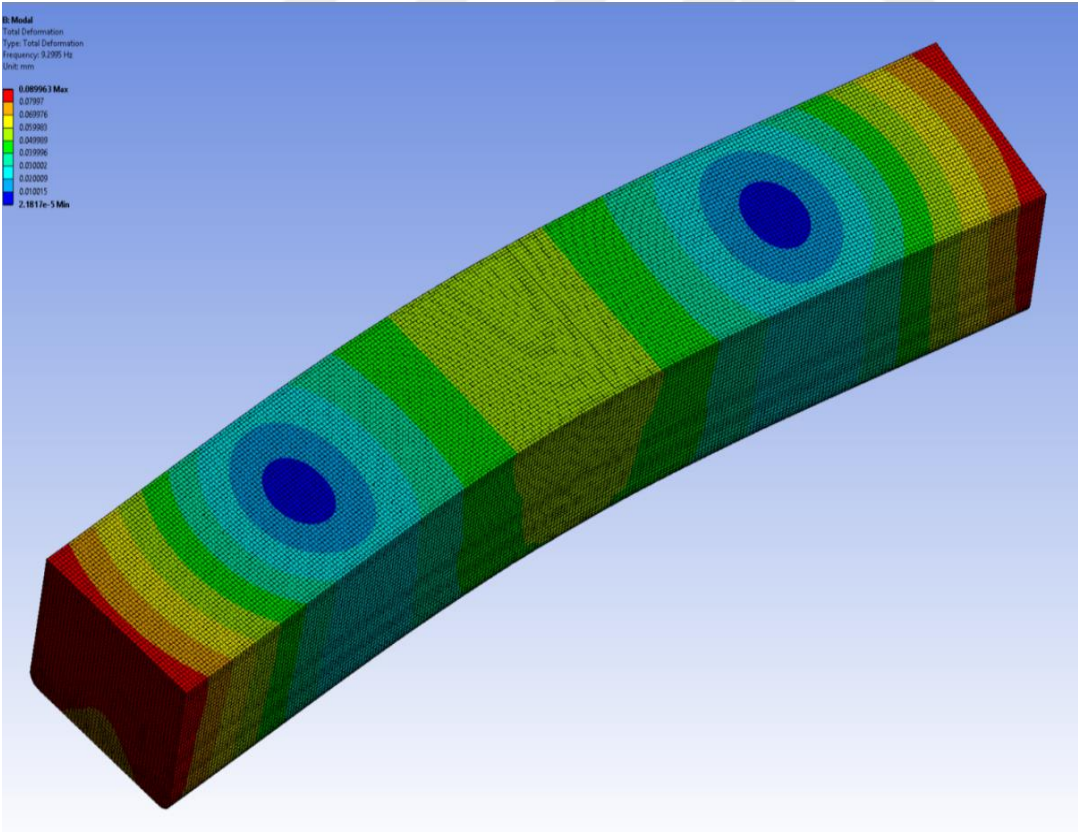
olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 : Prizmatik dubanın burulma modu.



Şekil 4.10 : Prizmatik dubanın düşey eğilme modu.



Şekil 4.11 : Prizmatik dubanın yanal eğilme modu.

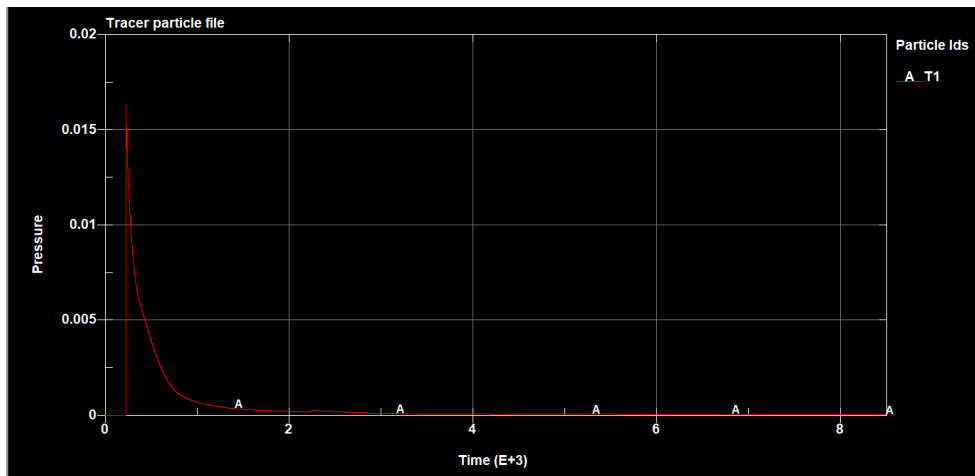
4.3 Simülasyon Süresi ve Adımları

Platformun doğal frekansı ve ilk şok dalgasına vereceği tepki dikkate alınarak ölçüm yapılması planlanmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde 0-15 mili saniye arasında simülasyonun tamamlanması beklenmektedir.

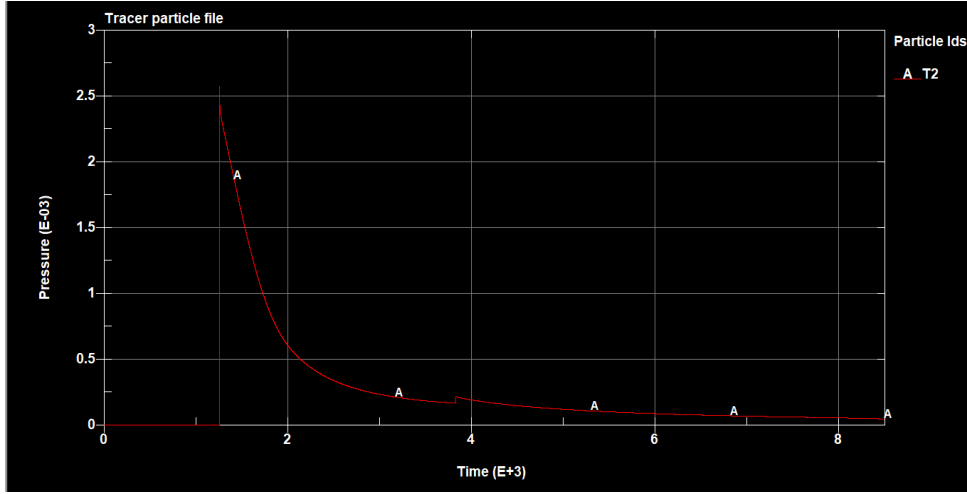
Simülasyon adımları: Şok dalgasının platforma etkisinin modellenmesinde öncelikle 1 boyutlu şok dalgasının ilerlemesi hesaplanmış, müteakiben olası kayıpların en aza indirilmesi maksadıyla 1 boyutlu şok dalgası kullanılarak 2 boyutlu şok dalgası üretilmiş ve basınç değerleri hesaplanmıştır. Su içinde rastgele seçilen ve konumlandırılan 5 adet sensörden elde edilen basınç değerleri aşağıda belirtilmiştir.

Çizelge 4.2 : 5 adet sensörden elde edilen basınç değerleri.

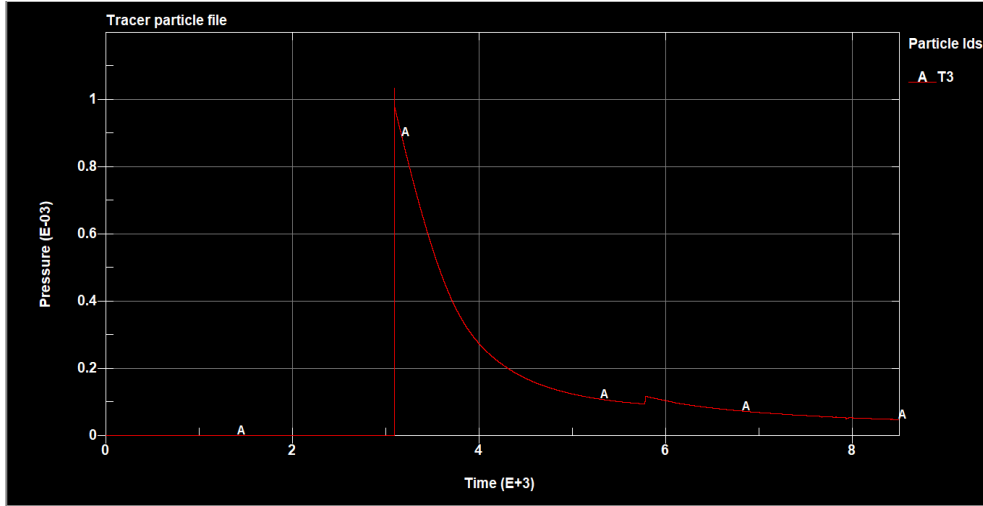
Sensör No	Süre	Ölçülen Basınç
1	0,02 ms	16,60 KBar
2	1,2 ms	2,58 KBar
3	3,2 ms	1,04 KBar
4	5,7 ms	0,53 KBar
5	6,9 ms	0,43 Kbar



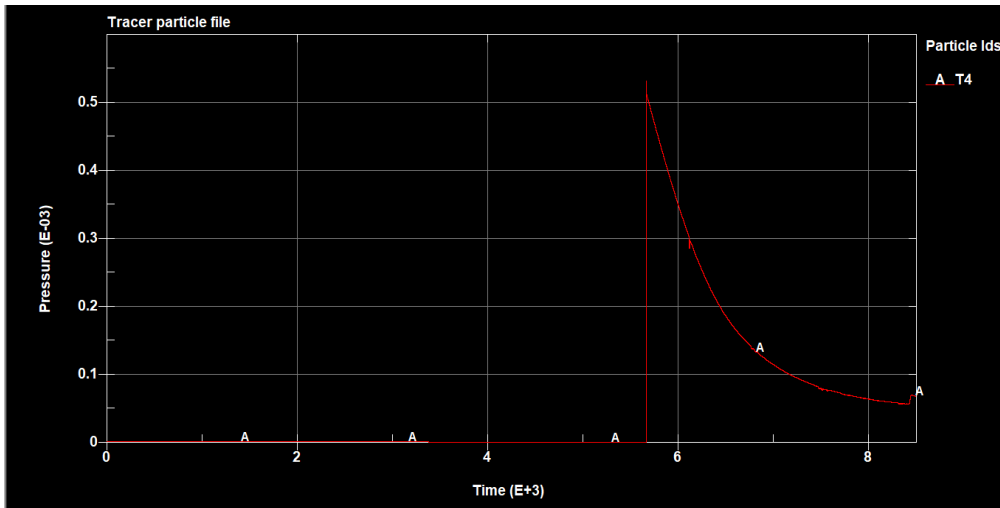
Şekil 4.12 : Sensör no. 1'deki basınç değişimi.



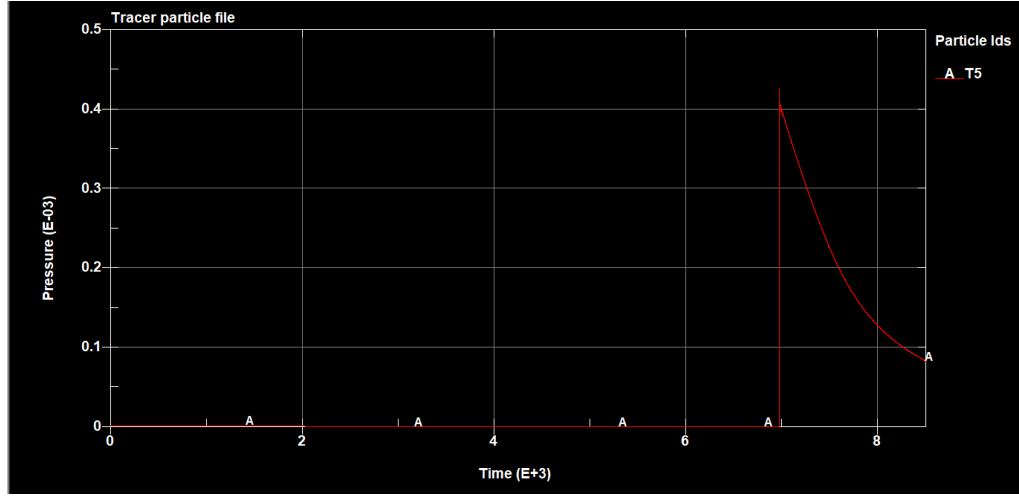
Şekil 4.13 : Sensör no.2'deki basınç değişimi.



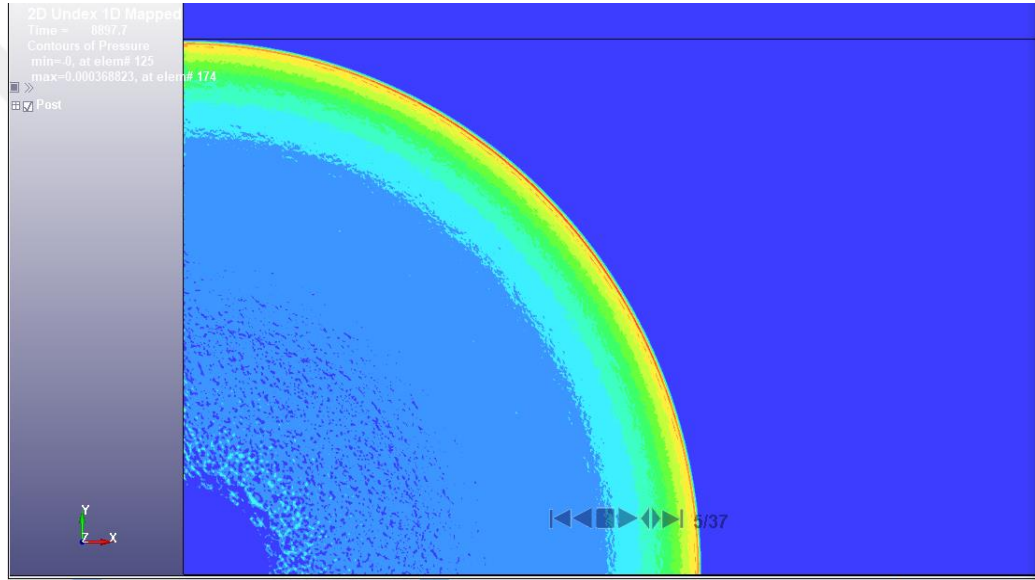
Şekil 4.14 : Sensör no. 3'teki basınç değişimi.



Şekil 4.15 : Sensör no.4'teki basınç değişimi.



Şekil 4.16 : Sensör no. 5'teki basınç değişimi.



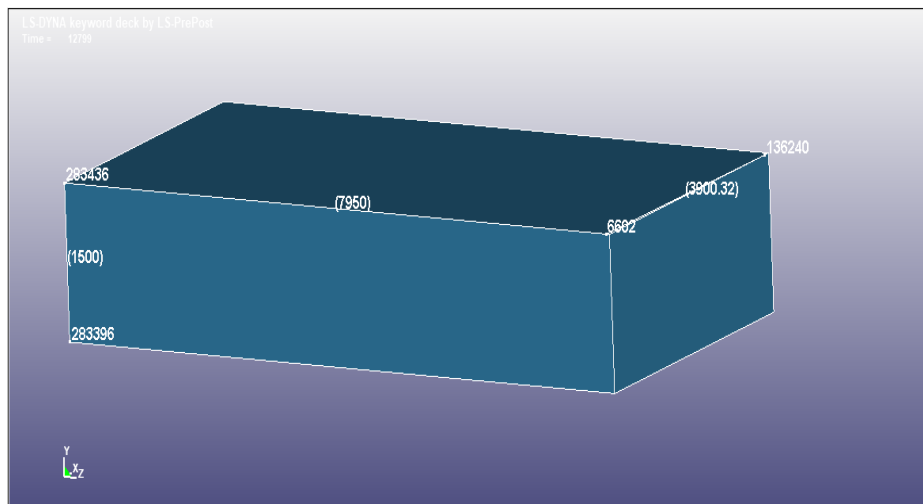
Şekil 4.17 : İki boyutlu şok dalgasının yayılımı.



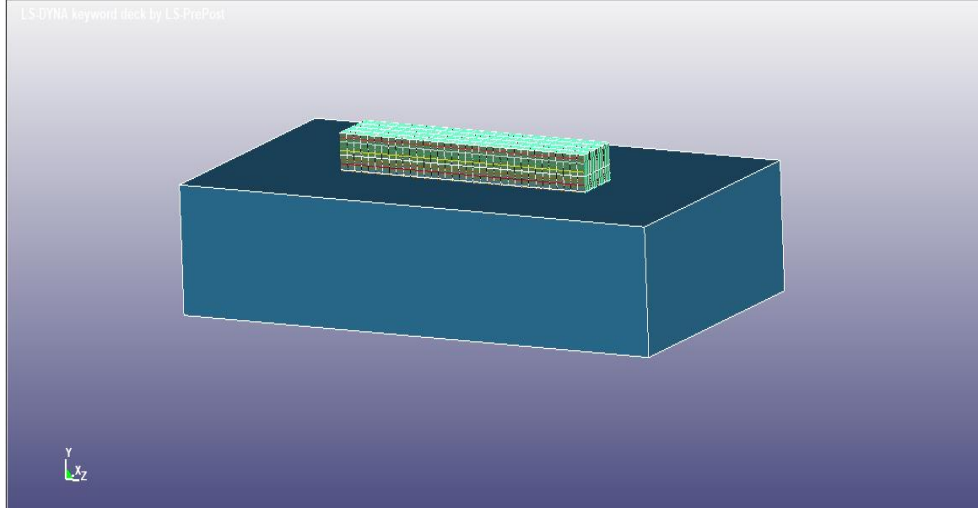
5. SUALTI PATLAMASI İLE ORTAYA ÇIKAN ŞOK DALGASININ CİVARDAKİ SUÜSTÜ PLATFORMUNA ETKİLERİNİN SİMÜLASYONU

Tüm simülasyonlar, 195 MHz işlemci, 1344 Gigabayt RAM ve 23 Gigabayt sabit disk depolama kapasitesine sahip çok çekirdekli bir SGI Octane bilgisayarı ile analiz edilmiştir. Simülasyonların analizinde LS DYNA sürüm 960 (alfa) revizyon 1.174 yazılımı kullanılmıştır.

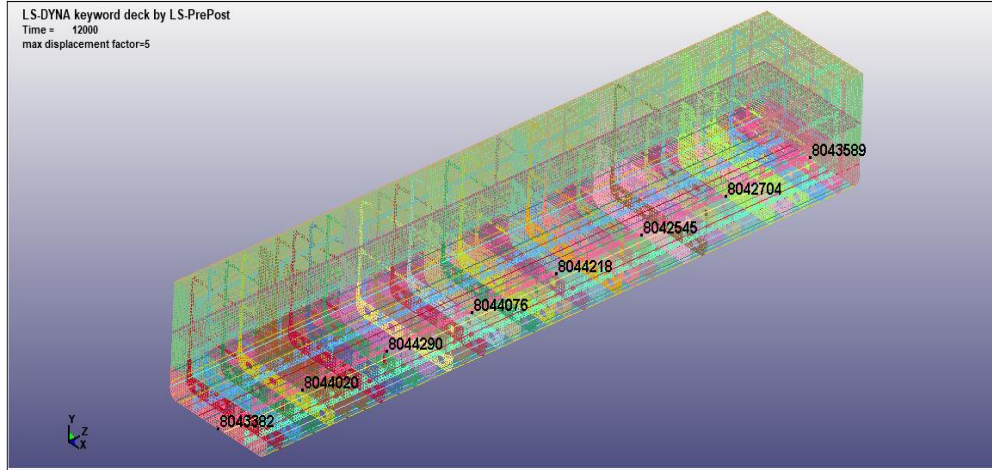
Belirtilen patlayıcı miktarı nispeten büyük olduğundan, 0.67'lik zaman adımı (time step) seçilerek sonlu eleman modeli 30 ms süre ile çalıştırılmıştır. Her 200 μ s için ikili veri dosyası, modelin sonlu eleman yanıt bilgileri olarak kaydedilmiştir. Böylece, 10^4 μ s zaman aralığındaki tek bir simülasyon çalışması, birbirini takip eden 50 hesaplama durumu üretmiştir. Üç boyutlu yanıt görselleştirmesi, LS-DYNA'nın LSPOST'u ile gerçekleştirilmiştir. LS-POST, yer değiştirme, hız, ivme ve basınç verilerinin görüntülenmesini sağlamanın yanı sıra, kullanıcının sıvı ortam boyunca şok dalgası yayılımını gözlemlemesine olanak tanır. LS-POST ayrıca ASCII çözüm verilerini çıkarma ve daha sonra değerlendirilmek üzere ayrı bir ASCII dosyasına yazma yeteneğine de sahiptir.



Şekil 5.1 : Modellenen su ortamının ölçüleri.



Şekil 5.2 : Modellenen su ortamı ve prizmatik duba.



Şekil 5.3 : Prizmatik dubada izlenen düğüm noktaları.

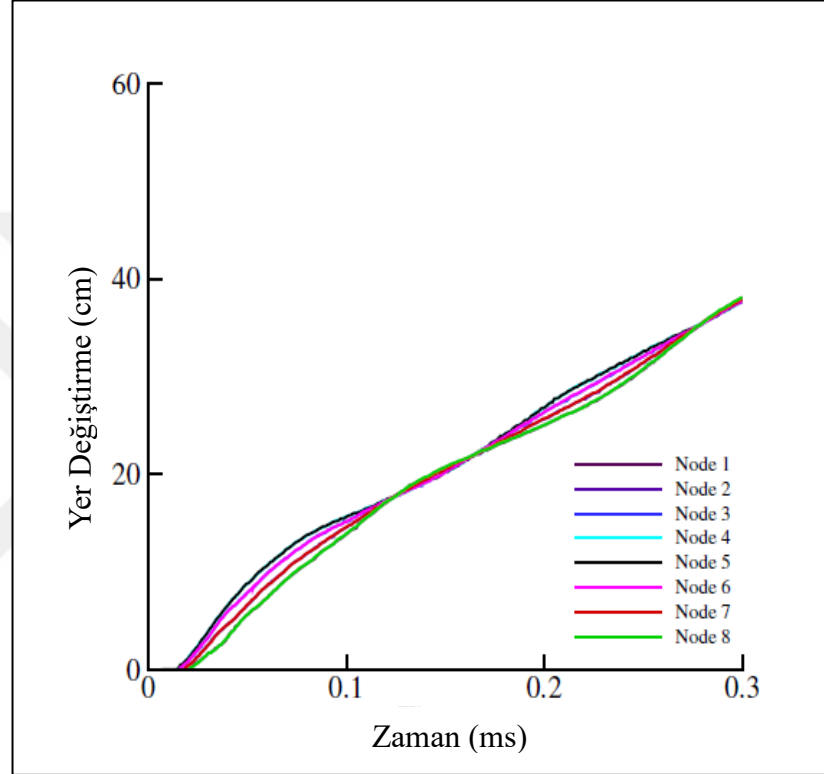
5.1 Simülasyon-I

İlk simülasyon, $W = 500$ kg TNT eşdeğeri patlayıcı ve $R = 23.1$ m mesafe için gerçekleştirilmiştir. $\theta = 27,7^\circ$ için $\sin \theta = 0.465$ ve $KSF = 0.71$ değerlerini almaktadır. Şekil 5.4'te izlenen tüm düğüm noktaları için yer değiştirme değerleri gösterilmiştir. Ayırt edilmesi zor olsa da 5 (8044218) ve 3 (8044290) numaralı düğüm noktalarında en büyük yer değiştirmelerin olduğu tespit edilmiştir. Tüm düğümler (1-8) için hız değişimleri Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Yer değiştirmelerin zaman geçmişlerinden farklı olarak hızlar tüm düğümler için ortalama bir değer civarında toplanmıştır. Bu muhtemelen şok dalgasının farklı düğümler üzerinde yayılmasıyla uyumludur. Öte yandan deformasyonların büyük ve plastik bölgede olması sebebiyle yapının eski konumuna dönemeyecektir. Tüm düğümler için Şekil 5.6'daki grafikte görülebileceği gibi ivmeler hız değişimlerinden çok daha önce sönümlenmiştir. Bu durum, çarpan şok dalgasının geçici karakteri ile uyumludur.

Başlangıçta, tüm düğümler, şokun patlama benzeri tarzında büyük ölçüde hızlandırılır ancak bu hızlanmalara bağlı ivmeler bir saniyenin çok küçük kesirleri içinde sönümlenir.

5.1.1 Yer değiştirmeler

Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzleminde meydana gelen yer değiştirmeler aşağıdaki şekilde sunulmuştur.

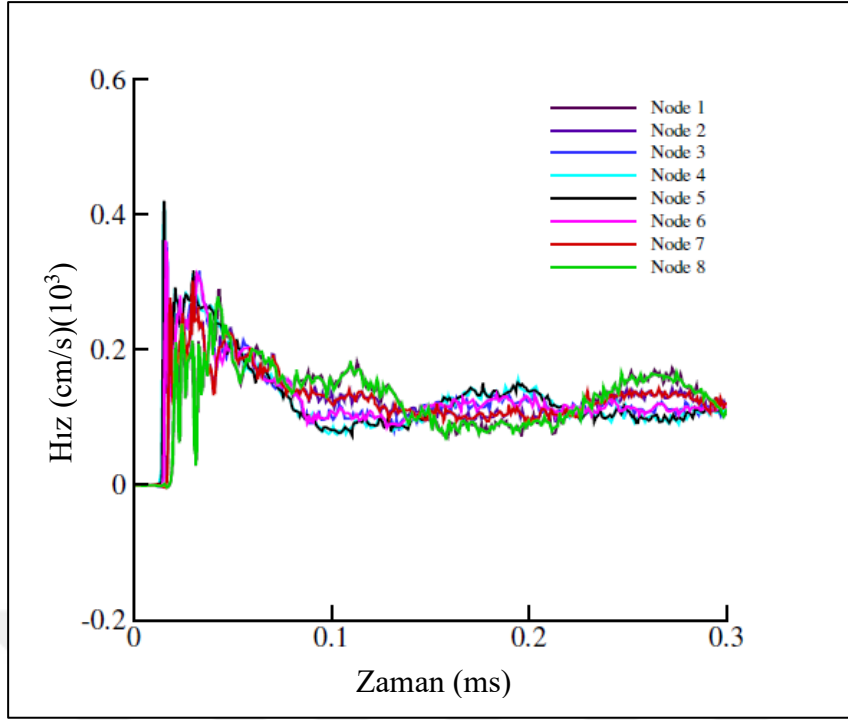


Şekil 5.4 : Simülasyon I için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen yer değiştirmeleri.

5.1.2 Hızlar

Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzleminde meydana gelen hızlar aşağıdaki şekilde sunulmuştur.

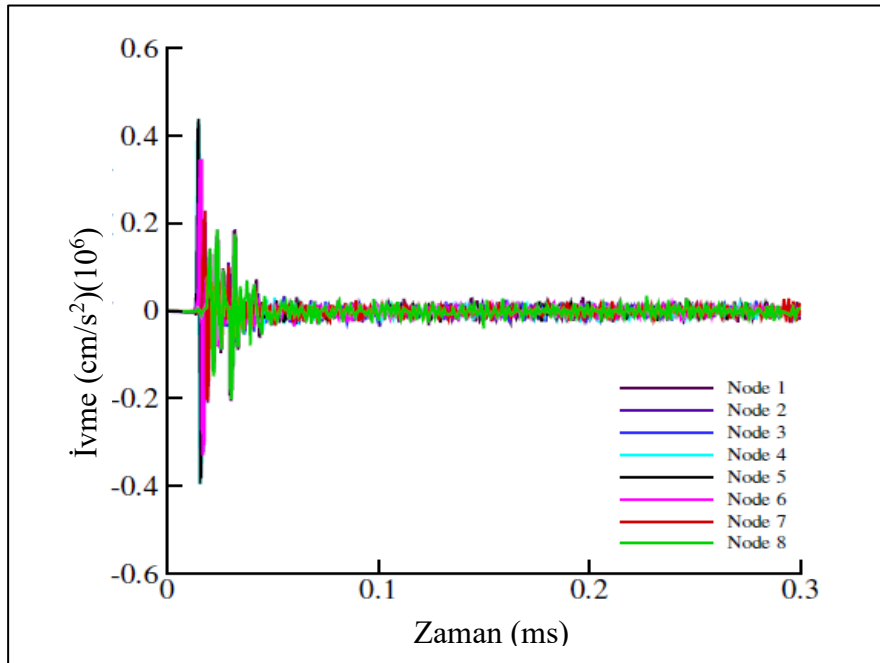
Simülasyon 1’de sekiz düğüm noktasının tamamı için ortalaması alınan maksimum yer değiştirme değerinin yaklaşık 37.8 cm. olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca herbir düğüm noktasındaki düşey hız değerlerinin birbirlerine yakın olduğu müşahade edilmiştir.



Şekil 5.5 : Simülasyon I için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen hız değişimleri.

5.1.3 İvmeler

Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzlemindeki ivmeler aşağıda sunulmuştur.



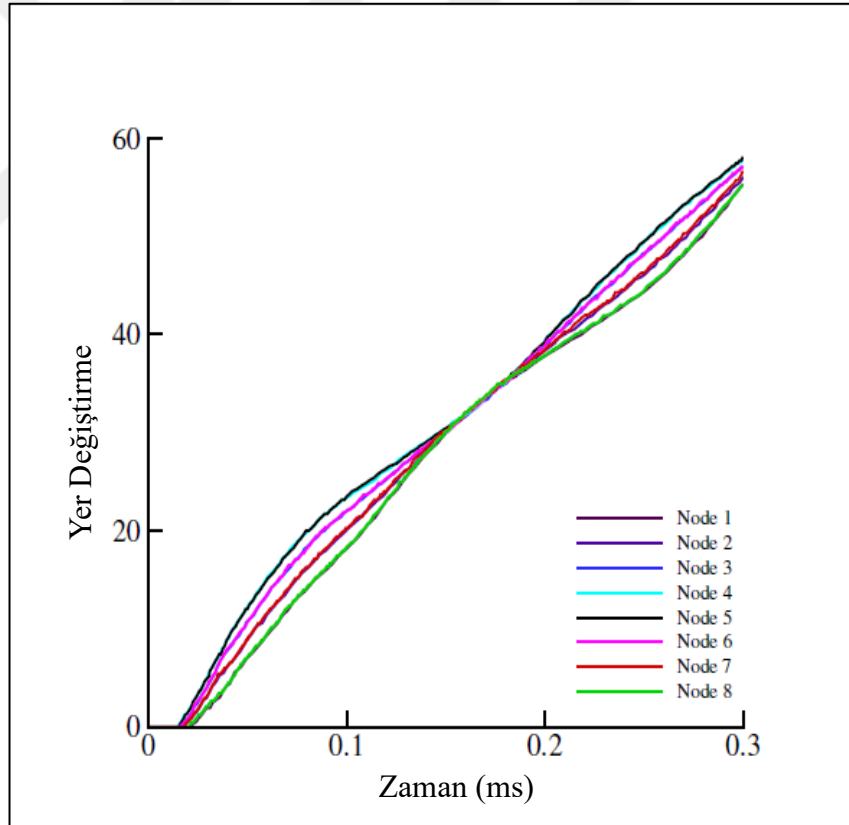
Şekil 5.6 : Simülasyon I için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen ivme değişimleri.

5.2 Simülasyon-II

İkinci simülasyonda, $W = 1000$ kg TNT eşdeğeri patlayıcı ve $R = 23.1$ m olarak seçilmiştir. $\theta = 27.7^\circ$ için $\sin \theta = 0.465$ ve $KSF = 1.00$ değerlerini almaktadır. Şekil 5.7’de seçilen tüm düğüm noktaları için yer değiştirme değerleri gösterilmiştir. Hesaplanan maksimum kalıcı yer değiştirme yaklaşık olarak 56.6 cm'dir ve bu değer benzer koşullar altında yapılan fiziksel bir testte fiilen ölçülen maksimum yer değiştirme ile makul ölçüde uyumludur. Bu denemelerin ayrıntıları ve ölçülen değerleri, gizlilik mülahazaları sebebiyle saklı tutulmaktadır. Müteakiben, hız ve ivme değişimleri sırasıyla şekil 5.8 ve şekil 5.9’da gösterilmiştir.

5.2.1. Yer değiştirmeler

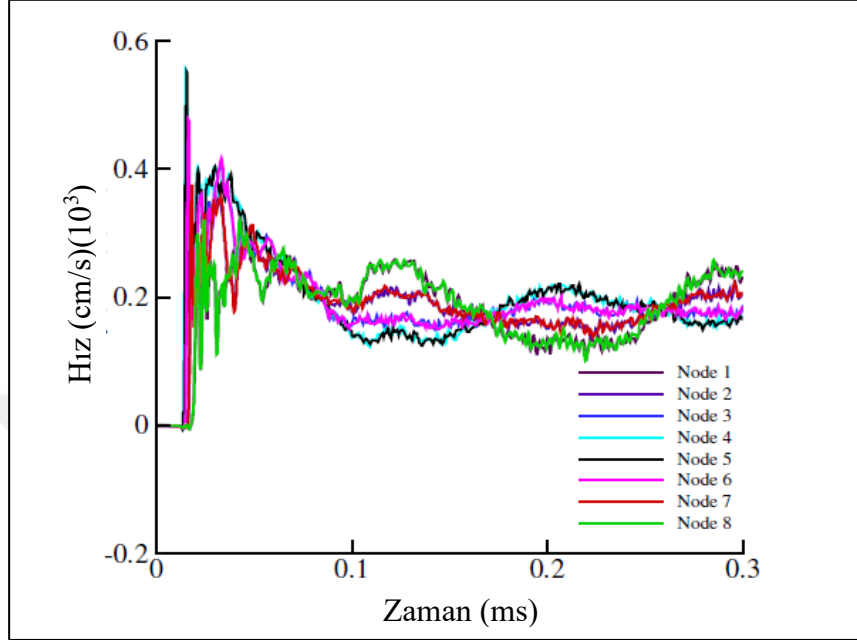
Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzleminde meydana gelen yer değiştirmeler aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



Şekil 5.7 : Simülasyon II için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen yer değiştirmeleri.

5.2.2. Hızlar

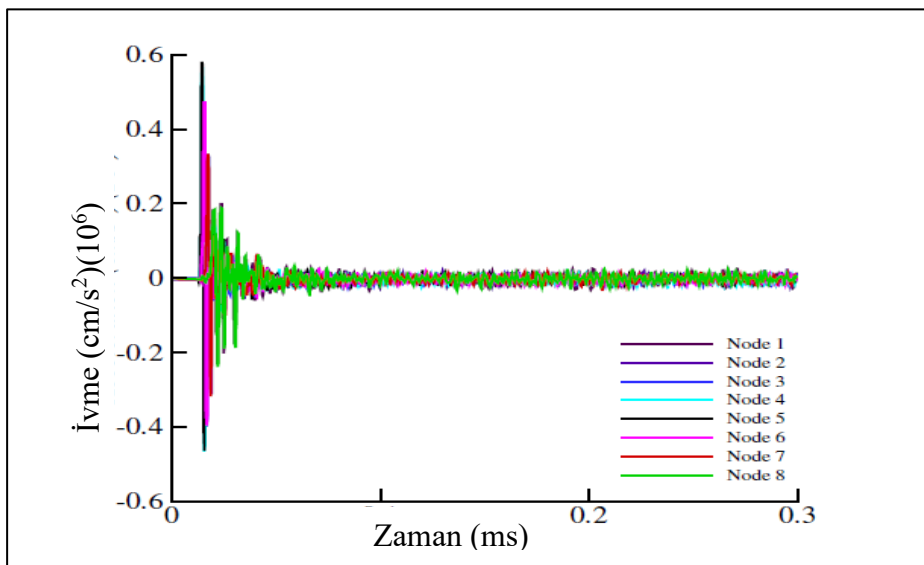
Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzleminde meydana gelen hızlar aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 5.8 : Simülasyon II için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen hız değişimleri.

5.2.3. İvmeler

Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzlemindeki ivmeler aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



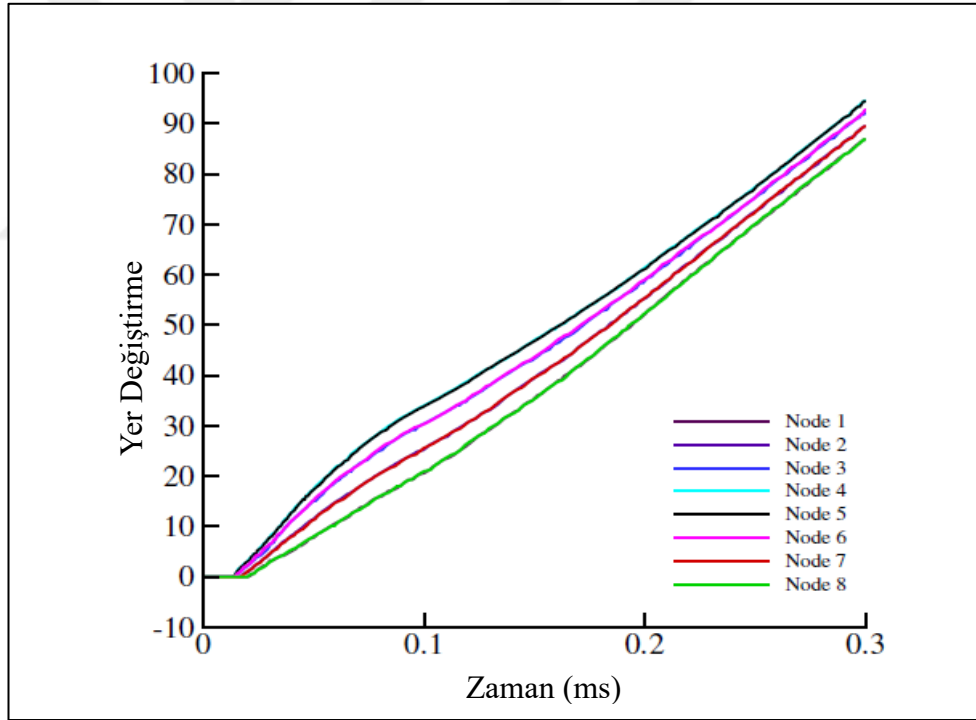
Şekil 5.9 : Simülasyon II için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen ivme değişimleri.

5.3. Simülasyon-III

Üçüncü simülasyonda, $W = 1000$ kg TNT eşdeğeri patlayıcı ve $R = 23.1$ m olarak seçilmiştir. $\theta = 90.0^0$ için $\sin \theta = 1.0$ ve $KSF = 1.37$ değerlerini almaktadır. Patlayıcı platformun tam altında konumlandırılmış olup $KSF = HSF$ 'ye karşılık gelmektedir. Tüm koşullar θ 'nın farklılığı hariç Simülasyon II'ye eşittir. Simülasyon III'teki amaç patlayıcının platform ile olan açısının değiştirilmesinin, platformdaki hasarın büyüklüğüne olan etkisinin gözlemlenmesidir. Seçilen tüm düğüm noktaları için Şekil 5.10'da yer değiştirme değerleri, Şekil 5.11'de hızlar ve Şekil 5.12'de ivmeler gösterilmektedir.

5.3.1. Yer değiştirmeler

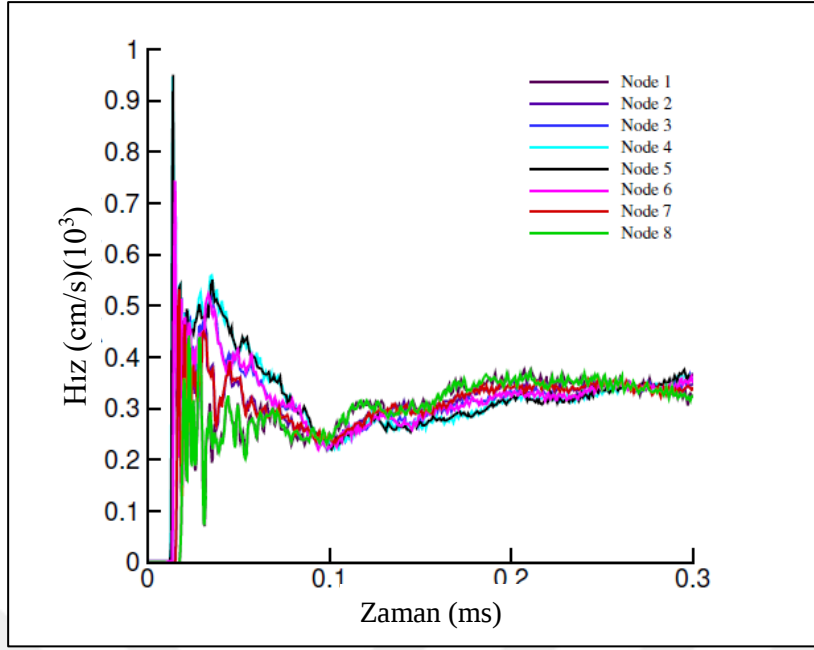
Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzleminde meydana gelen yer değişimleri aşağıdaki şekilde sunulmaktadır.



Şekil 5.10 : Simülasyon III için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen yer değiştirmeleri.

5.3.2. Hızlar

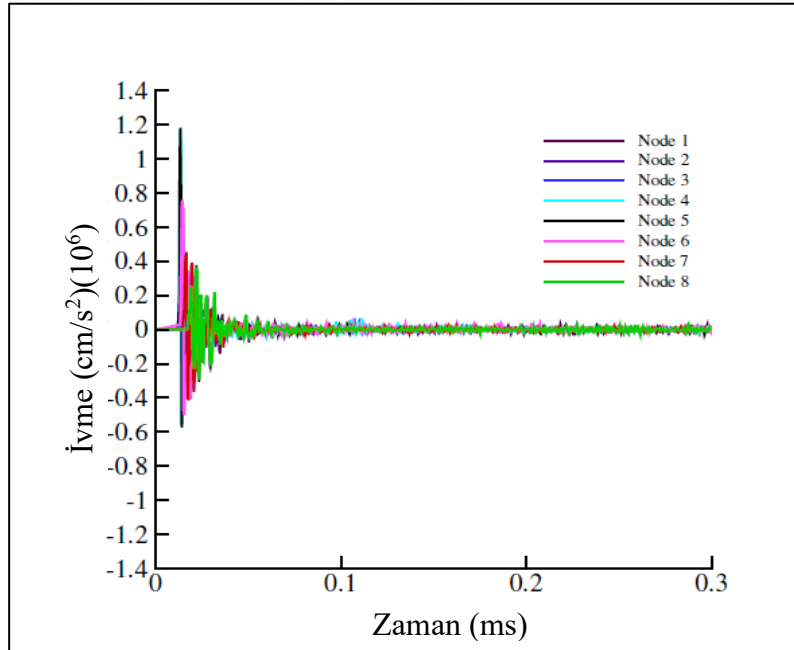
Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzleminde meydana gelen hızlar aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 5.11 : Simülasyon III için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen hız değişimleri.

5.3.3. İvmeler

Belirlenen 8 adet düğüm noktasında y-düzlemindeki ivmeler aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



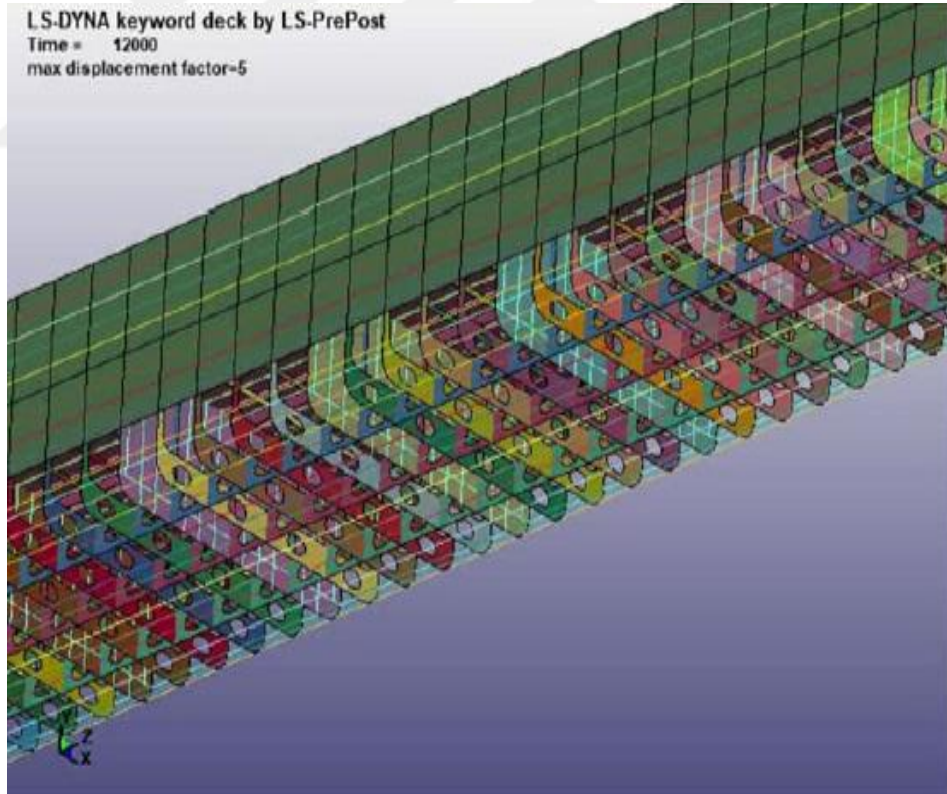
Şekil 5.12 : Simülasyon III için izlenen düğüm noktalarında düşey eksen ivme değişimleri.

Sualtı patlaması ile meydana gelecek olan şok dalgasının civarda bulunan suüstü platformlarına etkisinin incelenmesi maksadıyla ANSYS LS-Dyna programı

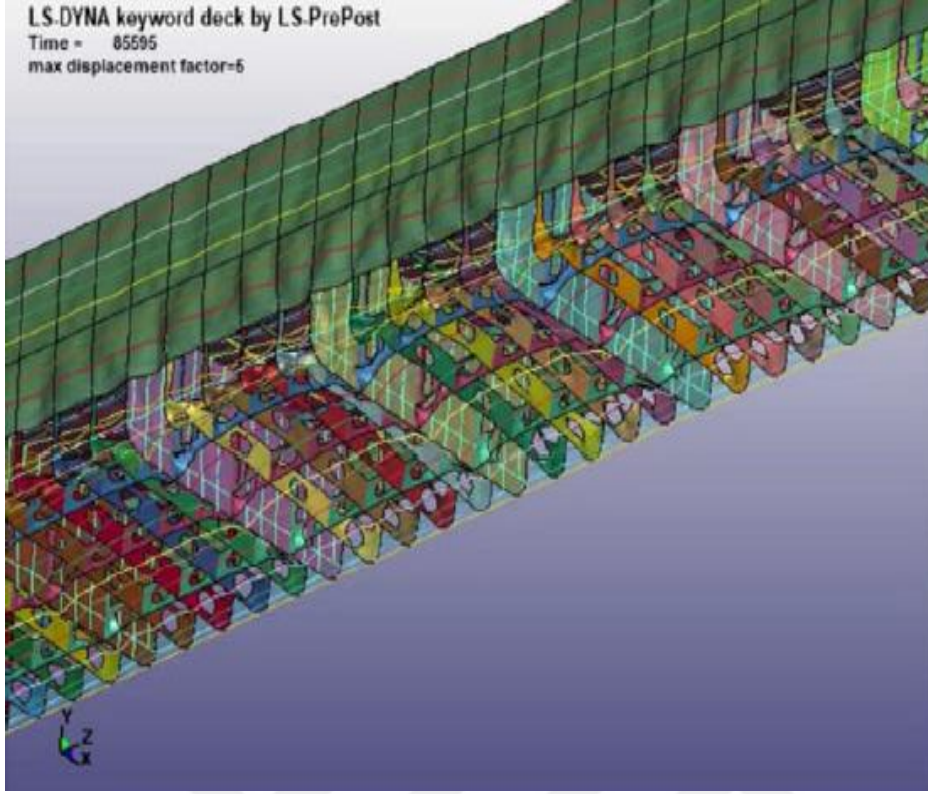
kullanılarak bir patlama modeli hazırlanmıştır. Bahse konu model aynı program kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Gemi mukavemet elemanları üzerine tesis edilen 8 adet düğüm noktası üzerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde şok dalgasının gemi bünyesinde bir kırılmaya neden olmadığı ancak özellikle 8044076 (4) ve 8044218 (5) numaralı düğümlerin olduğu bölgede hız, ivme, yer değiştirme ve gerilmelerin en üst seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Anılan şok dalgasına ait kick-off velocity'nin yaklaşık 5.6 m/s olduğu dikkate alındığında, gemi bünyesinde ciddi hasarların meydana gelebileceği ve geminin kuvvetle muhtemel hareketten sakıt durumda kalacağı anlaşılmaktadır.

Simülasyon 1, 2 ve 3'te sekiz düğüm noktasının tamamı için ortalaması alınan maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla yaklaşık 37.8 cm, 56.6 cm ve 90.8 cm olarak tespit edilmiştir. Deformasyonun en fazla olduğu Simülasyon 3 için platform yapı elemanlarının durumu patlama öncesi Şekil 5.13'te, patlama sonrası için ise Şekil 5.14'te gösterilmektedir.



Şekil 5.13 : Simülasyon III, patlama öncesi yapı elemanları.



Şekil 5.14 : Simülasyon III, patlama sonrası yapı elemanları.

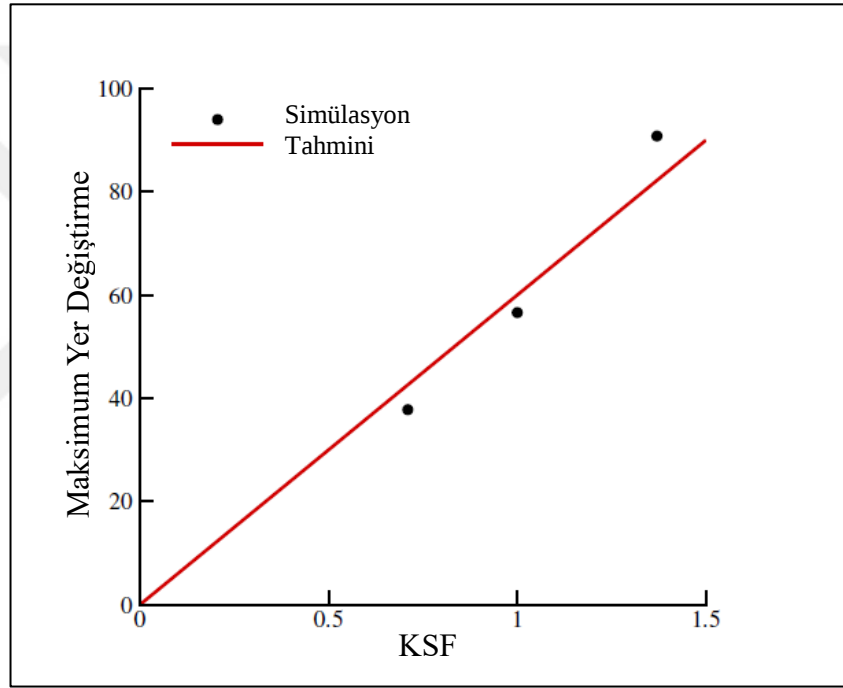
Çizelge 5.1 : KSF değerleri ve buna karşılık gelen maksimum kalıcı deformasyonlar, hızlar ve ivmeler.

Simülasyon Numarası	KSF	Max. Def. δ (cm)	Max. Hız $10^3 v$ (cm/s)	Max. İvme $10^6 a$ (cm/s ²)
1	0,71	37,8	0,42	0,44
2	1,00	56,6	0,57	0,59
3	1,37	90,8	0,94	1,15

Çizelge 5.1'de KSF değerleri, potansiyel hasar seviyesinin bir ölçütü olarak KSF'nin güvenilirliğini değerlendirmek için simülasyonlardan elde edilen maksimum yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. En küçük kareler yaklaşımı kullanılarak bu yapı için KSF değerleri ile hesaplanan maksimum yer değiştirmeler arasında doğrusal bir ilişki şu şekilde kurulabilir:

$$\delta = \frac{3}{5} \frac{W^{1/2}}{R} \left(\frac{1 + \sin \theta}{2} \right) \quad (5.1)$$

Her üç simülasyon sonucu için bulunan maksimum yer değiştirmeler ve denklem (5.1) kullanılarak KSF değerine bağlı tahmin edilen yer değiştirme doğrusu Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Çalışma kapsamında tasarlanan prizmatik yapısal form dikkate alındığında (5.1) denklemin oldukça iyi sonuç verdiği görülmektedir. Formülde belirtilen 3/5 katsayısı yapıda kullanılan çeliğin kalınlığına ve malzemenin akma gerilme değerlerine bağlı olarak farklılıklar göstermesi gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 5.15 : Maksimum yer değiştirme ile KSF arasındaki ilişki.

Çalışmanın ikinci aşamasında, bir gemi kirişini temsil eden prizmatik bir duba şeklindeki yapı üzerindeki 3 boyutlu bir sualtı patlamasının etkileri ALE yaklaşımı ile LS-DYNA yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar yoluyla araştırılmıştır. KSF'deki değişimlerin etkilerini araştırmak için üç farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. $KSF \approx 1$ için tasarlanan ikinci simülasyon, genel kullanıma açık olmasa da saha ölçümlerinin mevcut olduğu bir durumu temsil etmektedir. Hesaplanan maksimum kalıcı yer değiştirmelerin ölçülenlere yakınlığı, sayısal simülasyonların güvenilirliğinin bir göstergesidir. Ayrıca, sınırlı simülasyon verilerinin kullanılmasıyla, burada ele alınan belirli yapı için maksimum yer

değiştirmeler ve karşılık gelen KSF değerleri arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Kalıcı deformasyonlar için iyi bir ilk tahmin sağlayan bu basit ilişki, farklı yapısal özelliklere sahip gemi benzeri formlar için daha geliştirilebilecek genel formüllerin öncüsü olarak görülebilir. Bu yönde çalışmalar sürmektedir. Son olarak, hesaplanan başlangıç hızları (kick of velocity) göz önüne alındığında suüstü gemi benzeri yapılarda, $KSF \approx 1$ olduğunda ciddi hasarlar, $KSF \geq 1$ olduğunda ise ölümcül hasarların ortaya çıkması beklenebilir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Tez çalışması iki ayrı aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada bir sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok dalgası basıncının büyüklüğünün, temelde patlayıcının ağırlığı ve ölçümün yapıldığı mesafeye bağlı olduğunu öne süren ve literatürde kabul edilen denklem irdelenmiştir. Müteakiben, açık denizde kontrollü bir sualtı patlaması gerçekleştirilerek sekiz ayrı sensör tarafından patlama basıncı kayıtları alınmıştır. Denemede kullanılan sekiz sensörün tümünün sadece 1.8 milisaniye gibi çok kısa bir zamanda şok dalgasına maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Ölçümlerde elde edilen tepe ya da maksimum basınç değerleri için literatürde yaygın kabul görmüş yarı amprik formülün yeterliliği analiz edilmiştir. Bu kapsamda, formülde bulunan k_1 ve α_1 katsayılarının yeniden belirlenmesi için en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Amprik formülün logaritması alınmış, ölçülen ve tahmin edilen basınç değerleri arasındaki farkların kareleri ile tanımlanan toplam hata bulunmuş, toplam hatayı en aza indirmek için hata fonksiyonu, $E^2(k_1, \alpha_1)$, k_1 ve α_1 'e göre ayrı ayrı türevlenmiş ve elde edilen ifadeler sıfıra eşitlenmiştir. Saha ölçümlerinden elde edilen basınç değerleri ile mesafeler kullanılarak $k_1 = 51.5$ ve $\alpha_1 = 1.18$ sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu değerlerin, genel olarak literatürde kabul edilen $k_1 = 52.4$ ve $\alpha_1 = 1.13$ değerlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, fonksiyonun logaritması alınmadan doğrudan hesaplanan hata fonksiyonu kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle ikinci bir hesaplama gerçekleştirilmiştir. İkinci yaklaşım sonucu $k_1 = 50.3$ ve $\alpha_1 = 1.14$ olarak belirlenmiştir ki bu değerlerin gerçek hatayı minimize etmesi nedeniyle daha doğru olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sayısal değerler genelde literatürde kabul gören sayısal değerlerle oldukça uyumludur. Bu genel uyum yapılan ölçümlerin ve hesaplamaların doğruluğunu teyit eder niteliktedir. Öte yandan, laboratuvarda yapılan ölçümler ile açık deniz koşullarında yapılan ölçümler arasında farklılıklar olabileceği ve deneylerin nispeten küçük ve kapalı bölgelerde yapılmasının anılan katsayılar arasında ciddi farklılıklar oluşmasına sebep olduğu müşahade edilmiştir.

Açık denizde bu çalışmada rapor edilen türden denemelerin zorlukları sebebiyle nadiren yapıldığı dikkate alındığında elde edilen ölçüm sonuçlarının sayısal simülasyonların doğruluğunun kontrolü amacıyla kullanılabileceği ve bu bağlamda söz konusu simülasyonlar için bu çalışmanın çok yararlı olabileceği değerlendirilmektedir.

Tezin ikinci bölümünde, gemi benzeri prizmatik duba geometrisinde bir yapı üzerindeki 3 boyutlu bir sualtı patlamasının etkileri ALE yaklaşımı ile LS-DYNA yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar yoluyla araştırılmıştır. Omurga Şok Faktörü (Keel Shock Factor) KSF'deki değişimlerin etkilerini gözlemlemek üzere üç farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. $KSF \approx 1$ için tasarlanan ikinci simülasyon genel kullanıma açık olmasa da büyük ölçüde saha ölçümlerinin mevcut olduğu bir durumu temsil etmektedir. Hesaplanan maksimum kalıcı deformasyonların ölçülenlere yakınlığı, sayısal simülasyonların güvenilirliğinin bir göstergesidir. Ayrıca, sınırlı simülasyon verilerinin kullanılmasıyla, burada ele alınan yapı için maksimum deformasyonlar ve karşılık gelen KSF değerleri arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Kalıcı deformasyonların iyi bir ilk tahminini sağlayan bu basit ilişki, farklı yapısal özelliklere sahip gemi benzeri formlar için daha geliştirilmiş genel bir formülün öncüsü olarak görülebilir. Son olarak, hesaplanan başlangıç hızları (kick of velocity) göz önüne alındığında platformda, $KSF \approx 1$ olduğunda ciddi hasarlar, $KSF \geq 1$ olduğunda ise ölümcül hasarlar oluşacağı öngörülebilir.

6.2. Öneriler

Bu çalışma ile sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok dalgasının civardaki su üstü platformlarında yarattığı hasarlara yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Ancak sualtı patlaması ile ortaya çıkan gaz kabarcığının etkileri incelenmemiştir. Bu kapsamda, sualtı patlaması ile ortaya çıkan gaz kabarcığının hidrodinamik etkilerinin de incelenmesi ileriye yönelik çalışmalar için uygun bir konudur.

Ayrıca yakın gelecekte taarruz maksatlı insansız denizaltı ve otonom sualtı araçlarının kullanılacak olması denizaltı savunma harbinde hafif, daha az maliyetli, daha az insan gücüne ihtiyaç duyulan ve daha etkin kullanılacak otonom sualtı araçlarının denizaltı savunma harbi konseptine dâhil edilmelerini zorunlu hale getirecektir. Bu kapsamda birden fazla otonom sualtı aracının belirlenen derinlik ve rota ile tesis edilen bir sahada denizaltı savunma harbi kapsamında sualtı dinlemesi

yapabileceği ve ayrıca üzerlerinde konuşlandırılacak muhtelif ağırlıktaki patlayıcılar ile hedef yakınında veya üzerinde infilak ettirilerek caydırıcılık sağlanabileceği değerlendirilmektedir. Bu konular da sualtında birden fazla noktada meydana gelecek patlamaların etkilerinin incelenmesi gerekli yapmaktadır.

Ayrıca, sualtı patlama çalışmalarında yapı-sıvı etkileşiminin analizi oldukça önem arz etmektedir. Sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok dalgasına maruz kalan bir gemi veya platformun davranışının incelenmesi ile aynı zamanda yapının sıvı ile etkileşimi de incelenmelidir. Şok yükü altındaki bir yapının etrafındaki sıvı hızlı bir şekilde hareket eder ve böylece yapı üzerinde ilave etkiler yaratır. Bu kapsamda, katı-sıvı etkileşim modeli üzerinde kavitasyon etkilerini de kapsayacak şekilde incelemeler yapılması da gelecekte göz önüne alınması gereken çalışmalar olarak değerlendirilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **URL-1**<<https://www.nbcnews.com/id/wbna3071787>>, erişim tarihi 10.11.2021.
- [2] **URL-2**<[https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Princeton_\(CG-59\)](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Princeton_(CG-59))>, erişim tarihi 10.11.2021.
- [3] **URL-3**<<https://news.usni.org/2015/05/22/the-day-frigate-samuel-b-roberts-was-mined>>, erişim tarihi 10.11.2021.
- [4] **URL-4**<<https://news.usni.org/2021/06/19/video-explosive-uss-gerald-r-ford-shock-trial-registered-as-3-9-magnitude-earthquake>>, erişim tarihi 10.11.2021.
- [5] **Cole, R. H.** (1948). *Underwater Explosions*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, U. S. A.
- [6] **Ding, P. ve Buijk, A.** (2004). *Simulation of Under Water Explosion Using MSC. Dytran*. Ann Arbor 1001, 48105.
- [7] **Rajendran, R. ve Narasimhan, K.** (2006). A shock factor based approach for the damage assessment of plane plates subjected to underwater explosion. *J. Strain Analysis*, 41(6), 417–425. DOI: 10.1243/03093247JSA120.
- [8] **Pana, R.F., Puica, C., Goga, D.A. ve Nuta, I.** (2015). Numerical studies regarding underwater detonation, *Procedia Economics and Finance*, Volume 32, 946-951. DOI: 10.1016/S2212-5671(15)01552-X.
- [9] **Trevino, T.** (2000). *Applications of arbitrary lagrangian eulerian (ALE) analysis approach to underwater and air explosion problems*. (Doktora Tezi). Naval Postgraduate School, Monterey.
- [10] **Webster, K. G.** (2007). *Investigation of close proximity underwater explosion effects on a ship-like structure using the multi-material arbitrary lagrangian eulerian finite element method*. (Doktora Tezi). Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- [11] **Best, J.P.** (1991). *The Dynamics of Underwater Explosions*. (Doktora Tezi). Wollongong Üniversitesi, Matematik Bölümü, Sidney.
- [12] **Keil, A. H.** (1961). The response of ships to underwater explosions. *Trans. Soc. Naval Architects Marine Eng.* 69: 366-410.

- [13] **Zamyshlyayev, B. ve Yakovlev, Y.S.** (1973). Dynamic Load in Underwater Explosion. Naval Intelligence Support Center.
- [14] **Hawass, A., Elbeih, A., ve Mostafa, H. E.** (2019). Theoretical and experimental study of underwater explosion performance of selected explosive compositions. In *18th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 610, 012061.
- [15] **Huang, C., Liu, M., Wang, B. ve Zhang, Y.** (2019). Underwater explosion of slender explosives: Directional effects of shock waves and structure responses. *International Journal of Impact Engineering* 130: 266-280.
- [16] **Kwon, Y. W. ve Fox, P. K.** (1993). Underwater shock responses of a cylinder subjected to a side-on explosion. *Computers & Structures* 48-4: 637-646.
- [17] **Ramajeyathilagam, K. ve Vendhan, J. P.** (2004). Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock. *International Journal of Impact Engineering* 30: 699- 719.
- [18] **Shin, Y. S.** (2004). Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion. *Computers and Structures* 82: 2211-2219.
- [19] **Hung, C.F., Hsu, P.Y. ve Hwang-Fuu, J.J.** (2005). Elastic shock response of an air-backed plate to underwater explosion. *International Journal of Impact Engineering* 31, 151–168.
- [20] **Hsu, C.Y., Liang, C.C., Teng, T.L. ve Nguyen, H.A.** (2014). The study on the underwater shock loading empirical formula, in: <https://www.researchgate.net/publication/281823479> Conference Paper ID:02956, pp. 1–6.
- [21] **Chisum, J.E.** (1996). *Simulation of the Dynamic Behavior of Explosion Gas Bubbles in a Compressible Fluid Medium*. (Doktora Tezi). Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- [22] **Mair, H.U.** (1999). Review: Hydrocodes for structural response to underwater explosions. *Shock and Vibration* 6, 81–96.
- [23] **Rajendran, R.** (2009). Numerical simulation of underwater explosion bulge test. *Materials and Design* 30, 4335-4341.
- [24] **Wang, G., Wang, Y., Lu, W., Zhou, W., Chen, M. ve Yan, P.** (2016). On the determination of the mesh size for numerical simulations of shock wave propagation in near field underwater explosion. *Applied Ocean Research* 59, 1-9.

- [25] **Barras, G., Souli, M., Aquelet, N. ve Couty, N.** (2012). Numerical simulation of underwater explosions using an ALE method. The pulsating bubble phenomena. *Ocean Engineering* 41, 53-66.
- [26] **Murata, K., Takashi, K. ve Kato, Y.** (1999). Precise measurements of underwater explosion phenomena by pressure sensor using fluoropolymer. *Journal of Materials Technology* 85, 39-42.
- [27] **Wang, G., Zhang, Z., Yu, M., Li, Y. ve Kong, Y.** (2014). Investigating of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries. *Applied Ocean Research* 46, 40-53.
- [28] **Petrov, N.V. ve Schmidt, A.A.** (2015). Multiphase phenomena in underwater explosion. *Experimental Thermal and Fluid Science* 60, 367-373.
- [29] **Zhang, N., Zong, Z. ve Zhang, W.** (2014). Dynamic response of a surface ship structure subjected to an underwater explosion bubble. *Marine Structures* 35, 26-44.
- [30] **Cooper, P.W.** (1994). Comments on the TNT equivalence. *20'nci Uluslararası Payroteknik Semineri*, Colorado.
- [31] **U.S. Army.** (2007) *U.S. Army Explosives and Demolitions Handbook*.
- [32] **Costanzo, F. A.** (2010). Underwater Explosion Phenomena and Shock Physics. Naval Surface Warfare Center Carderock Division. *Society for Experimental Mechanics Inc.* Jacksonville, Florida USA.
- [33] **Reid, W. D.** (1996). *The Response of Surface Ships to Underwater Explosions*. DSTO Aeronautical and Maritime Research Libraray, Melbourne, Victoria, Australia.
- [34] **Best, J.P.** (1991). *The Dynamics of Underwater Explosions*. (Doktora Tezi), Wollongong Üniversitesi, Matematik Bölümü, Sidney.
- [35] **Nemat-Nasser, S., Guo, W.G.** (2003). Thermomechanical response of DH-36 structural steel over a wide range of strain rates and temperatures. *Mechanics of Materials* 35, 1023–1047.
- [36] **LSTC** (1998). *LS-DYNA Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Alpaslan TATLISULUOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1999, Deniz Harp Okulu, Gemi İnşa ve Gemi Makinaları.
- **Yüksek Lisans** : 2009, İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Deniz ve Kıyı Koruma.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 1999 yılında Deniz Harp Okulu'ndan Teğmen rütbesiyle mezun oldu.
- 1999-2003 yılları arasında Hücumbot, SG Botu ve Avcıbotlarda görev yaptı.
- 2003-2004 yıllarında Birinci Sınıf Dalgıç özel ihtisas kursunu birincilikle bitirdi.
- 2004-2009 yıllarında Kurtarma Timlerinde ve Kurtarma Gemilerinde görev yaptı.
- 2009 yılında yüksek lisansını tamamladı.
- 2009-2012 Deniz Kuvvetleri karargâhında görev aldı.
- 2012-2019 yıllarında Kurtarma ve Sualtı K.lığı karargâhında karargâh subaylığı, Ünit Komutanlığı ve Kurtarma Gemilerinde Komutanlık görevlerini icra etti.
- 2020-2021 yıllarında Deniz Harp Enstitüsünde Komuta ve Kurmaylık eğitimini tamamlayarak Kurmay Subay oldu.
- Hâlihazırda Kuzey Deniz Saha Komutanlığı'nda Harekât Başkanlığı görevini yürütmektedir.
- İngilizce ve Rusça bilmektedir.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Tatlısuluoğlu, A.,** Beji, S. (2021) Blast pressure Measurements of an Underwater Detonation in the Sea, *Journal of Marine Science and Application*. DOI: 10.1007/s11804-021-00230-1.
- **Tatlısuluoğlu, A.,** Beji, S. (2021) Sualtı patlaması basınç ölçümleri, *2.Uluslararası Gemi ve Deniz Teknolojisi Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, 16-18 Eylül 2021, 289-301.
- **Tatlısuluoğlu, A.,** Beji, S. (2021) Sualtı patlaması ile ortaya çıkan şok dalgasının civardaki suüstü platformlarının etkilerinin incelenmesi. *2.Uluslararası Gemi ve Deniz Teknolojisi Kongresi*, 16-18 Eylül 2021, 303-314.