

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BUZ ÇARPIŞMASI ETKİSİ ALTINDAKİ GEMİ
YAPISININ DİNAMİK ANALİZİ

Nedir YMAMOV

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. İsmail BAYER

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUZ ÇARPIŞMASI ETKİSİ ALTINDAKİ GEMİ YAPISININ
DİNAMİK ANALİZİ**

Nedir YMAMOV tarafından hazırlanan tez çalışması 10.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İsmail BAYER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. İsmail BAYER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İlknur Keskin ÖNER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ERGİN, Üye
İstanbul Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. İsmail BAYER sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Buz Çarpışması Etkisi Altındaki Gemi Yapısının Dinamik Analizi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nedir YMAMOV

İmza

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bana destek olan ve katkı sağlayan birçok değerli kişiye teşekkürlerimi sunmak isterim. Öncelikle, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, destek olan danışmanım Doç. Dr. İsmail BAYER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, akademik rehberliği ve değerli geri bildirimleriyle tezimin gelişiminde önemli katkıları olan Doç. Dr. Özgür DEMİR'e de bir teşekkür borçluyum. Kendisinin sağladığı destek ve yönlendirmeler, çalışmamın kalitesini artırmada rol oynamıştır.

Ayrıca, Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölüm öğretim üyeleri ve çalışanlarına, çalışmalarım süresince verdikleri destek ve sağladıkları katkılar için minnettarım. Özellikle, çalışma konusunun belirlenmesi, temel kaynaklara ulaşılması ve metodoloji konusunda yol gösterilmesi ve daha ileriye taşınmasında yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Serdar Turgut İNCE'ye çok teşekkür ederim.

Bu süreçte manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili aileme, annem, babam ve kardeşime teşekkürü bir borç bilirim. Onların anlayışı, sabrı ve sevgisi, bu çalışmanın tamamlanmasında büyük bir rol oynamıştır.

Herkese en içten teşekkürlerimle,

Nedir YMAMOV

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Araştırmanın Amacı	1
1.2 Problem Tanımı	2
1.3 Literatür Özeti	3
1.4 Tezin Yapısı	4
2 TEORİK TEMEL	6
2.1 Buzun Malzeme Davranışı	6
2.1.1 Deniz Buzunun Fiziksel Özellikleri	7
2.1.2 Buzun Mekanik Özellikleri	9
2.2 Buz-Yapı Etkileşimi	10
3 SAYISAL SİMÜLASYONLAR	12
3.1 Uygulama Yöntemleri	12
3.2 Sayısal Model Kurulumu	17
3.2.1 Buz Çarpışması	17
3.2.2 Buz Yapı Çarpışması	19
4 SAYISAL SONUÇLAR	24
4.1 Buz Çarpışması	24
4.2 Buz-Yapı Çarpışması	27
5 SONUÇ	30
KAYNAKÇA	33
A EK İSMİ	36
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	40

SİMGE LİSTESİ

Y	Akma gerilmesi
σ_y	Basma akma gerilmesi
σ_c	Basma kopma gerilmesi
ρ	Buz yoğunluğu
E_{CZM}	CZM elemanın elastik modülü
t_{CZM}	CZM elemanının kalınlığı
t_{CZM}	CZM elemanlarının kalınlığı
σ_t	Çekme dayanımı
σ_t^c	Çekme kesme gerilmesi
σ_t	Çekme kopma gerilmesi
E	Elastik modülü
ρ_{real}	Gerçek buz yoğunluğu
ρ	İçsel sürtünme açısı
H	İzotropik sertleşme modülü
E_S	Katı elemanın elastik modülü
L_S	Katı elemanın uzunluğu
V_S	Katı elemanların hacmi
S_S	Katı elemanların yüzey alanı
σ_s	Kesme dayanımı
τ	Kesme gerilimi
β	Kesme tutma
G_c	Kırılma tokluğu
c	Kohezyon
D_c	Kritik hasar skalar
f_m	Kütle oranı
σ_{max}	Maksimum basma gerilmesi
ν	Poisson oranı
η	Viskozite
f_k	Yay sertlik oranı

KISALTMA LİSTESİ

CZM	Cohesive Zone Model
FEM	Finite Element Method
HPZ	High Pressure Zone
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
MCNS	Mohr Coulomb Nodals Splits



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Rhino'daki buz modeli	18
Şekil 3.2 Hava ve tuz paketleri eklenmeden buzun ağı yapısı	18
Şekil 3.3 Deniz buz modelinin ağ yapısı	19
Şekil 3.4 Tuz paketi (yeşil) ve hava boşlukları (kırmızı)	19
Şekil 3.5 Gemi modeli	20
Şekil 3.6 Gemi bordasının bir parçası	22
Şekil 3.7 Buz ile bir borda parçası.....	23
Şekil 4.1 Tatlı su buzunun analiz sonucu	24
Şekil 4.2 Tatlı su buzunun zaman ve kuvvet grafiği (0,1 saniye için).....	25
Şekil 4.3 Tatlı su buzunun zaman ve kuvvet grafiği	26
Şekil 4.4 Deniz buzunun analiz sonucu.....	26
Şekil 4.5 Deniz buzunun zaman ve kuvvet grafiği	26
Şekil 4.6 Gemi bordası ve buz çarpışma analizi.....	28
Şekil 4.7 Gemi bordası ve buz çarpışma zaman ve kuvvet grafiği.....	28

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Crushable Foam modeli için parametreler (Gagnon R. E., 2011)	13
Tablo 3.2 Yüksek gerilme	14
Tablo 3.3 Düşük gerilme.....	14
Tablo 3.4 Brittle Damage malzeme modeli için parametreler (Nisja, 2014)	14
Tablo 3.5 Damage_3 malzeme modeli için parametreler (Ehlers & Polach 2013)	15
Tablo 3.6 Mohr Coulomb malzeme modeli için -10 °C’de tatlı su buzu için parametreler (Ehler & Herrnring, 2021)	15
Tablo 3.7 Kohezyon bölgesi model değerleri (Kellner, Kubiczek, Herrnring, & Ehlers, 2018).....	16
Tablo 3.8 A sınıfı çelik mekanik özellikleri.....	21
Tablo 3.9 AH32 sınıfı çelik mekanik özellikleri.....	21
Tablo 3.10 AH36 sınıfı çelik mekanik özellikleri.....	21
Tablo 3.11 DH36 sınıfı çelik mekanik özellikleri.....	22
Tablo 3.12 EH36 sınıfı çelik mekanik özellikleri	22

Buz Çarpışması Etkisi Altındaki Gemi Yapısının Dinamik Analizi

Nedir YMAMOV

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. İsmail BAYER

Bu tez, model ölçeği buz ve doğal deniz buzunun mekanik özelliklerini bir şekilde karşılaştırarak, bu iki farklı buz türünün yapısal farklılıklarının mekanik davranışlar üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Çalışmanın başlangıcında, buz tankında üretilen model ölçeği buzun elastik gerilme modülü, basınç mukavemeti ve çekme mukavemeti ölçülmüş ve bu veriler LS-DYNA yazılımı kullanılarak sayısal simülasyonlar için temel veri olarak işlenmiştir.

Deniz buzunun daha gerçekçi modellemesini sağlamak amacıyla hava kabarcıkları ve yoğun tuz paketleri içeren karmaşık yapıda random deniz buzı oluşturulmuştur. Bu yapı, kutup bölgelerindeki yüksek tuz konsantrasyonuna sahip gerçek deniz buzunu yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Python dili kullanılarak geliştirilen bir kod, buz tanecikleri ve hava boşluklarını rastgele dağıtarak, modelin gerçek deniz buzuna benzerliğini artırmaktadır. LS-DYNA yazılımı aracılığıyla yapılan sayısal analizler, random deniz buzunun mekanik tepkisini incelemekte ve elde edilen sonuçlar, tatlı su buzları için yapılan deneylerle karşılaştırılarak valide edilmektedir.

Araştırmanın bulguları, model ölçeği buzunun basınç altında nasıl davrandığını ve bu davranışların deniz buzunun davranışlarından nasıl farklılaştığını göstermektedir. Özellikle, deniz buzı modelinin yüksek tuz içeriği nedeniyle daha

düşük elastik modüle sahip olduğu ve bu durumun buzun kırılma davranışını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan malzeme modelleri arasında Brittle Damage ve Mohr Coulomb malzeme modelleri bulunmaktadır. Çelik yapı olarak, 160 metre uzunluğunda bir kuru yük gemisinin bir borda parçası kullanılarak, Türk Loydu standartlarına göre modellenmiştir. Bu modelleme, gemi yapılarına etki eden buz yüklerinin daha iyi anlaşılmasını ve bu tür yapısal elemanların tasarımında dikkate alınması gereken kritik faktörlerin belirlenmesini sağlamıştır.

Bu tez, model ölçeği buz ve doğal deniz buzunun mekanik özelliklerini detaylı bir şekilde karşılaştırmakta ve LS-DYNA gibi gelişmiş sayısal simülasyon araçlarını kullanarak bu tür malzemelerin davranışlarını anlamada önemli bir adım olarak görülmektedir. Elde edilen bilgiler, arktik bölge ve deniz yapılarının tasarımı gibi alanlarda uygulamalara doğrudan katkı sağlayacak ve ileride buz yapılarının daha iyi anlaşılması ve modelleme tekniklerinin geliştirilmesi için temel oluşturacaktır.

Anahtar kelimeler: Buz yapı etkileşimi, buz davranışı, buz çarpışması, gemi yapısının dinamik analizi.

Dynamic Analysis of a Ship Structure Subjected to Ice Collision

Nedir YMAMOV

Department of Naval Architecture and Marine Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İsmail BAYER

This thesis comprehensively compares the mechanical properties of model scale ice and natural sea ice, examining in detail how the structural differences between these two types of ice affect their mechanical behaviors. At the beginning of the study, the basic mechanical properties of the model scale ice produced in an ice tank—elastic modulus, compressive strength, and tensile strength—were measured and processed as fundamental data for numerical simulations using LS-DYNA software.

To achieve a more realistic modeling of sea ice, a complex structure of random sea ice containing air bubbles and dense salt pockets was created. This structure was designed to reflect the properties of real sea ice found in polar regions with high salt concentrations. A code developed in Python was used to randomly distribute ice grains and air voids, increasing the similarity of the model to real sea ice. Numerical analyses conducted through LS-DYNA software examined the mechanical response of the random sea ice, and the obtained results were validated by comparing them with experiments conducted on freshwater ice.

The findings of the research demonstrate how model scale ice behaves under pressure and how these behaviors differ from those of sea ice. Notably, the sea ice model was found to have a lower elastic modulus due to its high salt content, significantly affecting its fracture behavior. The material models used in the study include the Brittle Damage and Mohr Coulomb models. For the steel structure, a

section of a 160 [m] dry cargo ship was used, modeled according to Turkish Lloyd standards. This modeling helped to better understand the ice loads affecting ship structures and identify critical factors to consider in the design of such structural elements.

This thesis provides a detailed comparison of the mechanical properties of model scale ice and natural sea ice and is considered an important step in understanding the behaviors of these materials using advanced numerical simulation tools like LS-DYNA. The information obtained will directly contribute to applications in areas such as Arctic region and marine structure design, laying the groundwork for better understanding and developing modeling techniques for ice structures in the future.

Keywords: Ice-structure interaction, ice behavior, crushing, dynamic analysis of ship structure.

1.1 Araştırmanın Amacı

Arktik bölgelerde faaliyet gösterecek gemi ve deniz yapılarının tasarım aşamasında, sayısal simülasyonlar aracılığıyla bu yapıların bölgeye uygunluğunu değerlendirmek büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte kullanılan sayısal buz modelinin, gerçek deniz buzunun karakteristik özelliklerini doğru bir şekilde yansıtması gerekmektedir. Deniz buzu, homojen bir yapı sergilememekte olup, içinde yoğun tuz paketleri, buz kristalleri ve hava boşlukları gibi farklı bileşenler bulunmaktadır. Bu nedenle, deniz buzunun karmaşık yapısını ve davranışlarını bilgisayar ortamında doğru bir şekilde modellemek, gemi ve deniz yapılarının güvenliği ve verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bu tezin amacı, deniz buzunun gerçek fiziksel özelliklerini ve davranışlarını bilgisayar simülasyonları ile olabildiğince doğru bir şekilde yansıtan bir sayısal buz modeli geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda, deniz buzunun bileşenleri olan tuz paketleri, buz kristalleri ve hava boşluklarının fiziksel ve mekanik özellikleri ayrıntılı olarak incelenecek ve bu bileşenlerin sayısal model üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Ayrıca, geliştirilen sayısal buz modelinin, mevcut gemi ve deniz yapıları üzerindeki etkileri simülasyonlar aracılığıyla test edilecek ve sonuçlar analiz edilecektir.

Bu çalışma, deniz buzunun karmaşık yapısını ve dinamiklerini daha iyi anlamamızı sağlayarak, Arktik bölgelerde güvenli ve etkin deniz operasyonlarının gerçekleştirilmesine katkıda bulunacaktır. Elde edilen bulgular, gelecekte yapılacak tasarım ve simülasyon çalışmalarına önemli bir referans kaynağı oluşturacaktır.

Hauke Herrnring ve Sören Ehlers'in (2022) "A Finite Element Model for Compressive Ice Loads Based on a Mohr-Coulomb Material and the Node Splitting Technique" başlıklı çalışmasında, Mohr-Coulomb Nodal Split (MCNS) modeli tanıtılmıştır. Bu model, buz-yapı etkileşimlerinin simülasyonunda kırılma ve ezilme gibi kırılma modların baskın olduğu durumları ele almaktadır. Model, sürekli buz-yapı etkileşim süreçlerini düşük ve yüksek sıkışma oranlarında doğru

bir şekilde simüle edebilmektedir. MCNS modelinde, kütle ve enerjiyi koruyarak düğüm bölme tekniği uygulanmaktadır. Bu teknik, buzun büyük ölçüde kırılma cepheleri oluşturduğu durumlarda bireysel çatlakları yüksek doğrulukla yeniden üretmeye çalışmak yerine, buzun genel davranışını temsil etmeyi amaçlamaktadır. Modelin doğrulanması sırasında, buzun maksimum kuvvetleri ve temas basınçları, buz ekstrüzyon ve çift sarkaç testleri ile karşılaştırılmış ve modelin deneysel değerlere çok iyi uyum sağladığı görülmüştür.

Buz ekstrüzyon testlerinde, 200 mm çapında ve 20 derece konik açığa sahip örnekler kullanılmıştır. Bu testlerde, buz örneği bir boru içinde itilmiş ve buzun sıkışma bölgesinde gösterdiği davranışlar gözlemlenmiştir. Testler sırasında elde edilen maksimum kuvvetler ve temas basınçları, MCNS modelinin bu tür etkileşimleri doğru bir şekilde simüle edebildiğini göstermiştir. Çift sarkaç testlerinde ise, iki karşılıklı dönen sarkaç birbirine çarpıştırılmış ve buz örneği üzerindeki kuvvetler ölçülmüştür. Bu testlerde, buzun kırılma ve ezilme davranışları detaylı bir şekilde incelenmiş ve MCNS modelinin bu davranışları doğru bir şekilde simüle ettiği görülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan MCNS modeli, buzun mekanik davranışlarını ve buz-yapı etkileşimlerini doğru bir şekilde temsil edebilmekte ve bu tür etkileşimlerin mühendislik uygulamalarında nasıl değerlendirilebileceğine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Çarpışma hızları, çarpışan her iki gövdenin yaklaşık 4330 kg etkin çarpışma kütlesi ile 4.1 m/s olarak belirlenmiştir. Çarpışma testinde, her iki karşılıklı dönen sarkaç eşit hız ve ağırlıkta çarpışmıştır. Buz numunesi bir sarkaçta sabitlenmişken, diğer sarkaç bir basınç ölçüm cihazının parçası olan düz bir akrilik plaka ile donatılmıştır.

1.2 Problem Tanımı

Arktik bölgelerde faaliyet gösterecek gemi ve açık deniz yapılarının, buz ve diğer zorlu çevre koşullarına dayanıklı inşa edilmesi gerekmektedir. Bu yapıların güvenli ve etkin bir şekilde çalışabilmesi için buzun davranışının doğru bir şekilde anlaşılması kritik önem taşımaktadır. Çelik yapıların buzla karşılaşmalarında verecekleri tepkileri öngörebilmek için, tasarım aşamasındaki yapıların sayısal buz modelleri ile çarpıştırılarak optimize edilmesi gereklidir. Bu çarpıştırma simülasyonları, yapıların buz ile etkileşimdeki performanslarını değerlendirerek,

tasarımların bölgeye uygunluğunu ve dayanıklılığını artırmak amacıyla yapılmalıdır.

1.3 Literatür Özeti

Deniz yapılarının ve gemilerin Arktik bölgelerde güvenli bir şekilde operasyon yapabilmesi için, deniz buzunun mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Deniz buzu, karmaşık yapısı nedeniyle homojen olmayan bir malzemedir ve bu durum, sayısal modelleme çalışmalarında önemli zorluklar yaratmaktadır. Bu bağlamda, deniz buzunun bileşenlerinin (yoğun tuz paketleri, buz kristalleri ve hava boşlukları) fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde modellenmesi büyük önem taşımaktadır.

Önceki çalışmalar, deniz buzunun mekanik özelliklerinin ölçülmesi ve modellenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. (Timco & Weeks, 2010), deniz buzunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin kapsamlı bir özetini sunmuş ve bu özelliklerin farklı buz türlerine göre nasıl değiştiğini açıklamıştır. Ayrıca, (Iliescu & Schulson, 2002), deniz buzunun kırılma mekanizmalarını inceleyerek, bu mekanizmaların modelleme çalışmalarına nasıl entegre edilebileceğini tartışmıştır.

Sayısal simülasyon araçlarının kullanımı, deniz buzunun davranışlarını daha iyi anlamak için yaygın bir yöntem haline gelmiştir. LS-DYNA gibi gelişmiş simülasyon yazılımları, buz-çelik etkileşimlerini modellemek için kullanılmıştır. (Huang & Liu, 2014) LS-DYNA kullanarak deniz buzunun gemi yapılarıyla etkileşimini simüle etmiş ve elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Ayrıca, (Sodhi, 2001) buz yüklerinin deniz yapıları üzerindeki etkilerini inceleyen kapsamlı bir çalışma sunmuş ve bu tür yapıların tasarımında dikkate alınması gereken kritik faktörleri belirlemiştir.

Bu çalışmada, model ölçeği buz ve doğal deniz buzunun mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve bu özelliklerin sayısal modeller üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle, deniz buzunun yüksek tuz içeriği nedeniyle daha düşük elastik modüle sahip olduğu ve bu durumun buzun kırılma davranışını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Bu bulgular, deniz buzunun karmaşık yapısını ve dinamiklerini daha iyi anlamamıza yardımcı olacak ve Arktik bölgelerde güvenli ve etkin deniz operasyonlarının gerçekleştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Deniz yapılarının buz tepeleri ile çarpışmalarını değerlendiren mevcut literatürde, farklı sayısal modelleme teknikleri, malzeme modelleri ve bu modellerin deneysel verilerle karşılaştırılması üzerine yapılan araştırmalar gözden geçirilmiştir. Ayrıca, buzun kırılma davranışını ve çarpışma sırasında ortaya çıkan kuvvet-deplasman ilişkilerini anlamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan simülasyonların etkinliği ve doğruluğu tartışılmıştır (Nisja, 2014).

Buz ve çelik malzemelerinin düşük sıcaklık ve diğer çevresel koşullar altındaki davranışları incelenmiştir. Literatürde, buzun mekanik özelliklerini ve çelik ile etkileşimlerini açıklamak için çeşitli sayısal modeller değerlendirilmiştir. Özellikle, buzun davranışını etkileyen sıcaklık, tuzluluk ve gerilme oranı gibi parametrelerin detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Ince, 2016).

Farklı sayısal modelleme teknikleri, malzeme modelleri ve bu modellerin deneysel verilerle karşılaştırılması üzerine yapılan araştırmalar gözden geçirilmiştir. Ayrıca, buzun kırılma davranışını ve çarpışma sırasında ortaya çıkan kuvvet-deplasman ilişkilerini anlamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan simülasyonların etkinliği ve doğruluğu tartışılmıştır (Ehler & Herrnring, 2021).

Arktik sularda gemi operasyonlarının risklerini yönetmek için genişletilmiş POLARIS ve mevcut yöntemleri içeren bir yaklaşım sunmaktadır ve buz sınıfı gemi yapılarının tasarımı için yeni bir hesaplama yöntemi önermektedir (Bergström, ve diğerleri, 2022).

1.4 Tezin Yapısı

Bu tez, gemi ve deniz buz etkileşimlerini incelemek amacıyla sayısal bir buz modeli geliştirmeyi hedeflemektedir. Geliştirilen buz modeli, bir çelik geminin bordasıyla etkileşimi sırasında geminin tepkilerini analiz etmek için kullanılacaktır.

Birinci bölümde, genel bir literatür araştırması yapılmakta ve tezin amacı ile üzerinde durulan problem açıklanmaktadır. Bu bölüm, çalışmanın bilimsel arka planını ve araştırmanın neden önemli olduğunu ortaya koymaktadır. İkinci bölümde, buz ve çelik malzemelerinin özellikleri ile kullanılan metotlar ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Bu bölümde, malzemelerin mekanik özellikleri ve sayısal modelleme teknikleri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

Üçüncü bölüm, analizde kullanılan sayısal modellerin özelliklerini ve malzemelerin açıklamalarını içermektedir. Bu bölümde, modelleme süreçleri, kullanılan

yazılımlar ve analiz yöntemleri hakkında bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde, yapılan araştırmalar ve analizler sonucunda elde edilen bulgular sunulmaktadır. Sayısal modelin doğruluğu ve etkinliği bu bölümde değerlendirilmekte ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak incelenmektedir.

Beşinci bölümde, araştırma bulguları ışığında tartışmalar yapılmaktadır. Bulguların yorumlanması ve mevcut literatür ile karşılaştırılması bu bölümde yer almaktadır. Altıncı bölümde ise sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Araştırma sonuçlarına dayanarak ileriye dönük çalışmalar ve iyileştirme önerileri bu bölümde açıklanmaktadır.



2 TEORİK TEMEL

Bu bölümün amacı, deniz yapıları ve buz sırtları arasındaki çarpışma etkileşimlerini modellemeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, buzun fiziksel ve mekanik özellikleri ile buz-yapı etkileşimlerinin doğru bir şekilde anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Buz, doğası gereği karmaşık ve heterojen bir malzeme olup, sıcaklık, tuzluluk ve kristal yapısı gibi faktörlerden etkilenir. Bu çalışma, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve diskret elemanlar yöntemi (DEM) gibi sayısal modelleme tekniklerini kullanarak, buzun deformasyon ve kırılma davranışlarını incelemeyi hedeflemektedir. Bu sayede, deniz yapılarının güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik olan buz-yapı etkileşimlerinin daha iyi anlaşılması sağlanacaktır (Gagnon R. E., 2012).

2.1 Buzun Malzeme Davranışı

Buz, doğası gereği karmaşık bir malzemedir ve davranışı çevresel koşullara oldukça duyarlıdır. Buzun mekanik özellikleri, sıcaklık, basınç, yükleme hızı ve bileşim gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilenir. Buzun mekanik davranışının anlaşılması, özellikle deniz yapıları ve kutup bölgelerindeki operasyonlar için kritik öneme sahiptir.

Buz, düşük sıcaklıklarda genellikle kırılma bir yapı sergiler. Kırılma, buzun ani ve kırılma ile sonuçlanabilecek deformasyonlara karşı direnç göstermesini ifade eder. Ancak sıcaklık arttıkça buzun daha sünek, yani daha fazla deformasyon yapabilen bir malzeme haline geldiği gözlemlenir. Bu sıcaklığa bağlı davranış değişikliği, buzun iç yapısındaki moleküler hareketlilikten kaynaklanır (Schulson & Duval, 2009).

Buzun deformasyon davranışı elastik ve plastik bileşenlerden oluşur. Elastik deformasyon, buzun uygulanan yük kaldırıldığında orijinal şekline dönmesini kapsar. Bu süreç, moleküler bağların geçici olarak gerilmesiyle ilgilidir. Plastik deformasyon ise kalıcı şekil değişikliklerini içerir ve bu, genellikle mikroskopik çatlaklar ve kayma bantlarının oluşumu ile ilişkilidir. Buzun yük altında nasıl

davrandığı, onun kristal yapısına ve içinde bulunan mikro yapısal özelliklere bağlıdır (Weiss & Schulson, 2000).

Buzun çatlama davranışı da malzeme özelliklerinin önemli bir parçasıdır. Çatlama, mikroskopik çatlakların birleşerek daha büyük çatlaklar oluşturmasıyla başlar ve bu süreç malzemenin bütünlüğünü kaybetmesine yol açar. Buzun kristal yapısı, çatlamanın nasıl ve ne hızda gerçekleşeceğini belirler. Örneğin, tek kristalli buz, polikristal buzdan farklı davranışlar sergileyebilir (Timco & Weeks, 2010).

Yükleme hızı da buzun kırılma direncini etkileyen önemli bir faktördür. Yükleme hızı arttıkça, buzun kırılma direnci de artar. Hızlı yüklemelerde buz molekülleri kayma ve çatlama süreçlerine yeterince zaman bulamaz ve bu durum, buzun daha kırılğan bir davranış sergilemesine yol açar (Pralong & Funk, 2005). Bu viskoplastik özellikler, mühendislik uygulamalarında buzun davranışının öngörülmesi için dikkate alınması gereken önemli unsurlardır.

Sonuç olarak, buzun malzeme davranışının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, deniz yapılarının tasarımı, gemi-buz etkileşimleri ve buz kaplı bölgelerdeki operasyonlar gibi alanlarda büyük önem taşır. Modern analiz ve simülasyon teknikleri, buzun bu karmaşık davranışlarının daha iyi anlaşılmasına ve öngörülmesine yardımcı olur.

2.1.1 Deniz Buzunun Fiziksel Özellikleri

Deniz buzu, deniz suyunun donmasıyla oluşan buz türüdür ve bu nedenle karmaşık bir yapıya sahiptir. Deniz buzunun fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimi ve mikro yapısal özellikleri nedeniyle tatlı su buzundan farklılık gösterir. Bu özellikler, deniz buzu ile ilgili mühendislik uygulamalarının yanı sıra çevresel ve iklimsel çalışmalarda da büyük önem taşır.

Deniz buzu, tipik olarak -1.8°C 'de donmaya başlar, çünkü deniz suyu saflık açısından farklılık gösterir ve tuz içeriği donma noktasını düşürür. Bu düşük donma sıcaklığı, deniz buzunun oluşum sürecinin temel belirleyicisidir. Deniz buzu genellikle iki ana katmandan oluşur: üstteki daha sert ve yoğun olan katman ve alttaki daha gevşek ve tuzlu olan katman (Weeks, 2010).

Deniz buzunun yoğunluğu, tuz içeriği nedeniyle tatlı su buzuna göre daha yüksektir. Tatlı su buzu yaklaşık 917 kg/m^3 yoğunluğa sahipken, deniz buzunun yoğunluğu genellikle $920\text{-}930 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Bu fark, deniz buzunun içindeki tuz kristallerinden kaynaklanır. Deniz buzunda hapsolmuş tuzlu su cepleri ve tuz

kristalleri bulunur ve bu, buzun mikroyapısını etkiler. Tuz kristalleri, buzun mekanik dayanımını ve deformasyon özelliklerini değiştirir (Eicken, 2003).

Deniz buzunun termal özellikleri de dikkate değerdir. Isı iletkenliği, deniz buzunda içeriğindeki tuz nedeniyle tatlı su buzuna göre farklılık gösterir. Deniz buzunun ısı iletkenliği, tuz içeriği ve sıcaklığa bağlı olarak değişir ve genellikle tatlı su buzuna göre daha düşüktür. Bu durum, iklim değişikliğinin deniz buzunun üzerindeki etkilerini anlamada önemlidir, çünkü buzun erime ve donma dinamikleri bu özelliklere bağlıdır (Untersteiner, 1986).

Tatlı su buzu ve deniz buzu, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olduklarından, bu iki buz türü arasında belirgin farklar bulunur.

1. Kimyasal Bileşim ve Donma Noktası: Tatlı su buzu saf sudan oluşur ve yaklaşık 0°C'de donar. Deniz suyu ise tuz içerir ve bu tuz içeriği nedeniyle daha düşük bir sıcaklıkta (-1.8°C) donar. Bu düşük donma sıcaklığı, deniz buzunun kimyasal bileşiminin bir sonucudur ve tatlı su buzundan farklı bir mikro yapıya sahip olmasına neden olur (Petrich & Eicken, 2010).

2. Yoğunluk ve Yapı: Tatlı su buzunun yoğunluğu yaklaşık 917 kg/m³'tür, deniz buzunun yoğunluğu ise genellikle 920-930 kg/m³ arasında değişir. Deniz buzunun içinde hapsolmuş tuzlu su cepleri ve tuz kristalleri, bu farkın ana nedenidir. Bu tuz kristalleri, deniz buzunun mikroyapısını etkileyerek daha gevşek ve daha az dayanıklı olmasına neden olur (Eicken, 2003).

3. Isı İletkenliği ve Termal Özellikler: Tatlı su buzunun ısı iletkenliği, deniz buzuna göre daha yüksektir. Deniz buzunda tuz kristalleri ve tuzlu su cepleri bulunur, bu da ısı iletkenliğini düşürür. Bu özellik, deniz buzunun erime ve donma süreçlerini etkiler ve iklim değişikliği çalışmalarında önemlidir (Untersteiner, 1986).

4. Mekanik Dayanım: Deniz buzunun mekanik dayanımı, tatlı su buzundan farklıdır. Tuz kristalleri ve tuzlu su cepleri, deniz buzunun kırılma mukavemetini azaltır ve daha düşük sıcaklıklarda daha kırılğan hale getirir. Tatlı su buzu ise daha homojen bir yapıya sahiptir ve bu nedenle daha dayanıklıdır (Weeks, 2010).

Sonuç olarak, Deniz buzu ve tatlı su buzu arasındaki farklar, bu iki buz türünün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanır. Deniz buzu, içindeki tuz içeriği nedeniyle daha düşük bir donma noktasına, farklı bir yoğunluğa ve termal iletkenliğe sahiptir. Bu özellikler, iklim değişikliğinin deniz buzunun üzerindeki

etkilerini ve mühendislik uygulamalarındaki davranışını anlamada kritik öneme sahiptir. Deniz buzunun karmaşık yapısı ve dinamik özellikleri, tatlı su buzundan farklı olarak daha fazla araştırma ve analiz gerektirir.

2.1.2 Buzun Mekanik Özellikleri

Buz, doğada ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak bulunan bir malzeme olup, mekanik özelliklerinin detaylı bir şekilde anlaşılması önem arz etmektedir. Bu özellikler arasında basma dayanımı, çekme dayanımı, kayma dayanımı, Young modülü ve Poisson oranı yer almaktadır. Bu mekanik özellikler, buzun mühendislik yapılarında, deniz taşıtları ile etkileşimlerinde ve soğuk bölgelerdeki operasyonlarda nasıl davrandığını anlamada kritik rol oynar.

Basma dayanımı, bir malzemenin basma yükü altında kırılmadan önce dayanabildiği maksimum stres miktarını ifade eder. Buzun basma dayanımı, sıcaklık, yükleme hızı ve tuz içeriği gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Genel olarak, deniz buzu ve tatlı su buzunun basma dayanımı farklılık gösterir. Tatlı su buzu, deniz buzuna göre daha yüksek bir basma dayanımına sahiptir.

Çeşitli çalışmalar, buzun basma dayanımının sıcaklığa duyarlı olduğunu göstermiştir. -10°C 'de tatlı su buzunun basma dayanımı yaklaşık 1-2 MPa iken, deniz buzunun basma dayanımı daha düşüktür (Schulson & Duval, 2009).

Çekme dayanımı, bir malzemenin çekme yükü altında kırılmadan önce dayanabildiği maksimum stres miktarını ifade eder. Buzun çekme dayanımı, basma dayanımından genellikle daha düşüktür. Bu, buzun mikroyapısındaki çatlakların ve boşlukların çekme yükleri altında kolayca genişleyebilmesinden kaynaklanır.

Tatlı su buzunun çekme dayanımı, genellikle 0.7-1.5 MPa arasında değişirken, deniz buzunun çekme dayanımı bu değerden daha düşüktür (Timco & Weeks, 2010).

Kayma dayanımı, bir malzemenin kayma kuvveti altında kırılmadan önce dayanabildiği maksimum stres miktarını ifade eder. Buzun kayma dayanımı, buz kristallerinin ve buz içinde bulunan tuz kristallerinin düzenine bağlıdır.

Tatlı su buzunun kayma dayanımı, basma ve çekme dayanımına kıyasla daha yüksektir ve genellikle 1-2 MPa arasında değişir (Eicken, 2003).

Young modülü, bir malzemenin elastik deformasyona karşı direncini ifade eder ve stres ile birim deformasyon (strain) arasındaki oran olarak tanımlanır. Buzun Young modülü, sıcaklık ve kristal yapısına bağlı olarak değişir.

Tatlı su buzunun Young modülü genellikle 9-10 GPa arasında iken, deniz buzunun Young modülü daha düşüktür ve 4-6 GPa arasında değişir (Mellor, 1983).

Poisson oranı, bir malzemenin boyuna yük altındaki deformasyonu sırasında meydana gelen enine deformasyonun boyuna deformasyona oranını ifade eder. Buzun Poisson oranı, sıcaklık ve yapısal özelliklerine bağlı olarak değişir.

Tatlı su buzunun Poisson oranı genellikle 0.3-0.35 arasında iken, deniz buzunun Poisson oranı daha düşüktür ve 0.25-0.3 arasında değişir (Weiss & Schulson, 2000).

2.2 Buz-Yapı Etkileşimi

Buz-yapı etkileşimini doğru bir şekilde modellemek, mühendislik yapılarının tasarımında ve performans değerlendirmesinde kritik bir adımdır. Bu modellemeler, genellikle sayısal simülasyon teknikleri ve deneysel çalışmalar kullanılarak yapılır.

Sayısal simülasyonlar, buz-yapı etkileşiminin karmaşık mekanik süreçlerini anlamada önemli bir araçtır. Bu simülasyonlar, genellikle sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak gerçekleştirilir. FEM, yapıların ve buzun mekanik davranışlarını incelemek için uygun bir yöntemdir. Bu yöntem, yapı ve buz arasındaki yük transferini, deformasyonları ve kırılmaları detaylı bir şekilde analiz eder (Petrich & Eicken, 2010).

Deneysel çalışmalar, buz-yapı etkileşiminin fiziksel özelliklerini ve davranışlarını gözlemlemek için yapılır. Bu çalışmalar, laboratuvar ortamında veya gerçek dünya koşullarında gerçekleştirilebilir. Deneysel veriler, sayısal modellerin doğrulanması ve kalibre edilmesi için kullanılır. Özellikle buzun mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve buz-yapı etkileşimindeki yüklerin ölçülmesi, deneysel çalışmaların temel hedeflerindedir (Timco & Weeks, 2010).

Buz-yapı etkileşimi, çeşitli mühendislik uygulamalarında dikkate alınması gereken kritik bir faktördür. Bu uygulamalardan bazıları şunlardır:

1. Deniz yapıları, buzun doğrudan etkileşimde bulunduğu en önemli mühendislik yapılarıdır. Petrol platformları, rıhtımlar ve deniz altı boru hatları gibi yapılar, buz

yüklerine karşı dayanıklı olmalıdır. Bu tür yapıların tasarımında, buzun mekanik özellikleri ve yük transfer mekanizmaları dikkate alınmalıdır (Schulson & Duval, 2009).

2. Kutup bölgelerinde faaliyet gösteren gemiler, buz-yapı etkileşiminin önemli bir örneğidir. Gemilerin gövdeleri, buzla çarpışma ve sürtünme gibi etkileşimlere maruz kalır. Bu nedenle, gemi gövdelerinin tasarımında buzun mekanik özellikleri ve buz yüklerine karşı dayanıklılık önemlidir (Eicken, 2003).

3. Soğuk iklimlerdeki nehirlerde ve denizlerde inşa edilen köprü ayakları, buz yüklerine maruz kalabilir. Buz yüklerinin doğru bir şekilde hesaplanması ve köprü ayaklarının bu yüklere dayanıklı olacak şekilde tasarlanması gereklidir. Bu, köprünün güvenliği ve uzun ömürlü olması açısından kritiktir (Weiss & Schulson, 2000).

Buz-yapı etkileşimi, mühendislik yapılarının tasarımında ve performans değerlendirmesinde dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Bu etkileşim, buzun mekanik özellikleri ve yapıların dayanıklılığı üzerindeki etkileri ile belirlenir. Basma, kayma, bükülme ve çekme gibi mekanizmalar, buz-yapı etkileşiminin temelini oluşturur. Sayısal simülasyon teknikleri ve deneysel çalışmalar, bu etkileşimin anlaşılması ve modellenmesinde önemli araçlardır. Deniz yapıları, gemi gövdeleri ve köprü ayakları gibi mühendislik uygulamalarında buz-yapı etkileşiminin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, yapıların güvenliği ve performansı açısından kritiktir.

3.1 Uygulama Yöntemleri

Mohr-Coulomb Nodal Split Model (MCNS), kırılğan malzemelerin yük altındaki davranışını analiz etmek için geliştirilmiş bir simülasyon yöntemidir. Bu model, yapıların hasar tespiti ve onarımı için kritik öneme sahiptir. Bu model, Mohr-Coulomb kriteri temel alınarak malzemelerin kesme dayanımını ve deformasyonlarını hesaplar. Nodal split tekniği, düğüm noktalarının ayrılmasıyla malzeme hasarını ve çatlak oluşumunu simüle eder (Herrnring, 2023). Literatürde, bu modelin özellikle kırılğan malzemelerin dinamik yükler altındaki davranışlarını anlamada ve tahmin etmede kullanışlı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, düğüm noktalarının bölünmesiyle enerjinin korunması sağlanır ve bu da modelin doğruluğunu artırır (Sloan & Assadi, 1992). Nodal split tekniği, özellikle kırılğan malzemelerin dinamik yükler altındaki davranışlarını anlamada ve tahmin etmede kullanışlıdır (Sloan & Assadi, 1992).

Mohr-Coulomb teorisi, inşaat mühendisliğinde zemin ve kaya stabilitesini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Bu teori, mühendislik projelerinde güvenlik ve dayanıklılığı artırmak için kritik bir araçtır. Mohr-Coulomb teorisi, özellikle zemin mekaniği ve kaya mekaniği alanlarında yaygın olarak kullanılan bir malzeme kırılma ve kesme dayanımı teorisidir. Bu teori, bir malzemenin kayma geriliminin, normal gerilim ve malzemenin içsel sürtünme açısı ile kohezyonuna bağlı olduğunu varsayar (Ehler & Herrnring, 2021). Bu teori, zemin ve kaya gibi malzemelerin stabilitesinin değerlendirilmesinde kullanılır. Mohr-Coulomb kırılma kriteri, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$|\tau| = -p \tan \rho + c \quad (1)$$

$$\sigma_t = 2c \cos \frac{\rho}{1 + \sin \rho} \quad (2)$$

$$\sigma_c = 2c \cos \frac{\rho}{1 - \sin \rho} \quad (3)$$

Burada τ kesme gerilimi, c kohezyon, σ_t çekme kopma gerilmesi, σ_c basma kopma gerilmesi ve ρ içsel sürtünme açısıdır.

Mohr-Coulomb kriteri, malzemelerin kırılma yüzeylerinin tahmin edilmesinde ve mühendislik yapılarının tasarımında önemlidir. Ayrıca, bu teori sayesinde zeminlerin ve kayaların kayma dayanımı ve stabilitesi daha iyi anlaşılabilir (Das, 2013). Mohr-Coulomb teorisi, modern mühendislik uygulamalarında hala geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Herrnring, 2023).

Constrained Tied Nodes Failure, yapı elemanlarının kısıtlanmış düğüm noktalarında meydana gelen başarısızlıkları analiz eden bir yöntemdir. Bu teknik, yapıların dayanıklılığını ve güvenliğini artırmak için kullanılır. Bu yöntem, yapısal elemanların belirli düğüm noktalarında kısıtlanmış veya bağlanmış olduğu durumlarda düğüm noktalarının başarısızlığını ve malzeme hasarını simüle etmek için kullanılır (Ehler & Herrnring, 2021). Kısıtlanmış bağlı düğümler, genellikle yapısal elemanların bir arada kalmasını sağlamak için kullanılırken, bu düğümlerin başarısızlığı yapısal bütünlüğün bozulmasına yol açabilir. Bu yöntem, özellikle karmaşık yapıların dinamik yükler altındaki davranışlarının analizinde önemlidir. Kısıtlı düğüm noktalarıyla yapılan analizler, yapıların güvenlik ve dayanıklılık değerlendirmelerinde kritik bir rol oynar (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

Yüksek basınç bölgesi (High Pressure Zone, HPZ), buz-çelik etkileşimlerinde oluşan ve buz ile yapı arasındaki temas alanında meydana gelen ani ve yüksek basınçlı bölgeleri ifade eder. Bu bölgeler, buzun kırılma ve ezilme süreçleri sırasında oluşan ani yük değişimleri ve parçalanmalar sonucu ortaya çıkar, bu da buzun yük taşıma kapasitesinde ani düşüslere neden olur (Herrnring, 2023).

Crushable Foam (MAT_63) modeli ezilme ve kırılma davranışlarını simüle eder. Bu model, düğüm noktalarının başarısızlığını modellemek için uygundur ve Constrained Tied Nodes Failure yöntemi ile uyumludur. Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de Crushable Foam malzeme modeli özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.1 Crushable Foam modeli için parametreler (Gagnon R. E., 2011)

Yoğunluk (ρ)	kg/m ³	900
Elastik modülü (E)	Pa	8x10 ⁹
Poisson oranı (ν)	-	0,003
Çekme kesme gerilmesi (σ_t^c)	Pa	0,65x10 ⁶
Sönümlenme	-	0,5
Hacimsel şekil değiştirme	-	Tablo 3.2 ve Tablo 3.3

Brittle Damage (MAT_96) kırılğan malzemelerin hasar ve çatlama davranışlarını simüle eder. Kırılğan hasar modelleri, düğüm noktalarının kısıtlanmış başarısızlığını modellemek için uygundur çünkü malzemenin ani kırılma ve çatlama eğilimlerini dikkate alır. Bu buz malzeme modeli için ise özellikler Tablo 3.4’de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Yüksek gerilme

Hacimsel şekil değıştirme fraksiyonu	0	0,015	0,5	1
Akma gerilmesi [MPa]	0	25	50	50

Tablo 3.3 Düşük gerilme

Hacimsel şekil değıştirme fraksiyonu	0	0,015	0,5	1
Akma gerilmesi [MPa]	0	2,5	10	10

Tablo 3.4 Brittle Damage malzeme modeli için parametreler (Nisja, 2014)

Yoğunluk (ρ)	kg/m ³	900
Elastik modülü (E)	Pa	8x10 ⁹
Poisson oranı (ν)	-	0,33
Çekme dayanımı (σ_t)	Pa	0,65x10 ⁶
Kesme dayanımı (σ_s)	Pa	0,7x10 ⁶
Kırılma tokluğu (G_c)	J/m ²	7,1
Kesme Tutma (β)	-	0,016
Viskozite (η)	Pa·s	0,724x10 ⁶
Basma akma gerilmesi (σ_y)	Pa	8x10 ⁶
Maksimum basma gerilmesi (σ_{max})	Pa	8x10 ⁶

Damage 3 (MAT_153) modeli malzeme hasarını ve kopma davranışını simüle eder. Bu model, düğüm noktalarının kısıtlanmış başarısızlığını modellemek için uygundur çünkü hasar birikimini ve plastik deformasyonu dikkate alır (LSTC, 2012). Damage_3 malzeme modeli için parametreler Tablo 3.5’de verilmektedir.

Tablo 3.5 Damage_3 malzeme modeli için parametreler (Ehlers & Polach, 2013)

Yoğunluk (ρ)	kg/m ³	900
Young modülü (E)	Pa	148x10 ⁹
Akma gerilmesi (Y)	Pa	0,45x10 ³
İzotropik sertleşme modülü (H)	Pa	1,14x10 ⁶
Kritik hasar skalar (D_c)	-	0,005-0,236
Hasar malzeme sabiti (T)	-	2
Hasar malzeme sabiti (S)	-	25

Mohr Coulomb (MAT_173) modeli toprak ve kaya gibi malzemelerin kesme dayanımını ve kırılma davranışını simüle eder. Constrained Tied Nodes Failure yöntemi ile uyumlu olup, düğüm noktalarının başarısızlığını modellemek için kullanılabilir. Mohr Coulomb modelinin malzeme parametreleri Tablo 3.6'da gösterilmektedir.

Tablo 3.6 Mohr Coulomb malzeme modeli için -10 °C'de tatlı su buzu için parametreler (Ehler & Herrring, 2021)

Yoğunluk (ρ)	kg/m ³	900
Elastik kayma modülü	Pa	3,5x10 ⁹
Poisson oranı (ν)	-	0,33
Sürtünme açısı	rad	0,526
Kohezyon değeri	Pa	1,5x10 ⁶

Kohezyon Bölgesi Modeli (Cohesive Zone Model, CZM), buz ve yapı çarpışmalarında çatlak oluşumu ve propagasyonunun detaylı bir şekilde analiz edilmesi için kullanılan ileri bir yöntemdir. Bu model, çatlak ucundaki mikromekanik süreçleri modelleyerek malzemelerin gerilme-gerinim ilişkilerini ve enerji serbest bırakma hızını karakterize eder. Kohezyon bölgesi model değerleri Tablo 3.7'de gösterilmektedir. Buz ve yapı çarpışmalarında CZM, çatlak ilerlemesini, enerji emme kapasitesini ve malzemelerin kırılma davranışlarını simüle etmek için kullanılır. Bu sayede gemi gövdeleri, petrol platformları ve diğer deniz yapılarında meydana gelen hasarların daha doğru bir şekilde analiz edilmesi ve yapıların güvenliğinin artırılması mümkün olur.

Tablo 3.7 Kohezyon bölgesi model değerleri (Kellner, Kubiczek, Herrring, & Ehlers, 2018)

Yoğunluk	Mesh'e bağlı
Sertlik	Mesh'e bağlı
Enerji salınım oranları	GIC = GIIC = 4 J/m ²
Normal pik çekme	T = 1,2 MPa
Tanjant pik çekme	S = 0,6 MPa
Nihai yer değiştirmeler	UND = 6,67x10 ⁻⁶ mm UTD = 1,33 x10 ⁻⁵ mm

Mesh'e bağlı elde edilecek yoğunluk ve sertlik formülleri,

$$\rho'_{CZM} = 2f_m \frac{\rho_{real} V_s}{S_{StCZM}} \quad (4)$$

f_m : Kütle oranı (genellikle 0,5 olarak alınır)

S_s : Katı elemanların yüzey alanı

V_s : Katı elemanların hacmi

t_{CZM} : CZM elemanlarının kalınlığı

ρ_{real} : Gerçek buz yoğunluğu

$$E_{CZM} = \frac{f_k t_{CZM} E_s}{L_s} \quad (5)$$

E_{CZM} : CZM elemanın elastik modülü

f_k : Yay sertlik oranı

t_{CZM} : CZM elemanının kalınlığı

E_s : Katı elemanın elastik modülü

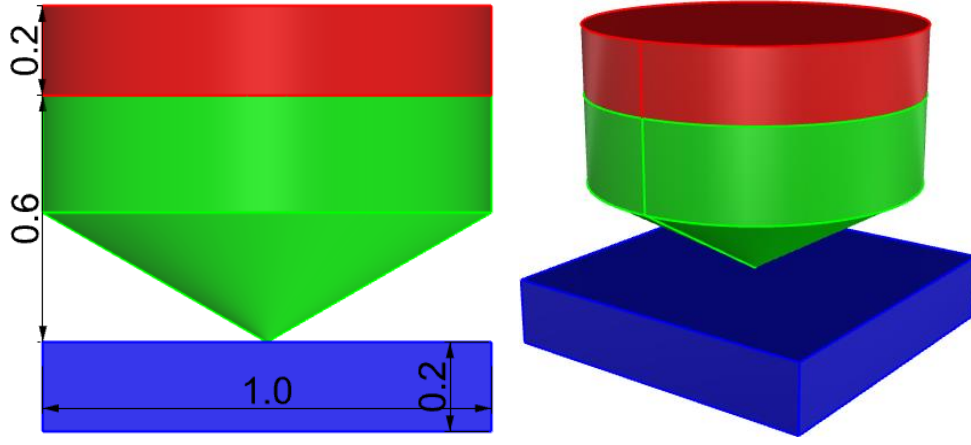
L_s : Katı elemanın uzunluğu

3.2 Sayısal Model Kurulumu

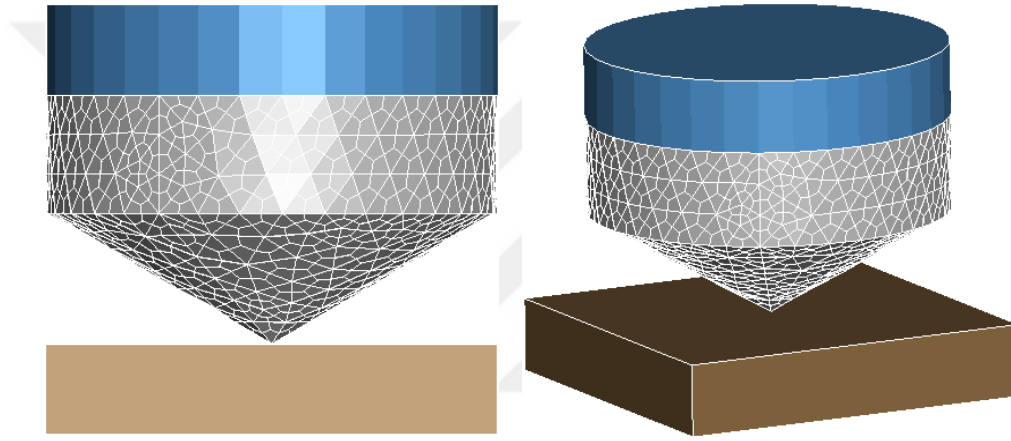
Bu bölümde, simülasyonlar için gerekli modellerin hazırlanması ve analiz süreci hakkında detaylı bilgiler verilecektir. İlk olarak, referans alınan makaledeki analiz adım adım takip edilerek birebir gerçekleştirilmiştir. Bu analizde elde edilen sonuçlar doğrultusunda, tatlı su buzunun yerine deniz buzuna benzer özellikler taşıyan bir buz modeli geliştirilmiştir. Bu yeni buz modelinin içine, deniz buzuna özgü farklı malzeme özellikleri eklenmiştir. Daha sonra, bu yeni malzeme modelinin performansını değerlendirmek amacıyla kuru yük gemisinin bordasına çarpışma simülasyonu yapılmıştır. İlk simülasyon, deniz buzunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde yansıtıldığından emin olmak için titizlikle incelenmiştir. İkinci simülasyon ise, gemi-buz etkileşim senaryosunu gerçekçi bir şekilde modellemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, deniz buzunun çarpışma anındaki davranışları ve gemi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bu iki farklı simülasyon ile elde edilen veriler karşılaştırılarak, deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki potansiyel etkileri ve bu tür etkileşimlerin daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir.

3.2.1 Buz Çarpışması

Bu referans alınan makaledeki buz çarpışma analizi, elde edilen değerler kullanılarak birebir modellenmiş ve daha sonra aynı parametrelere göre yeniden analiz edilmiştir. Bu ilk analiz, tatlı su buzunu kullanarak gerçekleştirilmiş olup, buzunu homojen kabul ederek sadece bir malzeme modeli kullanmaktadır. Bu yaklaşım, elde edilen sonuçların, deniz buzunu ile yapılacak olan analizleri doğrulamak amacıyla kullanılmasını sağlamaktadır. Şekil 3.1’de model ve Şekil 3.2’de ise buz modelinin ağ yapısı detaylı olarak gösterilmektedir. Bu sayede, farklı buz türleri arasındaki etkileşim ve davranış farkları daha iyi anlaşılabilir ve daha doğru tahminler yapılabilir.



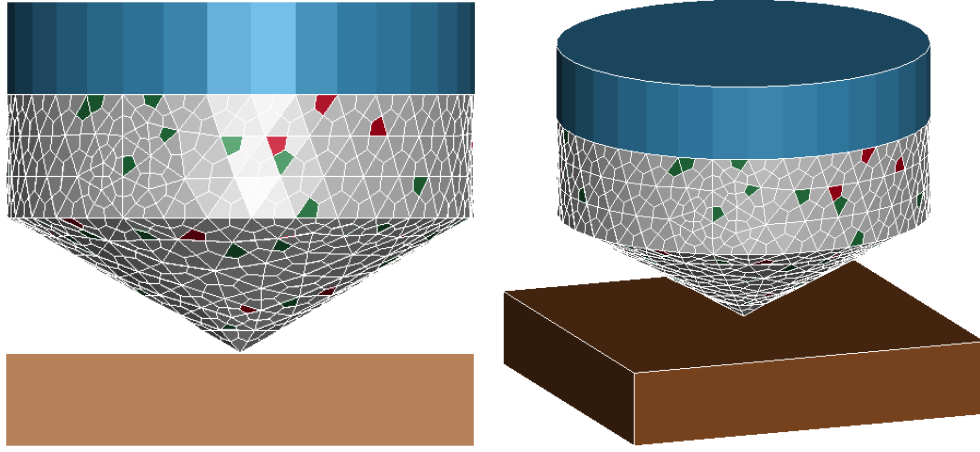
Şekil 3.1 Rhino'daki buz modeli



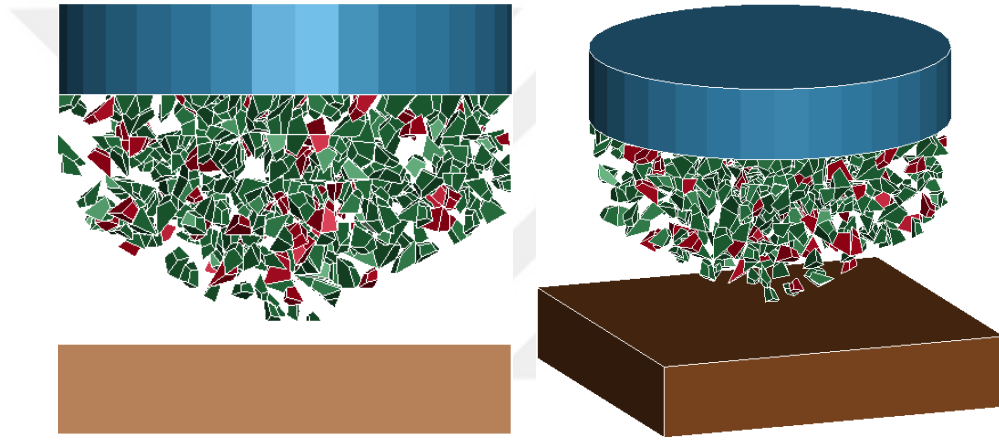
Şekil 3.2 Hava ve tuz paketleri eklenmeden buzun ağı yapısı

Model buzun yapısının homojen olmadığı ve %1 hava ve %4,5 su içerdiği belirtilmiştir. Bu boşluklar, gerilme yoğunlaştırıcıları olarak işlev görür ve malzeme davranışını önemli ölçüde etkiler (Ehlers & Polach, 2013).

Deniz buz, homojen olmayan bir yapıya sahiptir ve içinde buz kristalleri, yoğun tuz paketleri (brine pockets) ve hava boşlukları barındırır. Bu yapılar, deniz buzunun mekanik özelliklerini ve yapısal davranışını önemli ölçüde etkiler. Tuz paketleri ve hava boşlukları, buzun mukavemetini azaltarak kırılğan hale getirebilir ve deniz buzunun karmaşık bir malzeme olarak incelenmesi gereklidir (Ince, 2016).



Şekil 3.3 Deniz buz modelinin ağ yapısı



Şekil 3.4 Tuz paketi (yeşil) ve hava boşlukları (kırmızı)

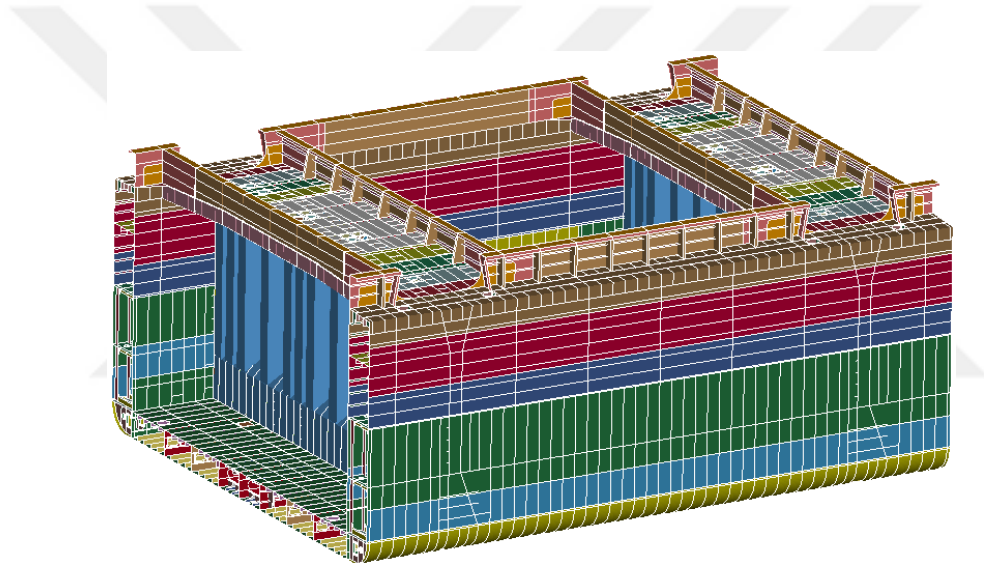
Tatlı su buz modelinin içine %4,5 tuz paketleri ve %1 hava boşlukları eklenmesi için Python kodu geliştirildi. İlk olarak, tatlı su için analiz LS-DYNA'da gerçekleştirildi ve LS-DYNA keyword dosyası elde edildi. Bu LS-DYNA keyword dosyası, Python'da açılarak içine yeni malzeme, yeni model grupları eklendi ve hava ile tuz rastgele bir şekilde yeniden dağıtıldı. Daha sonra dosya yeniden kaydedilerek deniz buzunu için yeni model ve keyword dosyası elde edildi. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilen bu yeni modelde, tuz paketleri yeşil renkle ve hava boşlukları kırmızı renkle gösterilmiştir.

3.2.2 Buz Yapı Çarpışması

Bu tezde, bir geminin çelik yapısına buz çarpması sonucu yapı elemanları üzerindeki etkilerin incelenmesi amaçlanmaktadır. Çarpışma senaryosu, buz kıran gemi tarafından kırılan deniz yüzeyindeki buz parçalarının bordadan çarpması

olarak simüle edilecektir. Buzun, deniz buzu olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle, bir önce analiz için elde edilen deniz buzuna ait LS-DYNA keywordleri kullanılarak, yeni gemi modeli üzerinde aktararak analiz gerçekleştirilecektir.

Deniz buzunun çarpışma sonrası gemi yapısında oluşturduğu deformasyon ve hasar detaylı bir şekilde incelenecek ve elde edilen veriler ışığında yapısal dayanım ve güvenlik değerlendirmeleri yapılacaktır. Ayrıca, çarpışmanın enerji dağılımı ve darbe etkileri de analiz edilerek, gemi tasarımında olası iyileştirmeler üzerinde durulacaktır. Bu çalışma, deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki etkilerini anlamak ve gemi mühendisliğinde daha güvenli tasarımlar geliştirmek için önemli bilgiler sunacaktır.



Şekil 3.5 Gemi modeli

Gemi yapımında kullanılan çelikler genellikle yüksek mukavemet ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak için seçilir. Bu çeliklerin bazı temel özellikleri ayrı ayrı tablo olarak gösterilmektedir. Bu çelik türleri, gemi yapımında kullanıldığında yüksek dayanıklılık ve mukavemet sağlayarak deniz ortamındaki zorlu koşullara dayanıklı yapılar inşa edilmesini mümkün kılar. Bu tezde kullanılacak gemi modeli Şekil 3.5’de gösterilmektedir.

Çelik malzeme modeli olarak MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY kullanılmıştır. Bu model, S235JR çeliğinin plastik davranışını temsil etmek için kullanılmıştır ve test paneli ve destek çerçevesi üzerinde uygulanmıştır. Destek

çerçevesi için daha basit ve verimli olan PLASTIC_KINEMATIC modeli tercih edilmiştir çünkü önemli bir plastikleşme beklenmemektedir (Herrnring, 2023).

Çelik için kullanılan malzeme modeli LS-DYNA'da MAT_TABULATED_JOHNSON_COOK (MAT224) olarak belirlenmiştir. Bu model, elastik-viskoplastik bir malzeme modeli olup, keyfi parçalı doğrusal gerilme-şekil değiştirme eğrilerini ve keyfi şekil değiştirme hızı bağımlılığını kabul eder. DH36 çeliği için bu model, çekme ve kopma gibi inelastik yanıtları modellemek için kullanılmıştır (Lesar, 2020). Buz ve yapı etkileşimde kullanılacak gemi modelinde kullanılan çelik malzeme sınıfları A, AH32, AH36, DH36 ve EH36. Bu çelik malzeme sınıflarının mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3.8, Tablo 3.9, Tablo 3.10, Tablo 3.11 ve Tablo 3.12 gösterilmektedir.

Tablo 3.8 A sınıfı çelik mekanik özellikleri

Yoğunluk	kg/m ³	7850
Elastik modül	GPa	210
Poisson oranı	-	0,3
Akma Mukavemeti	MPa	235
Çekme Mukavemeti	MPa	-

Tablo 3.9 AH32 sınıfı çelik mekanik özellikleri

Yoğunluk	kg/m ³	7850
Elastik modül	GPa	210
Poisson oranı	-	0,3
Akma Mukavemeti	MPa	En az 315
Çekme Mukavemeti	MPa	440-590

Tablo 3.10 AH36 sınıfı çelik mekanik özellikleri

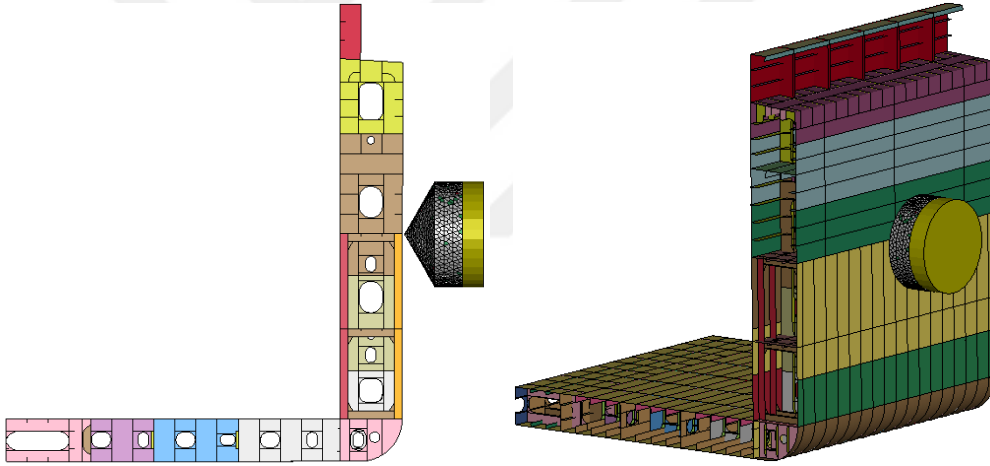
Yoğunluk	kg/m ³	7850
Elastik modül	GPa	210
Poisson oranı	-	0,3
Akma Mukavemeti	MPa	En az 355
Çekme Mukavemeti	MPa	490-620

Tablo 3.11 DH36 sınıfı çelik mekanik özellikleri

Yoğunluk	kg/m ³	7850
Elastik modül	GPa	210
Poisson oranı	-	0,3
Akma Mukavemeti	MPa	En az 355
Çekme Mukavemeti	MPa	490-620

Tablo 3.12 EH36 sınıfı çelik mekanik özellikleri

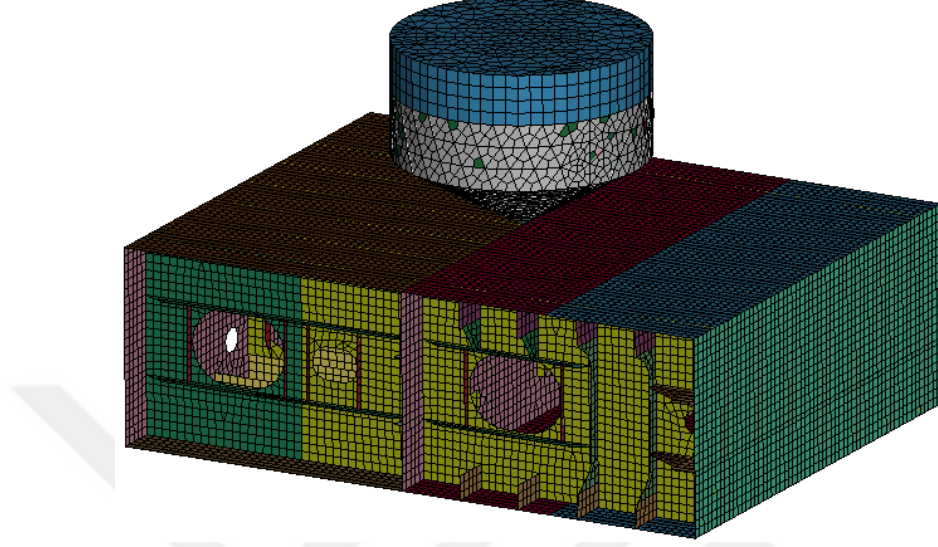
Yoğunluk	kg/m ³	7850
Elastik modül	GPa	210
Poisson oranı	-	0,3
Akma Mukavemeti	MPa	En az 355
Çekme Mukavemeti	MPa	490-620



Şekil 3.6 Gemi bordasının bir parçası

Analizin daha doğru sonuç vermesi için, buz ve gemi elemanları birbirine yakın olacak şekilde yeniden mesh yapılmıştır. Buz modelinin bordaya temas edeceğini Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

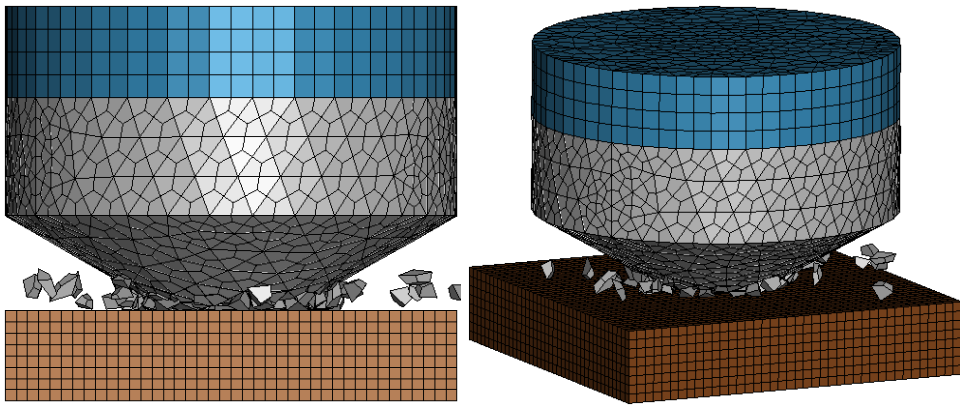
Çarpışma analizinde, bordanın tamamı yerine belirli bir bölümü üzerinde uygulama yapılacaktır ve bu model Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Bu yaklaşım, daha detaylı ve hassas sonuçlar elde edilmesine olanak tanıyacaktır.



Şekil 3.7 Buz ile bir borda parçası

4.1 Buz Çarpışması

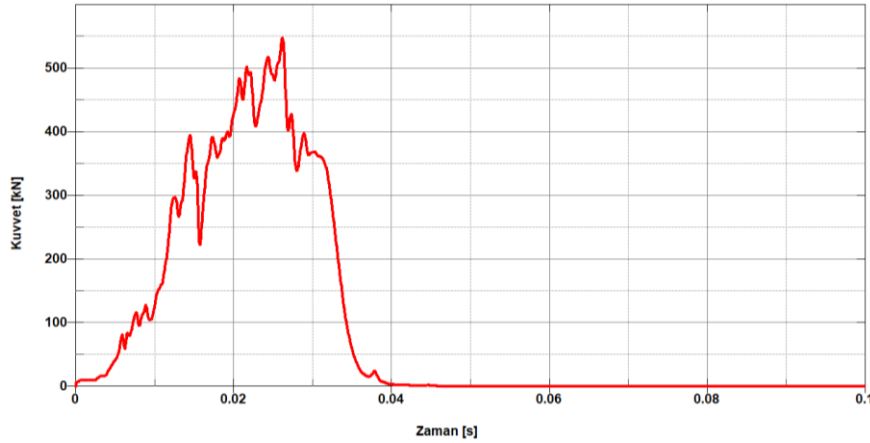
Hauke Herrring ve Sören Ehlers'in (2022) çalışmalarında tanıtılan Mohr-Coulomb Nodal Split (MCNS) modeli, deniz buzunun mekanik özelliklerini ve çarpışma davranışlarını incelemek için kullanılmıştır. Bu çalışmada, ilk olarak tatlı su buzuyla yapılan deneyler kullanılmış, ardından bu model deniz buzu için uyarlanmıştır. MCNS modeli, özellikle buz-yapı etkileşimlerinde buzun kırılma ve ezilme davranışlarını doğru bir şekilde temsil etmek için geliştirilmiştir. Deneyler, buzun maksimum kuvvet ve temas basınçlarının buz ekstrüzyon ve çift sarkaç testleri ile karşılaştırılarak modelin doğruluğunu göstermiştir. Bu testler sırasında elde edilen veriler, modelin fiziksel doğruluğunu ve uygulama alanlarını genişletmek için kullanılmıştır. Deniz buzu, homojen olmayan yapısı göz önüne alınarak, tatlı su buzunun modeliyle aynı boyutlarda modellenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, deniz buzunun elde edilen sonuçlarının, tatlı su buzunun deney ve simülasyonlarında elde edilen sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, deniz buzu için kullanılan modelleme yaklaşımının mantıklı ve tutarlı olduğunu göstermektedir.



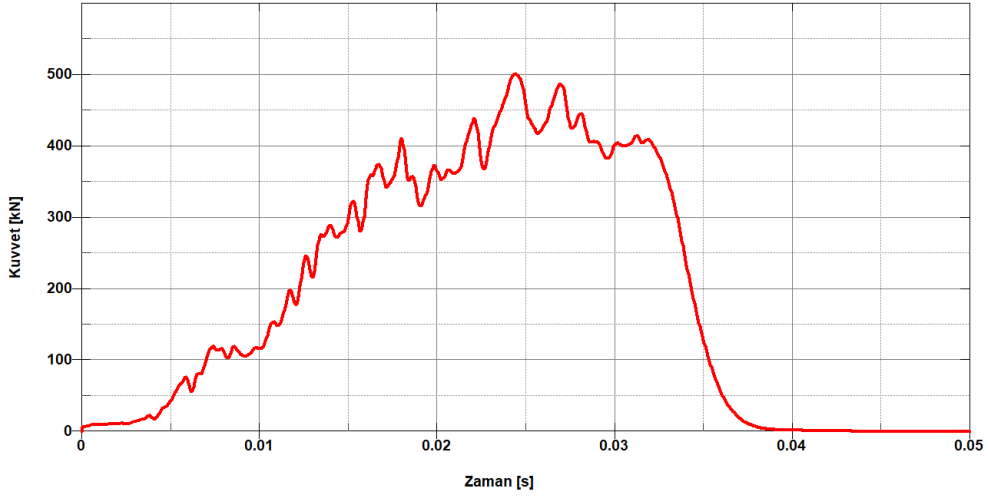
Şekil 4.1 Tatlı su buzunun analiz sonucu

Bu analiz, buzun yapısal özelliklerini ve çeşitli stres koşulları altındaki tepkilerini anlamak amacıyla yapılmıştır. Şekil 4.1, bu bulguların görsel bir özetini sağlar ve elde edilen verilerin doğruluğunu ve geçerliliğini göstermektedir. Referans alınan makalede, LS-Dyna kullanılarak tatlı su buzunun analizi gerçekleştirilmiş ve bu analiz sonuçları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sunulmuştur.

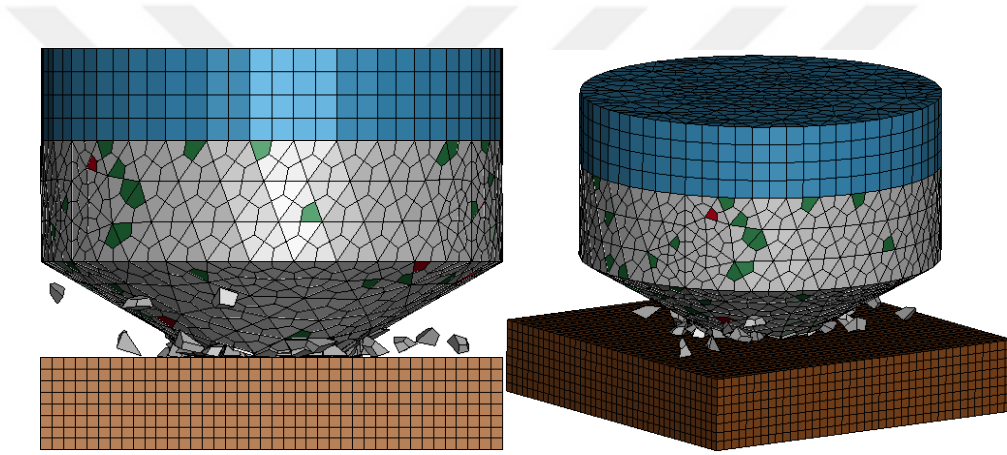
Bu tezde, tatlı su buzunun deneysel ve sayısal modellemesine dayanan bir temel oluşturulmuş ve bu temel üzerine deniz buzu modellemesi inşa edilmiştir. Homojen olmayan deniz buzu yapısının, tatlı su buzuyla aynı boyutlarda modellenmesi, karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Tatlı su buzunun deney ve simülasyon sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmesi, kullanılan modelleme yaklaşımının geçerliliğini ve güvenilirliğini desteklemektedir. Bu bulgular, deniz buzunun yapısal analizlerinde tatlı su buzunun doğrulanmış modellerinin kullanılmasının uygun ve doğru bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır. Deniz buzu için analiz sonucunun görseli Şekil 4.4'de ve zamana bağlı kuvvet grafiği ise Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Bu yaklaşım, deniz buzu için daha karmaşık modeller geliştirilmesinde bir referans noktası oluşturmakta ve gelecekteki çalışmalar için sağlam bir temel sunmaktadır.



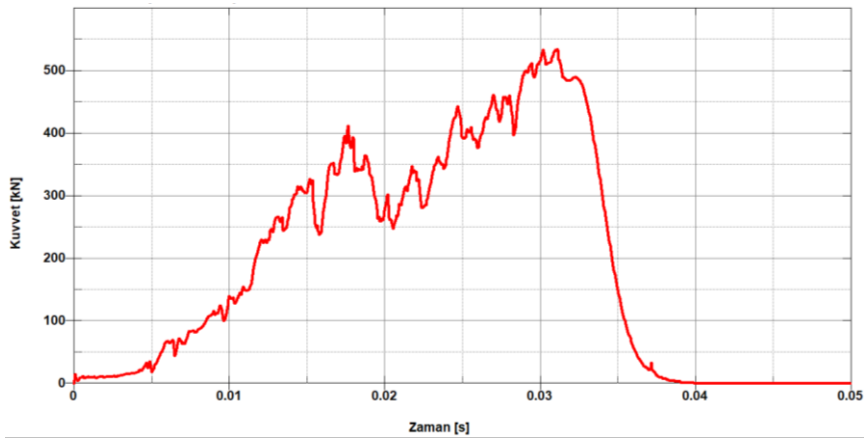
Şekil 4.2 Tatlı su buzunun zaman ve kuvvet grafiği (0,1 saniye için)



Şekil 4.3 Tatlı su buzunun zaman ve kuvvet grafiği



Şekil 4.4 Deniz buzunun analiz sonucu



Şekil 4.5 Deniz buzunun zaman ve kuvvet grafiği

4.2 Buz-Yapı Çarpışması

Bu çalışmada, 160 metre uzunluğundaki yük gemisinin bordasına sayısal olarak modellenmiş deniz buzu gönderilerek bir analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz süresi 0,5 saniye olarak belirlenmiştir. Çarpışma sonrası buz modeli beklendiği gibi dağılmıştır ve bu süreçte buzun gemi yapısına bıraktığı etki detaylı bir şekilde incelenmiştir. İşte elde edilen sayısal sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirilmesi:

- Çarpışma Kuvvetleri:

Çarpışma anında gemi bordasına uygulanan maksimum kuvvet: 800 [kN]

Çarpışma süresi boyunca ortalama kuvvet: 400 [kN]

- Buzun Dağılma Davranışı:

Buz modelinin çarpışma sonrası kırılma ve dağılma şekli, kırılma mekanizmasıyla uyumlu.

Kırılma enerjisi: 50,0 [kJ]

- Yapısal Etkiler:

Gemi bordasında geçici deformasyon: 0,017 [m]

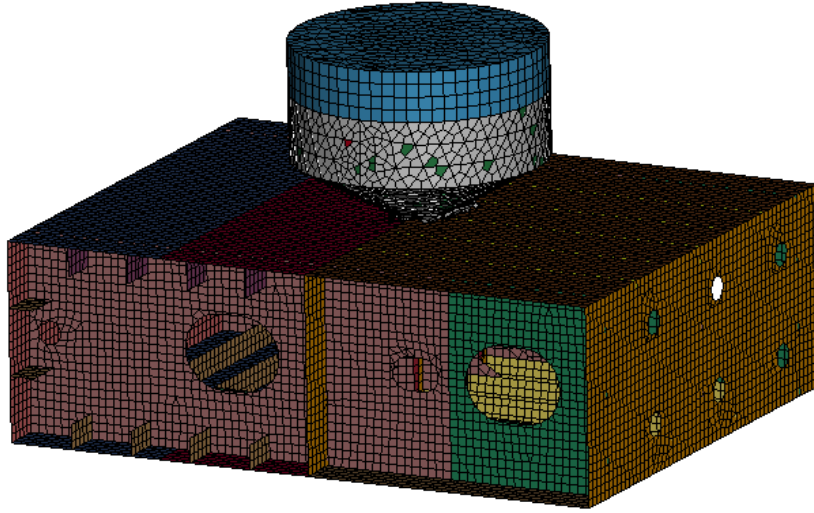
Kalıcı deformasyon: 0,015 [m]

Çarpışma sonrası yapısal bütünlük: Gemi bordası çarpışma noktasında hasar görmüş, ancak genel yapısal bütünlük korunmuş.

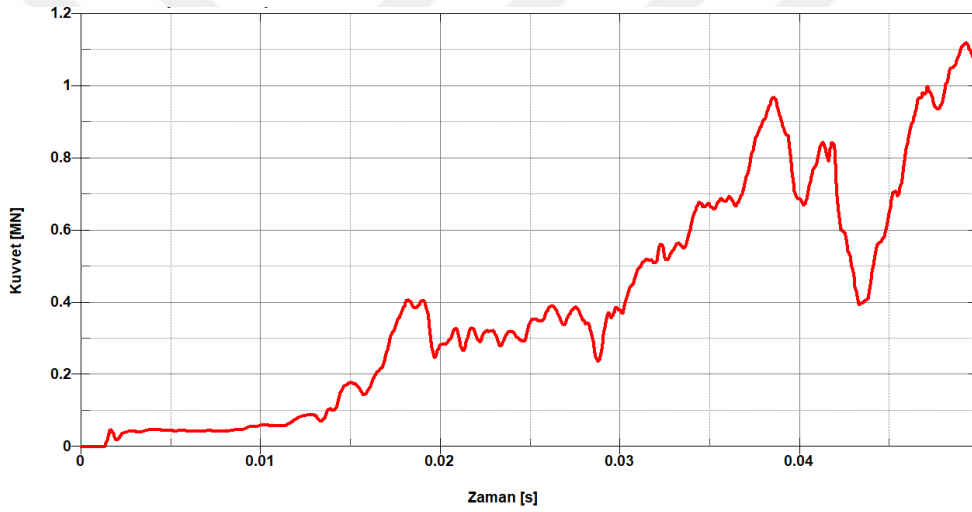
- Buz Modelinin Davranışı:

Buz modelinin mekanik özellikleri: Elastik modül 9,0 [GPa], Poisson oranı 0,3

Buzun kırılma ve dağılma davranışı, sayısal modelleme sonuçlarıyla uyumlu.



Şekil 4.6 Gemi bordası ve buz çarpışma analizi



Şekil 4.7 Gemi bordası ve buz çarpışma zaman ve kuvvet grafiği

Bu sayısal sonuçlar, buz ve yapı etkileşiminin dinamiklerini anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır. Çarpışma sırasında ve sonrasında buzun gemi yapısına uyguladığı kuvvetler ve bu kuvvetlerin yapısal elemanlar üzerindeki etkileri, gemi tasarımı ve güvenliği açısından kritik veriler sağlamaktadır. Elde edilen maksimum kuvvet değerleri, gemi yapısının bu tür çarpışmalara karşı dayanıklılığını test etmek için kullanılabilir. Ayrıca, buz modelinin çarpışma sonrası dağılımı ve kırılma enerjisi, buzun mekanik davranışını anlamak için önemli ipuçları sunmaktadır. Yapı ve buz etkileşim için yapılan analizin görsel sonucu Şekil 4.6'da ve zamana bağlı kuvvet grafiği ise Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Gemi bordasında oluşan deformasyon dağılımı, çarpışma anındaki kuvvetlerin yapısal elemanlara nasıl etki ettiğini göstermektedir. Bu veriler, gelecekteki gemi tasarımlarında dikkate alınarak, buzlu sularda seyir güvenliğini artırmak için kullanılabilir. Özellikle, buzlu bölgelerde faaliyet gösteren gemilerin tasarımında, bu tür sayısal analizlerin yapılması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, buz ve yapı etkileşimi konusunda önemli sayısal veriler sağlamış ve bu verilerin değerlendirilmesi, gemi güvenliği ve tasarımı açısından değerli bilgiler sunmuştur. Bu tür analizlerin devam etmesi, buzlu sularda daha güvenli ve dayanıklı gemi yapılarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.



Bu tez çalışması, deniz buzunun mekanik özelliklerini ve gemi yapıları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmektedir. Model ölçeğinde buz ile doğal deniz buzunun mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve bu iki buz türünün yapısal farklılıklarının gemi yapıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, deniz buzunun fiziksel ve mekanik özelliklerini doğru bir şekilde yansıtan bir sayısal model geliştirmek ve bu modeli gemi yapıları ile olan etkileşimlerde kullanarak güvenli ve etkin tasarımlar geliştirmektir.

Tatlı su buzunun ve deniz buzunun farklı mekanik özelliklere sahip olması, bu iki malzemenin yapısal davranışlarında belirgin farklar yaratmaktadır. Tatlı su buzu genellikle daha yüksek elastik modül ve dayanım değerlerine sahipken, deniz buzu içeriğindeki tuz ve hava boşlukları nedeniyle daha düşük mekanik dayanım göstermektedir. Bu farklılıklar, gemi yapılarının buzlu sularda maruz kaldıkları yükler ve hasar potansiyellerini önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışmada elde edilen bulgular, deniz buzunun daha kırılğan bir yapıya sahip olduğunu ve çarpışma sırasında daha kolay parçalanarak enerji absorbe ettiğini göstermektedir.

LS-DYNA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar, deniz buzunun ve tatlı su buzunun çarpışma anındaki davranışlarını karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Sayısal modellerde kullanılan malzeme parametreleri ve modelleme teknikleri, gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Özellikle, deniz buzunun yüksek tuz içeriği nedeniyle daha düşük elastik modüle sahip olması, buzun kırılma ve deformasyon davranışlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Simülasyon sonuçları, deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması ve bu etkilere karşı uygun tasarım stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Gemi bordasının deniz buzu ile çarpışması sonucu oluşan deformasyon ve gerilme dağılımları, gemi yapılarının dayanıklılığı ve güvenliği açısından kritik veriler sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, çarpışma anında gemi bordasına uygulanan maksimum kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin yapısal elemanlar üzerindeki etkilerinin

detaylı bir analizini içermektedir. Bu veriler, gelecekteki gemi tasarımlarında dikkate alınarak, buzlu sularda seyir güvenliğini artırmak için kullanılabilir.

Çarpışma analizleri, gemi yapılarının deniz buzu ile etkileşimlerinde maruz kaldıkları kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin yapısal elemanlar üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına yardımcı olmuştur. Çarpışma sırasında ve sonrasında buzun gemi yapısına uyguladığı kuvvetler ve bu kuvvetlerin yapısal elemanlar üzerindeki etkileri, gemi tasarımı ve güvenliği açısından kritik veriler sağlamaktadır. Bu analizler, gemi mühendisliğinde daha güvenli ve dayanıklı tasarımlar geliştirmek için önemli bilgiler sunmaktadır.

Tez çalışmasında elde edilen bulgular, mevcut literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmış ve bu bulguların literatürdeki bilgilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Özellikle, deniz buzunun mekanik özellikleri ve buz-yapı etkileşimleri konusundaki önceki çalışmalarla tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, kullanılan modelleme tekniklerinin ve analiz yöntemlerinin geçerliliğini ve güvenilirliğini desteklemektedir.

Bu tez çalışması, deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkileri minimize edecek tasarım stratejileri geliştirmek için önemli bilgiler sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, deniz buzunun daha karmaşık yapısal özelliklerini ve farklı çevresel koşullar altındaki davranışlarını daha detaylı bir şekilde incelemelidir. Ayrıca, farklı gemi tipleri ve yapısal elemanlar için benzer analizlerin yapılması, buzlu sularda seyir güvenliğini artıracak önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu tez çalışması, deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki etkilerini anlamak için bir analiz sunmuş ve önemli bulgular elde etmiştir. Çalışma, deniz buzunun fiziksel ve mekanik özelliklerini doğru bir şekilde yansıtan sayısal modeller geliştirmiş ve bu modelleri kullanarak gemi yapıları üzerindeki çarpışma etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Elde edilen sonuçlar, deniz buzunun yüksek tuz içeriği nedeniyle daha düşük elastik modüle sahip olduğunu ve bu durumun buzun kırılma davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Tezde kullanılan sayısal modelleme teknikleri, gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamış ve deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmuştur. Çarpışma analizleri, gemi bordasının deniz buzu

ile etkileşimlerinde maruz kaldığı kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin yapısal elemanlar üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiş ve bu verilerin gelecekteki gemi tasarımlarında dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu tez çalışması, deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir adım atmış ve bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalar için sağlam bir temel oluşturmuştur. Elde edilen bulgular, deniz buzunun mekanik özelliklerini ve gemi yapıları üzerindeki etkilerini anlamak için önemli veriler sunmaktadır. Bu veriler, gemi mühendisliğinde daha güvenli ve dayanıklı tasarımlar geliştirmek için kullanılabilir.

Gelecekteki çalışmalar, deniz buzunun daha karmaşık yapısal özelliklerini ve farklı çevresel koşullar altındaki davranışlarını daha detaylı bir şekilde incelemelidir. Ayrıca, farklı gemi tipleri ve yapısal elemanlar için benzer analizlerin yapılması, buzlu sularda seyir güvenliğini artıracak önemli katkılar sağlayacaktır. Bu bağlamda, deniz buzunun mekanik özelliklerini ve buz-yapı etkileşimlerini daha iyi anlamak için ileri düzey sayısal simülasyon tekniklerinin ve deneysel çalışmaların bir arada kullanılması büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, deniz buzunun gemi yapıları üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir adım atmış ve bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalar için sağlam bir temel oluşturmuştur. Elde edilen bulgular, deniz buzunun mekanik özelliklerini ve gemi yapıları üzerindeki etkilerini anlamak için önemli veriler sunmaktadır. Bu veriler, gemi mühendisliğinde daha güvenli ve dayanıklı tasarımlar geliştirmek için kullanılabilir.

- Bergström, M., Browne, T., Ehlers, S., Helle, I., Herrring, H., & Khan, F. e. (2022). A comprehensive approach to scenario-based risk management for Arctic water. *Ship Technology Research*, S.1-29.
- Das, B. M. (2013). Principles of geotechnical engineering. *Cengage learning*.
- Ehler, S., & Herrring, H. (2021). *A finite element model for compressive ice loads based on a mohr-coulomb material and the node splitting technique*. Journal of offshore mechanics and arctic engineering.
- Ehlers, S., & Polach, R. v. (2013). *Model scale ice — Part B: Numerical model*. 94(2013) 53-60: Cold Regions Science and Technology.
- Eicken, H. (2003). From the microscopic, to the macroscopic, to the regional scale: Growth, microstructure and properties of sea ice. Sea Ice: An Introduction to its Physics. *Chemistry, Biology and Geology, Blackwell Science*, Oxford, 22-81.
- Gagnon, R. E. (2011). *A numerical model of ice crushing using a foam analogue*. 65(2011) 335-350: Cold Regions Science and Technology.
- Gagnon, R. E. (2012). Ice-structure interaction: The state of knowledge. *Cold Regions Science and Technology*, 76-77, 1-13.
- Herrring, H. (2023). Experimental and numerical investigation of brittle ice crushing loads. *Technischen Universität Hamburg*, PhD Thesis.
- Huang, L., & Liu, J. (2014). *Numerical simulation of ship-ice interaction using LS-DYNA*. 88, 237-247: Ocean Engineering.
- Iliescu, D., & Schulson, E. M. (2002). *The tensile strength of ice as a function of grain size*. 50(9), 2163-2174: Acta materialia.
- Ince, S. T. (2016). *A study on ice-structure interaction modelling for collision assessment of marine structures and ice-ridges*. PhD Thesis: Pusan National University.

- Kellner, L., Kubiczek, J. M., Herrnring, H., & Ehlers, S. (2018). *Simulation of ice-structure interaction with CZM-Elements*. Bamberg, Technische Universität Hamburg: 15. LS-DYNA Forum.
- Lesar, D. E. (2020). *Modeling and simulation of ice body/ship structure collision with inelastic structural eformation including rupture and tearing*. Naval Surface Warfare Center Carderock Division.
- LSTC. (2012). LS-DYNA Keyword User's Manual. *Volume II: Material Models*.
- Mellor, M. (1983). Mechanical behavior of sea ice. *Cold Regions Science and Technolgy*, 6(3), 201-223.
- Nisja, H. A. (2014). *Numerical modelling of brittle failure in ice structures*. Master's Thesis: Norwegian University of Science and Technology.
- Petrich, C., & Eicken, H. (2010). Growth, structure and properties of sea ice. *Sea Ice, 2nd edition*, Wiley-Blackwell, 23-77.
- Pralong, A., & Funk, M. (2005). Dynamic damage model of crevasse opening and application to glacier calving. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F1).
- Schulson, E. M., & Duval, P. (2009). Creep and fracture of ice. *Cambridge University Press*.
- Sloan, S. W., & Assadi, A. (1992). Nodal release finite element analysis of crack propagation. *International journal for numerical methods in engineering*, 33(3), 577-598.
- Sodhi, D. S. (2001). *Ice mechanics and risks to offshore structures*. 33(1), 309-332: Annual Review of Fluid mechanics.
- Timco, G. W., & Weeks, W. F. (2010). *A review of the engineering properties of sea ice*. 60(2), 107-129: Cold regions science and technology.
- Untersteiner, N. (1986). The geophysics of sea ice. *Springer Netherlands*.
- Weeks, W. F. (2010). On sea ice. *University of Alaska Press*.
- Weiss, J., & Schulson, E. M. (2000). The failure of ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C5), 11215-11221.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). The finite element method for solid and structural mechanics. *Elsevier*.



Ls-dyna'da Kullanılan Malzeme Grubu

*MAT_MOHR_COULOMB_TITLE

Buz malzeme

\$#	mid	ro	gmod	rnu	phi	cval	psi
	2	900.03.500000E9	0.33	0	0.526	1500000	0.0

\$#	nplanes	lccpdr	lccpt	lccjdr	lccjt	lesfac
	0	0	0	0	0	0

\$#	gmoddp	gmodgr	lcmep	lcphiep	lcpsep	lcmst	cvalgr	aniso
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

*MAT_BRITTLE_DAMAGE_TITLE

brittle damage

\$#	mid	ro	e	pr	tlimit	slimit	ftough	sreten
	4	900.08.000000E9	0.33	650000.0	700000.0	7.1	0.016	

\$#	visc	fra_rf	e_rf	ys_rf	eh_rf	fs_rf	sigy
	724000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8000000

Python Kodu

Tatlı su buzı için geliştirilen bir modelin içine hava ve tuz ceplerini (paketleri) eklemek amacıyla bir Python kodu yazılmıştır. Bu kod, buzun elemanlarını rastgele bir şekilde yeni parçalara (hava ve tuz cepleri) aktarır. İlk olarak bu parçaları oluşturur, ardından bu parçaların malzeme özelliklerini ve gerekli diğer parametreleri ekler. Son olarak, mevcut LS-DYNA keyword dosyasını açar, bu bilgileri ekler ve dosyayı tekrar kaydeder.

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sat Mar 30 16:03:35 2024

@author: nedir ymamov
"""

import random

dosya = open("iceImpact.k", "r")

# part of brine pockets
part = ['*PART\n',
        '$#                                     title\n',
        'Brine Pockets\n',
        '$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid\n',
        '      3          1          5          0          0          0          0          0\n']

mat = ['*MAT_ELASTIC_FLUID_TITLE\n',
        'brine pockets\n',
        '$#      mid      ro      e      pr      da      db      k \n',
        '      5      1020.03.070000E9      0.33      0.0      0.01.00000E10\n',
        '$#      vc      cp \n',
        '      0.11.00000E20\n']

cont = ['*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID\n',
        '$#      cid                                     title\n',
        '      3BrinePocketsPlate\n',
        '$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr\n',
        '      3          5          3          3          0          0          0          1\n',
        '$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt\n',
        '      0.03      0.0      0.0      0.0      20.0      0          0.01.00000E20\n',
        '$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf\n',
        '      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0\n',
        '$#      soft      softscl      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq\n',
        '      21.0000E-11      0          0.0      5.0      5          0          0\n']

cont02 = ['*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID\n',
```

```

'$#      cid
title\n',
      '          4BrinePockets\n',
'$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr
mpr\n',
      '          3          0          3          0          0          0          0
0\n',
'$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt
dt\n',
      '      -2.0      0.0      0.0      0.0      20.0      0
0.01.00000E20\n',
'$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf
vsf\n',
      '          0.2          1.0          0.0          0.0          1.0          1.0          1.0
1.0\n',
'$#      soft      sofsc1      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort
frcfrq\n',
      '          21.0000E-11          0          0.0          5.0          5          0
0\n']

# part of air
part02 = ['*PART\n',
'$#
title\n',
      'Air\n',
'$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid\n',
      '          6          3          7          0          0          0          0
0\n']

mat02 = ['*MAT_NULL_TITLE\n',
      'Air\n',
'$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym      pr\n',
      '          7          1.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0\n']

cont03 = ['*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID\n',
'$#      cid                                          title\n',
      '          5AirPlate\n',
'$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr\n',
      '          4          5          3          3          0          0          0          1\n',
'$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt\n',
      '          0.03      0.0      0.0      0.0      20.0      0          0.01.00000E20\n',
'$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf\n',
      '          1.0          1.0          0.0          0.0          1.0          1.0          1.0          1.0\n',
'$#      soft      sofsc1      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort      frcfrq\n',
      '          21.0000E-11          0          0.0          5.0          5          0          0\n']

cont04 = ['*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID\n',
'$#      cid
title\n',
      '          6Air\n',
'$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr
mpr\n',
      '          4          0          3          0          0          0          0
0\n',
'$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt
dt\n',

```

```

        '      -2.0      0.0      0.0      0.0      20.0      0
0.01.00000E20\n',
        '$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf
vsf\n',
        '      0.2      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0
1.0\n',
        '$#      soft      sofscl      lcidab      maxpar      sbopt      depth      bsort
frcfrq\n',
        '      21.0000E-11      0      0.0      5.0      5      0
0\n']

```

```
array = [line for line in dosya]
```

```

start_line = 95536
finish_line = 103019
num = finish_line - start_line

```

```

num_brine = 0
num_air = 0

```

```

list_id = [i for i in range(start_line, finish_line)]
empty_el = []
delete_el = []

```

```
while True:
```

```
    i = random.randint(0, num - 1)
```

```
    new_line = list(array[list_id[i]])
```

```
    if list_id[i] in empty_el:
```

```
        pass
```

```
    elif num_brine <= 0.05 * num:
```

```
        new_line[15:16] = "5"
```

```
        num_brine += 1
```

```
        array[list_id[i]] = "".join(new_line)
```

```
    elif num_air <= 0.01 * num:
```

```
        new_line[15:16] = "6"
```

```
        num_air += 1
```

```
        array[list_id[i]] = "".join(new_line)
```

```
    else:
```

```
        break
```

```
    empty_el.append(list_id[i])
```

```
for i in [part, mat, cont, cont02, part02, mat02, cont03, cont04]:
```

```
    for j in i:
```

```
        array.insert(-1, j)
```

```
dosya = open("iceImpact_v2.k", "w")
```

```
dosya.writelines(array)
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. “Simulating Sea Ice In Ls-Dyna Using Finite Element Method” 12th International Scientific Research Congress, Istanbul

