

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SU ALTI PATLAMASI ALTINDA GEMİ PANELİNİN DAVRANIŞININ SAYISAL
YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

ÖZGÜR DEMİR

**DOKTORA TEZİ
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. TAMER YILMAZ**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SU ALTI PATLAMASI ALTINDA GEMİ PANELİNİN DAVRANIŞININ SAYISAL
YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

Özgür DEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması 22.11.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Tamer YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Tamer YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mesut GÜNER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç Dr. Barış BARLAS
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç Dr. Cihan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ortaya konulmasında şahsıma yardımcı olan, ufkumun genişlemesini sağlayan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli danışman hocam Prof. Dr. Tamer YILMAZ başta olmak üzere, izleme komitesinde yer alarak değerli görüş ve önerileriyle katkıda buldukları için Doç. Dr. Barış BARLAS ve Yrd. Doç. Dr. Cihan DEMİR'e teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren, ufuk ve vizyon veren çok kıymetli hocalarım Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU ve Öğr. Gör. Dr. Aytaç ARIKOĞLU'na sonsuz şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Görev yerim olan Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi'nin değerli hoca ve araştırma görevlilerine teşekkürü bir borç bilirim.

Zor dönemlerdeki arkadaşlıkları ve desteklerinden dolayı kıymetli mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Yavuz Hakan ÖZDEMİR ve Arş. Gör. Dr. Muzaffer METİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu süreçte destek ve sabırlarını esirgemeyen sevgili eşime, annem, babam ve kardeşime minnettarlığımı, yoğun çalışma dönemlerimi bir nebze olsun keyifli hale getiren biricik kızım Zeynep Tanem' e sevgilerimi sunarım.

Kasım, 2013

Özgür DEMİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez	9
BÖLÜM 2	
PATLAYICI TİPLERİ VE PATLAMA OLAYI.....	11
2.1 Genel Tanımlar.....	11
2.2 Patlayıcıların Sınıflandırılması	13
2.2.1 Askeri Patlayıcılar ve Çeşitleri.....	15
2.2.1.1 Amonyum Nitrat	15
2.2.1.2 PETN (Penta Erythrite Tetra Nitrat)	15
2.2.1.3 RDX (Siklo Trimetilen Trinitramin)	15
2.2.1.4 TNT (Tri Nitro Tolüen)	15
2.2.1.5 Tetrit (Trinitro Fenil Metil Nitramin)	15
2.3 Savaş Gemilerinin Maruz Kalabileceği Muhtemel Dış Tehditler ve Su Altı Patlama Olayı	16
2.3.1 Uzak Alan Su Altı Patlamaları.....	23
2.3.2 Yakın Alan Su Altı Patlamaları.....	24

BÖLÜM 3

TEMEL DENKLEMLER.....	25
3.1 Genel Kabuller.....	25
3.2 Yerdeğiştirme ve Şekil Değiştirme İlişkileri.....	28
3.3 Gerinim-Yerdeğiştirme Bağintıları.....	28
3.4 Būnye Baęintıları.....	30
3.5 Kuvvet ve Moment Bileşenleri.....	33
3.6 Katmanlı Kompozit Bir Plağın Geometrik Doğrusal Olmayan Davranışı İçin Hareket Denklemleri.....	34
3.7 Katmanlı Kompozit Plak İçin Başlangıç ve Sınır Şartları.....	39

BÖLÜM 4

ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	40
4.1 Yaklaşım Fonksiyonları.....	40
4.2 Galerkin Yönteminin Uygulanması.....	41
4.3 Su Altı Patlama Basınç Fonksiyonu.....	42
4.4 Yapı-Sıvı Etkileşimi ve Taylor Plak Teorisi.....	45
4.5 Gauss İntegrasyonu ve Plak Üzerindeki Toplam Basıncın Hesaplanması.....	48
4.6 Kompozit Plakların Hasar Teorileri.....	51
4.6.1 Maksimum Gerilme Teorisi.....	51
4.6.2 Maksimum Birim Şekil Değiştirme Teorisi.....	52
4.6.3 Hoffman Teorisi.....	52
4.6.4 Hashin Teorisi.....	53
4.6.5 Tsai-Hill Teorisi.....	53
4.6.6 Tsai-Wu Teorisi.....	54

BÖLÜM 5

OPTİMİZASYON.....	55
5.1 Genetik Algoritma.....	55
5.2 Genetik Algoritma İçin Biyolojik Altyapı.....	56
5.2.1 Gen.....	56
5.2.2 Kromozom.....	57
5.2.3 Popūlasyon.....	57
5.2.4 Kodlama.....	57
5.2.5 Ebeveyn.....	57
5.2.6 ocuk.....	57
5.2.7 Uygunluk.....	57
5.3 Genetik Algoritma İşlem Adımları.....	58
5.3.1 Uygunluk Değerinin Hesaplanması.....	59
5.3.2 Genetik Algoritmanın Kodlanması.....	59
5.3.2.1 İkili (Binary) Kodlama Yöntemi.....	60
5.3.2.2 Gerçel Sayı veya Değer Kodlama Yöntemi.....	61
5.3.3 Seçim Mekanizması.....	61
5.3.3.1 Rulet arkı Seçim Mekanizması.....	61
5.3.3.2 Stokastik Őniversal Seçim Mekanizması.....	62
5.3.3.3 Sıralı (Rank) Seçim Mekanizması.....	62

5.3.3.4	Turnuva Seçim Mekanizması	63
5.3.3.5	Elitist Seçim Mekanizması	63
5.3.4	Çaprazlama Mekanizması	63
5.3.5	Mutasyon Mekanizması.....	64
5.3.6	Genetik Algoritmelerde Parametre Seçimi.....	65
5.3.6.1	Popülasyon Büyüklüğü	65
5.3.6.2	Çaprazlama Oranı.....	65
5.3.6.3	Mutasyon Oranı	65
5.4	Çok Amaçlı Genetik Algoritmalar	66
5.4.1	Optimizasyon Parametreleri.....	66
5.4.2	Amaç Fonksiyonu.....	66
5.4.3	Baskınlık ve Pareto-Optimalliği.....	67
5.5	Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-NSGA)	69
5.5.1	Hızlı ve Elitist Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (Fast and Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-NSGA-II)	71
5.5.1.1	Yoğunluk Tahmini ve Kalabalık Mesafe (Crowding Distance) Sıralaması	72
5.6	Sualtı Patlama Kaynaklı Şok Yüklerine Maruz Katmanlı Kompozit Plak İçin Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu İşlem Adımları.....	73

BÖLÜM 6

ANALİZ SONUÇLARI VE DOĞRULAMA.....	79
6.1 Kompozit Plakın Geometrik Doğrusal Olmayan Statik Analizleri	80
6.1.1 3 Katmanlı Kompozit Plakın Galerkin ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Geometrik Doğrusal Olmayan Statik Analizi.....	85
6.2 Kompozit Plakın Geometrik Doğrusal Olmayan Dinamik Analizleri	92
6.2.1 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 3 Katmanlı Kompozit Plakın Suyun Sönüm Etkisi Olmadığı Durumda Geometrik Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi	93
6.2.2 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz Plakların Suyun Sönüm Etkisi Olduğu Durumda Dinamik Analizi	97
6.2.2.1 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz Çelik Plakın Suyun Sönüm Etkisi Olduğu Durumda Dinamik Analizi.....	98
6.2.2.1.1 Suyun 0,15 m Altında 20 gr TNT Patlaması Senaryosu İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Sualtı Patlama Analizi	101
6.2.2.1.2 Suyun 0,15 m Altında 20 gr TNT Patlaması Senaryosu İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Su Altı Patlama Analizi.....	107
6.2.2.1.3 Suyun 0,15 m Altında 40 gr TNT Patlaması Senaryosu İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Su Altı Patlama Analizi.....	110

BÖLÜM 7

SU ALTI PATLAMA YÜKLERİNE MARUZ KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN BASTIRILAMAYAN SIRALAMALI GENETİK ALGORİTMA (NSGA-II) OPTİMİZASYONU	114
7.1 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz Katmanlı Kompozit Plakların Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu	114

7.1.1	Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 3 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu	116
7.1.2	Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 5 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu	121
7.1.3	Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 7 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu	124
7.1.4	Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 9 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu	129
BÖLÜM 8		
SONUÇ VE ÖNERİLER		134
KAYNAKLAR.....		137
ÖZGEÇMİŞ.....		145

SİMGE LİSTESİ

a, b	Plak boyutları
$[A_f]$	Sıvı çözüm ağı elemanlarının alan matrisi
A_1	Patlayıcı parametresi
$[C]$	Sönüm matrisi
c_w	Sesin su içerisindeki yayılma hızı
E	Elastisite modülü
E_1, E_2	1 ve 2 yönündeki elastisite modülleri
E_f, E_m	Elyaf ve matris elastisite modülleri
$F(t)$	Yapıya uygulanan kuvveti
$[G]$	Sıvı ile yapının temas noktasındaki bağ matrisi
G	Kayma modülü
G_f, G_m	Elyaf ve matris kayma modülleri
h	Plak kalınlığı
h_k	k 'nci katman kalınlığı
J_e	Virtüel iş
$[K]$	Katılık matrisi
K_1	Patlayıcı parametresi
$[M]$	Kütle matrisi
\bar{m}	Birim alan başına plak kütlesi
m, n	Terim sayısı
M_x, M_y, M_{xy}	Moment bileşenleri
N_x, N_y, N_{xy}	Kuvvet bileşenleri
P	Patlama basıncı
P_{max}	Basıncın maksimum değeri
p_i	Şok basıncı
p_s	Plak üzerine yayılan basınç
R	Patlama merkezinden hedefe olan yarıçap mesafesi
s	Emniyet katsayısı
S_{12}	1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
S_{13}	1-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
S_{23}	2-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
t	Zaman
t_{cw}	Plağın maksimum hıza ulaşması için geçen süre
t_d	Zaman gecikmesi

U, V, W	Yer değiştirme bileşenleri
u^0, v^0, w^0	Plak orta yüzeyindeki yer değiştirme bileşenleri
\bar{Q}_{ij}	Katmanlı kompozit için elastik sabitler
q_x, q_y, q_z	Yük bileşenleri
v_i	Patlama ile hareket eden su parçacığının hızı
v_s	Plakayla birlikte hareket eden su parçacığının hızı
W	Patlayıcı kütlesi
X^C, X^T	1 yönünde maksimum basma ve çekme dayanımı
Y^C, Y^T	2 yönünde maksimum basma ve çekme dayanımı
Z^C, Z^T	3 yönünde maksimum basma ve çekme dayanımı
$\{x\}$	Yerdeğiştirme
ϵ	Gerinim
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$	Gerinim bileşenleri
$\epsilon_1^C, \epsilon_1^T$	1 yönünde maksimum basma ve çekme birim uzaması
$\epsilon_2^C, \epsilon_2^T$	2 yönünde maksimum basma ve çekme birim uzaması
$\epsilon_3^C, \epsilon_3^T$	3 yönünde maksimum basma ve çekme birim uzaması
ϵ_R	Hata fonksiyonu
ν	Poisson oranı
ν_f, ν_m	Elyaf ve matris poisson oranları
γ_{12}^F	1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısı
γ_{13}^F	1-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı
γ_{23}^F	2-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı
$\psi_x, \psi_\theta, \psi_z$	Dönme terimleri
$\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$	Plak eğrilikleri
ρ	Yoğunluk
ρ_w	Su yoğunluğu
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Gerilme bileşenleri
σ_{Akma}	Akma gerilmesi
$\sigma_{çekme}$	Çekme gerilmesi
θ	Zaman sabiti
τ	Kayma gerilmesi
ϕ	Ağırlık fonksiyonu

KISALTMA LİSTESİ

CAD	Computer Aided Design
GA	Genetik Algoritma
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm
NASTRAN	NASA Structural Analyser
NSGA	Non Dominated Sorting Genetic Algorithm
PATRAN	Preprocessor of NASTRAN
PETN	Penta Erythrite Tetra Nitrat
RDX	Siklo Trimetilen Trinitramin
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
TETRİL	Trinitro Fenil Metil Nitramin
TNT	Trinitrotolüen

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Patlayıcıların sınıflandırılması..... 14
Şekil 2. 2	Bileşik halde olan patlayıcılar 14
Şekil 2. 3	Su altı patlaması şematik gösterimi 16
Şekil 2. 4	Su altı patlama prosesi [53]..... 17
Şekil 2. 5	Serbest su yüzeyinden yansıma 19
Şekil 2. 6	Serbest su yüzeyinden yansıma ve kavitasyon 19
Şekil 2. 7	Toplu kavitasyon bölgesi [53]..... 20
Şekil 2. 8	Gaz kabarcığı salınımı [52]..... 21
Şekil 2. 9	Yükselme oranına karşılık kabarcık büyüklüğü [55] 22
Şekil 3. 1	Deformasyon öncesi ve sonrası plak davranışı [59]..... 27
Şekil 3. 2	Katmanlı kompozit plak [60] 27
Şekil 4. 1	Cole yaklaşımı ile 40 gr TNT için basınç eğrisi 44
Şekil 5. 1	Genetik algoritma akış şeması 58
Şekil 5. 2	Kromozom gösterimi..... 60
Şekil 5. 3	İkili kodlama gösterimi 60
Şekil 5. 4	İkili ve Gray kodlama gösterimi..... 60
Şekil 5. 5	Değer kodlama gösterimi 61
Şekil 5. 6	Uygunluk değerlerine göre bireylerin rulet çemberine yerleşimi..... 62
Şekil 5. 7	Tek noktalı çaprazlama..... 64
Şekil 5. 8	Mutasyon işleminin uygulanması..... 64
Şekil 5. 9	Pareto-optimal cephe 68
Şekil 5. 10	Pareto-optimal genetik optimizasyon..... 69
Şekil 5. 11	Pareto cepheleri ve puan gösterimi 71
Şekil 5. 12	NSGA-II işlem adımları [99] 72
Şekil 5. 13	Kalabalık mesafe sıralaması [98] 73
Şekil 5. 14	Oluşturulan ilk birey 75
Şekil 5. 15	Amaç fonksiyonları ve uygunluk değerleri 77
Şekil 5. 16	Çaprazlama operatörü ve oluşan yeni birey 77
Şekil 5. 17	Mutasyon operatörü ve oluşan birey..... 78
Şekil 6. 1	NASTRAN yazılımı ile elde edilen serbest titreşim frekansları ve mod şekilleri 82
Şekil 6. 2	Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 1.mod şekli (sırasıyla W,U,V). 82
Şekil 6. 3	Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V) 83
Şekil 6. 4	Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 2.mod şekli (sırasıyla W,U,V). 83

Şekil 6. 5	Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V)	83
Şekil 6. 6	Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 3.mod şekli (sırasıyla W,U,V).	84
Şekil 6. 7	Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V)	84
Şekil 6. 8	Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 4.mod şekli (sırasıyla W,U,V).	84
Şekil 6. 9	Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V)	85
Şekil 6. 10	Galerkin yerdeğiştirme sonucu	86
Şekil 6. 11	Plak üzerinde gerçekleşen yerdeğiştirme grafiği	87
Şekil 6. 12	Sınır şartlarının gösterimi	87
Şekil 6. 13	Sonlu elemanlar yerdeğiştirme sonucu	88
Şekil 6. 14	Plak üzerinde gerçekleşen yerdeğiştirme grafiği	88
Şekil 6. 15	Plak yerdeğiştirme dağılımı	89
Şekil 6. 16	Tsai-Wu hasar indeksleri ve dağılımı	90
Şekil 6. 17	Tsai-Hill hasar indeksleri ve dağılımı	91
Şekil 6. 18	Sınır şartlarının gösterimi	93
Şekil 6. 19	Basınç fonksiyonlarının karşılaştırılması	94
Şekil 6. 20	Anlık basınç yükü fonksiyonu	95
Şekil 6. 21	Basıncın plak üzerinde zamana bağlı değişimi	96
Şekil 6. 22	Plak orta noktası yerdeğiştirmesinin karşılaştırılması	97
Şekil 6. 23	10 gr ve 20 gr TNT için hedef noktanın hemen altında sudaki basıncın değişimi	100
Şekil 6. 24	ALE eleman formülasyonu gösterimi	106
Şekil 6. 25	Su altı patlama LS-Dyna sonlu eleman modeli	108
Şekil 6. 26	Şok basıncının ilerlemesi	109
Şekil 6. 27	Patlama analizi çelik plak yerdeğiştirmesi	109
Şekil 6. 28	Kaba ağ ile elde edilen orta nokta kalıcı deformasyonu	109
Şekil 6. 29	İnce ağ ile elde edilen orta nokta kalıcı deformasyonu	110
Şekil 6. 30	Orta nokta kalıcı deformasyonu	111
Şekil 6. 31	Plak orta noktası basıncının karşılaştırılması	112
Şekil 7. 1	Katmanlı kompozit plak optimizasyonu	115
Şekil 7. 2	Pareto optimal çözümler	117
Şekil 7. 3	Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi	118
Şekil 7. 4	Optimizasyon sonuçlarının gösterimi	119
Şekil 7. 5	200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler	120
Şekil 7. 6	Pareto optimal çözümler	121
Şekil 7. 7	Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi	122
Şekil 7. 8	200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler	123
Şekil 7. 9	Pareto optimal çözümler	125
Şekil 7. 10	Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi	126
Şekil 7. 11	200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler	126
Şekil 7. 12	Pareto optimal çözümler	129
Şekil 7. 13	Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi	130
Şekil 7. 14	200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler	131

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1	TNT parametreleri 43
Çizelge 4. 2	Gauss-Legendre fonksiyonu için katsayıları 50
Çizelge 6. 1	Kompozit malzeme özellikleri [100, 101] 81
Çizelge 6. 2	Hasar indeksi karşılaştırmaları 92
Çizelge 6. 3	Cole yaklaşımı ve önerilen basınç fonksiyonu 94
Çizelge 6. 4	Çelik malzeme özellikleri 98
Çizelge 6. 5	Çelik plak için deneysel veriler [45] 99
Çizelge 6. 6	Su ve Hava için EOS parametreleri 103
Çizelge 6. 7	TNT EOS özellikleri 103
Çizelge 6. 8	Analiz ve deneysel sonuçların karşılaştırılması 110
Çizelge 6. 9	Deneysel ve sonlu eleman sonuçlarının kıyaslaması 111
Çizelge 7. 1	Katman sayısı 3 olan kompozit plak için optimal çözümler 119
Çizelge 7. 2	Katman sayısı 5 olan kompozit plak için optimal çözümler 124
Çizelge 7. 3	Katman sayısı 7 olan kompozit plak için optimal çözümler 128
Çizelge 7. 4	Katman sayısı 9 olan kompozit plak için optimal çözümler 133

SU ALTI PATLAMASI ALTINDA GEMİ PANELİNİN DAVRANIŞININ SAYISAL YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Özgür DEMİR

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tamer YILMAZ

Askeri amaçlı gemi inşaa sanayindeki hızlı gelişmelere paralel olarak, su altı patlama kaynaklı şok analizlerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Özellikle askeri amaçlı geliştirilen projeler gizlilik esasına dayandıkları için, yapı ile ilgili olan analiz ihtiyaçlarının milli imkanlar ile karşılanması son derece önem arz etmektedir. Bu doktora tezinde en temel gemi yapısal elemanları olan plak yapılarının su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık mukavemet analizleri gerçekleştirilmiştir. Patlama kaynaklı şok profili için yeni bir basınç fonksiyonu önerilerek, literatürde mevcut olan Cole basınç fonksiyonu ile kıyaslanmıştır.

Anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit bir plağın lineer olmayan dinamik denklemleri virtüel iş ilkesi kullanılarak elde edilmiştir. Geometrik nonlineerlik etkileri ince plaklar için von Kármán büyük yer değiştirmeler teorisi kullanılarak hesaba katılmıştır. Yer uzayı için yaklaşık bir çözüm kabul edilmiştir. Zaman uzayında lineer olmayan diferansiyel denklemleri elde etmek için Galerkin yöntemi kullanılmıştır. Bağlı ve lineer olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü için MATHEMATICA yazılımı kullanılmıştır.

Katman sayısı 3 olan kompozit plağın düzgün yayılı statik basınç yükü altındaki mukavemet ve hasar analizleri Tsai-Wu ve Tsai-Hill yaklaşımları ile Galerkin yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; bir sonlu elemanlar çözücüsü olan NASTRAN yazılımı ile kompozit plağın sonlu eleman modeli oluşturularak statik analizler gerçekleştirilmiştir. Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen plak orta noktası deformasyonları ve Tsai-Wu ile Tsai-Hill hasar indeksleri mukayese edilerek doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Sönümlü ve sönümsüz halde dikdörtgen kesitli kenarlarından ankastre mesnetli anlık basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın geometrik doğrusal olmayan dinamik

analizleri benzer şekilde Galerkin ve Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Su altı patlaması sonucu oluşan anlık basınç yükü için Cole yaklaşımına göre şok basıncının plak üzerine ilk geldiği pik değeri ve basıncın eksponansiyel azaldığı ikinci kısmı daha iyi bir şekilde ifade eden basınç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen basınç fonksiyonu MATHEMATICA ve ANSYS yazılımları kullanılarak kompozit plağa dinamik bir şekilde tatbik edilmiştir.

Suyun sönüm etkisinin incelenebilmesi ve önerilen basınç fonksiyonun doğruluğunun test edilebilmesi için MATHEMATICA yazılımı kullanılarak geliştirilen algoritma ile bir dinamik sonlu elemanlar çözücüsü olan LS-DYNA yazılımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Sönümlü durumda basınç fonksiyonu plak boyutları olan x ve y ile plağın hızı olan w' bağlıdır. Bu durumda toplamda 3 değişken mevcuttur ve ANSYS yazılımı aynı anda 3 değişkenin tarif edilmesine izin vermemektedir. Bu nedenle sönümlü analizler için ankastre mesnetli çelik plak LS-Dyna yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. 40 gr TNT tipi patlayıcının suyun 0,15 m altında patlaması senaryosu analiz edilerek çelik plak üzerine etkileyen basıncın zamana bağlı değişimleri mukayese edilmişlerdir. Çelik plak tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise literatürde çelik plağa ait deney sonuçlarının mevcut olmasıdır. Ramajeyathilagam K. vd çelik malzemeye sahip plaklar için patlama testlerini gerçekleştirmişlerdir, çelik plakların patlama analizleri LS-Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Son bölümde su altı patlama yüklerine maruz katmanlı kompozit plakların çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; çok amaçlı genetik algoritma yaklaşımlarından olan Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır. Katmanlı kompozitlerin su altı patlama yüklerine karşılık dinamik çözümlerini yapan Galerkin programına optimizasyon algoritması eklenerek optimum kütle ve hasar indeksine (Tsai-Wu teorisine göre) sahip plak yapıları ve bunların dizilim açıları belirlenmiştir. 0,15 metre suyun altında 20 gr TNT patlamasına maruz 3, 5, 7 ve 9 katmanlı kompozit plakların su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık çok amaçlı (NSGA-II) optimizasyonları gerçekleştirilmiş ve elde edilen optimum çözümler için kütle değerleri ile hasar indeksleri hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: SEY, Galerkin Yöntemi, Su Altı Patlama Analizleri, Hasar indeksleri, Çok Amaçlı Optimizasyon, Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma Optimizasyonu

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF SHIP PANEL BEHAVIOUR UNDER UNDERWATER EXPLOSION BY USING NUMERICAL METHODS

Özgür DEMİR

Department of Naval Architecture and Maritime Engineering
PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Tamer YILMAZ

In parallel with the rapid developments in the the shipbuilding industry for military purposes, the need for analysis of underwater explosion induced shock is increasing with each passing day. Especially projects that are developed for military purposes rely on the principle of confidentiality, therefore, the analysis of these structures with national resources are of utmost importance. In this thesis, strength analysis for the basic structural elements of the ship, the plate structures, are conducted for underwater explosion induced shock loads. A new function is proposed for explosion induced shock pressure profile and compared with existing Cole pressure function.

The equations of motion for the laminated composite plate subjected to blast loading are derived by the use of the virtual work principle. The geometric nonlinearity effects are taken into account using the von Karman large deflection theory of thin plates. Approximate solutions are assumed for the space domain and substituted into the equations of motion. The Galerkin Method is used to handle the nonlinear differential equations in the time domain. The solution of dependent and non-linear differential equations are conducted by using MATHEMATICA software.

The strength Tsai-Wu and Tsai-Hill failure analyses of three layered composite plate under uniform static pressure load are carried out using the Galerkin method. In addition, a finite element solver, NASTRAN software, is used for static analyzes of the composite plate. Midpoint deformation of the plate, Tsai-Wu and Tsai-Hill failure intensities are validated by comparing Galerkin and finite element methods.

Damped and undamped clamped rectangular three-layered composite plate is subjected to blast loading, the geometric non-linear dynamic analyzes are carried out using the Galerkin and the finite element method. For the underwater explosion shock blast pressure load, different than the Cole approach, a new and better function is

proposed for the first part and the exponential decreasing second part of the pressure. Proposed function has been applied dynamically to the composite plate by using MATHEMATICA and ANSYS software.

In order to examine the damping effect of the water and to test the accuracy of the proposed pressure function, a MATHEMATICA algorithm has been developed and the results are compared with dynamic finite element software LS-DYNA. In the damped case, the pressure function depends on the x and y dimensions and w' the velocity of the plate. In this case, three variables are available and ANSYS software does not permit to describe three variables at the same time. Therefore, damped analysis cantilever steel plates were analyzed using LS-Dyna software. By analyzing the explosion of 40 gr of TNT on the 0,15 m depth of water, time-dependent changes in the pressure acting on the steel plate are compared. Steel plates are preferred due to the availability of the test results in the literature, e.g., Ramajeyathilagam K et al. carried out explosion test for steel plates. The explosion analysis of the steel plates are performed by using LS-Dyna software and compared with the experimental results.

In the last section, blast loaded laminated composite plates multi objective genetic optimization is carried out. In this context, one of the most successful multi-objective genetic algorithm approaches, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, is used for optimization. By adding the optimization algorithm to the dynamic solver of underwater blast loaded laminated composite, the stacking sequences, layer orientation angles and thicknesses of each layer that gives the optimum mass and failure intensities (Tsai-Wu theory) are determined. Non-Dominated Sorting Genetic Optimization of the 3, 5, 7 and 9 layer composite plates, which are subjected to 0,15 depth of water and 20 gr TNT explosion induced shock loads, are carried out and Pareto optimal plate geometries are calculated.

Keywords: FEM, Galerkin Method, Underwater Explosion Analysis, Failure Intensities, Multi Objective Optimization, Non-Dominated Genetic Algorithm Optimization

1.1 Literatür Özeti

Ülkemiz özellikle savunma sanayinde gerçekleştirilen projeler ile teknolojik bağımsızlığını elde etmeyi hedeflemiş olsada, bu çabalar henüz istenen düzeye ulaşamamıştır. Ulusal kaynaklar ile tamamen milli olarak geliştirilen bir teknoloji veya ürün ortaya konulmuş olan projelerin sayısı oldukça azdır. Özellikle savunma sanayi gibi gizliliğin ve bilginin kritik önem taşıdığı bir alanda dışa bağımlı olmak son derece sakıncalı bir durum oluşturmaktadır. İnsan gücü yerine teknolojik ekipman ve yöntemlerin, kullanıldığı günümüz harp stratejilerinde, milli bir savunma sanayine sahip olmak son derece önemlidir. Bir ürün veya teknoloji başka bir ülkeden alınabiliyor olsa dahi, mutlaka milli imkanlar ile geliştirilmelidir.

Son yıllarda ülkemiz savunma amaçlı gemi inşaa sanayisindeki gelişmeler dikkate alındığında, savaş gemilerinin su altı patlama analizlerinin milli imkanlar ile gerçekleştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bir savaş gemisinin amacına en iyi şekilde hizmet edebilmesi için yapının emniyetli, ergonomik ve ekonomik olması gerekmektedir. Günümüzde ekonomik ve güvenilir tasarım yapabilmek için analitik, nümerik ve deneysel yöntemleri kullanmak kaçınılmaz hale gelmiştir. Ancak su altı patlama araştırmalarının deneysel olarak irdelenmesi gerek maliyet ve gerekse taşıdığı çevresel riskler nedeniyle son derece zordur. Bu doğrultuda savaş gemilerinin su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık mukavemet analizlerinin analitik ve nümerik yöntemler ile incelenmesi ve bu yük senaryoları dikkate alınarak optimum bir tasarım gerçekleştirilmesi, üzerinde çalışılması gereken önemli bir problemdir. Kompozit

malzemeler gemi inşaa sanayinde ilk olarak İkinci Dünya Savaşı sırasında Amerikan donanmasında personel botlarının inşaa ile kullanılmıştır. Kompozit botlar dayanıklı olmaları, tamiratlarının kolay olması vb. nedenler ile kendilerine birçok uygulama alanı bulmuşlardır [2]. Bu çalışmada, bir gemi yapısının en küçük yapısal bileşeni olan plak yapılarının su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık hasar analizleri irdelenmiş ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Sandviç yapıdaki kompozit plaklar üzerindeki çalışmalar Reissner [3] ile Libove ve Batdorf [4] tarafından ilk olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda küçük (lineer) yer değiştirmeli izotropik plak ve kabuk yapılar için diferansiyel denklemler ortaya konulmuştur.

Kompozit malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen gemi inşasında, destek elemanlar arasında kalan sac levhaların eğrilikleri az olduğu ve plak kısa kenarının plak kalınlığına oranı (a/h) küçük olduğu için dikdörtgen ince levha olarak incelemek mümkündür [5, 6]. Kompozit ince plaklar Klasik Laminasyon Teorisi'ne (KLT) göre incelenirler. Plak kalınlığı ve buna bağlı olarak a/h oranı arttıkça Yüksek Mertebeden Kayma Deformasyon Teorisi (YMKDT)'ni kullanmak uygun olmaktadır.

1963 yılında Lekhnitski, kompozit ince plaklardaki kayma gerilme etkilerini ihmal eden klasik laminasyon teorisini kullanmıştır [7]. Reissner [8] da ince plakların çözümü için kullanılan klasik laminasyon teorisine kayma şekil değişimi etkisini eklemiştir.

Lo vd. [9] ve kalın homojen izotropik ve bunun yanı sıra tabakalı kompozit plaklar için yüksek mertebe teorisini geliştirmişlerdir. Temiz ve Özel [10] tabakalı kompozit plaklarda sonlu eleman yöntemiyle elastik gerilme analizi gerçekleştirmişlerdir. 1981 yılında Murthy plak kalınlığı doğrultusundaki normal gerilmeleri ihmal ederek teoriyi daha basit bir hale getirmiştir [11]. Bu çalışmaların ardından Reddy [12] da plağın üst ve alt yüzeyinde kalınlık doğrultularında kayma gerilmesinin olmadığı yüksek mertebe teorisini geliştirmiştir.

Kompozit plakların titreşim, burulma ile gerilmelerinin bulunması amacıyla birçok farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Whitney, kenarlarından ankastre mesnetli katmanlı kompozit bir plağın eğilme, burulma ve titreşimlerini Fourier serileri yardımıyla incelemiştir [13]. Burton ve Noor [14] de dikdörtgen kare sandviç plakların serbest

titreşimlerini incelemiştir. Honeycomb malzemeye sahip olan plak yapısı kenarlarından basit mesnetlidir. Plak yapısı sonlu elemanlar ve yüksek mertebeli sandviç teorisi ile analiz edilerek titreşim modları mukayese edilmiştir. Mohan ve Kingsburry [15] de kare kesitli ince kompozit plağın doğal frekans analizini gerçekleştirmişlerdir. Hareket denklemlerinin elde edilmesinde Galerkin Yöntemi'nden yararlanmışlardır. 3 farklı sınır şartı için: tüm kenarlar ankastre, iki kenar ankastre diğer ikisi serbest, bir kenar ankastre diğerleri serbest durumları için doğal frekans değerleri ve mod şekilleri incelenmiştir. Cheung ve Zhou [16] da çizgi mesnetli ortotropik plağın serbest titreşim analizini Rayleigh-Ritz metoduyla gerçekleştirmişlerdir. Değişik malzeme özellikleri ve çizgi mesnet lokasyonu için doğal frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir.

Leissa [17] de dikdörtgen geometriye sahip ince plakların serbest titreşim analizlerini gerçekleştirmiştir. Kenarlarından ankastre mesnetli olan plak değişik sınır şartları için irdelenmiştir. Buna göre karşılıklı iki kenarı basit mesnetli olan durumda Levy yöntemi, diğer durumlarda ise Ritz yöntemi kullanılarak doğal frekanslar hesaplanmıştır.

Leissa ve McGee [18] de bir kenarı ankastre diğer kenarları serbest kalın plak için Ritz yöntemi ile serbest titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca Vinson ve Chou [19] da katmanlı kompozit plağın hareket denklemini Hamilton yöntemi ile elde ederek, klasik plak teorisi ve birinci mertebeli kayma deformasyon teorisine göre kompozit plakların doğal frekans değerlerini belirlemişlerdir.

Chen ve Lui [20] da katmanlı kompozit plakların statik çökme ve doğal frekans değerlerini Levy tipi seri çözümüyle gerçekleştirmişlerdir. Analizler sırasında Mindlin kalın plak teorisi kullanılmıştır. Değişik kalınlık/boy oranı, elyaf açısı, katmanların dizilim sırası için hesaplamalar yapılmıştır.

Xiang ve Reddy [21] de karşılıklı iki kenarı ankastre diğer kenarları ise serbest, ankastre şeklinde değişen dikdörtgen geometriye sahip plakların titreşim analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Plak basit mesnetli kenarlarına dik olacak şekilde menteşelenmiştir ve plağın hareket denklemlerine Levy çözümü uygulanarak doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde plakların titreşimleri hakkında birçok çalışma literatürde mevcuttur [22-26].

Reddy [27] değişik yükleme Şartları için katmanlı kompozit plakların Newmark yöntemi ile dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Klasik plak teorisi ve kayma deformasyon teorisinin birlikte kullanıldığı bu çalışmada plak üzerinde oluşan en büyük deplasmanlar ve gerilmeler hesaplanmıştır. Ayrıca Reddy [28] de katmanlı kompozit plakların doğrusal olmayan dinamik analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir. Değişik sınır Şartı ve yükleme durumları için deplasman ve gerilmeler bulunarak mukayese edilmiştir. Khdeir ve Reddy [29] basit mesnetli katmanlı kompozit plağa sinüzoidal ve basamak Şeklinde yükler uygulayarak dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir.

Sandviç kompozit plakların geometrik doğrusal olmayan analizleri alanında birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [30, 31]. Putcha ve Reddy [32] katmanlı kompozit plakların doğrusal olmayan dinamik davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Basit mesnetli plak için a/h oranına göre kritik burkulma yükü bulunmuştur. Ferreira vd. [33, 34] geometrik ve malzeme doğrusal olmayan plaklar üzerinde sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir.

Literatürde anlık basınç yüklemesine maruz plaklar daha ziyade anlık yüksek hava basıncına (air blast) maruzdurlar. Su altı patlaması ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Dolayısıyla yol göstermesi açısından öncelikle, anlık hava basıncına maruz plaklar incelenmiştir. Hause ve Librescu [35] patlama yüklerine maruz sandviç plakların dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Anlık basınç yüküne maruz plak Galerkin yöntemi kullanılarak irdelenmiştir. Benzer Şekilde bir diğer çalışmalarında Hause ve Librescu [36] anlık basınç yüküne maruz çift eğimli anizotropik sandviç panellerin dinamik cevabını araştırmışlardır. Sriram vd. [37] anlık basınç yüküne maruz alüminyum köpük sandviç kompozit yapıların dinamik davranışını bir sonlu elemanlar çözücüsü olan LS-DYNA yazılımı ile incelemişlerdir.

Türkmen ve Mecitoğlu [38, 39] çalışmalarında, anlık basınç yüküne (air blast) maruz takviyeli kompozit plağın dinamik davranışını incelemişlerdir. Geometrik doğrusal olmayan plak modeli hareket denkleminin yaklaşık çözümü için Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır. Sayısal zmler Newmark yöntemi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel veriler ile mukayese edilmiştir.

Kazancı ve Mecitoğlu [40] anlık basınç yüküne maruz, yapısal sönüm etkileri içeren ankastre mesnetli katmanlı plağın lineer olmayan dinamik davranışını incelemişlerdir. Geometrik doğrusal olmayan ince plak modeli için, von Karman büyük yerdeğiştirme teorisi kullanılmıştır. Zaman boyutundaki lineer olmayan diferansiyel denklemler Galerkin Metodu kullanılarak elde edilmiştir. Yapısal sönüm etkisi içeren bu nonlinear diferansiyel denklemler sonlu farklar metodu yardımı ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Su altı patlaması sonucunda, gemi yapısına gelecek dinamik etkilerin bilinmesi son derece önemlidir. Şok yüklerinin belirlenmesinde analitik, sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Ancak su altı patlama probleminin çözümü için analitik çözümler geliştirmek son derece zordur. Çünkü; su altı patlamasına maruz kalan bir yapının dinamik davranışının incelenmesi, yalnızca patlama prosesini değil aynı zamanda şok dalgasının yayılımı, lokal ve gövde kavitasyonu ile yapı-sıvı etkileşimi (FSI) ve yapının dinamik davranışını da içine alan bir kaos problemidir.

Günümüze kadar kullanılan ve tam ölçekli deneylerden elde edilen veriler baz alınarak oluşturulmuş birçok yaklaşım söz konusudur. Bununla birlikte, malzemenin nonlinear davranışı ve şok yükünün karakteristiğini belirleyen denklemlerin çıkarılması son derece zordur. Özellikle su altı patlama alanında, deneysel çalışmalarda karşılaşılan zorluk ve engeller ile gizlilik gibi nedenler bu konudaki çalışma sayısının artmasını engellemiştir. Tüm bu nedenlerden dolayı, su altı patlama yüklerine karşılık yapı davranışlarının incelenebilmesi için sayısal ve nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Nümerik yöntemlerle elde edilen verilerin doğruluğu ise küçük ölçekli model deneyleri ile karşılaştırılmaya çalışılmaktadır.

Su altı, hava ve gaz patlamaları ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Rajendran ve Lee [41] araştırma çalışmalarında, hava ve su altı patlamalarına ait prosesler hakkında detaylı bilgiler vermişlerdir. Patlama neticesinde oluşacak şok basıncı ve yapıya etkisini hava ve su altı patlamaları için ayrı ayrı incelemişlerdir.

Pan ve Louca [42] de gaz patlamasına maruz plaklar üzerindeki dinamik davranışı nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Hidrokarbon patlamasına maruz kalan profiller ile desteklenmiş plak yapısı üzerinde yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarla

sınır şartlarının etkisi incelenmiştir. Nümerik simülasyonlar DYNA3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Veldman vd. [43] de patlama yüküne maruz kalan plaklar üzerindeki dinamik davranışı nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Kare alüminyum levhalar üzerine uçakların kabin iç basıncını temsil edecek şekilde statik ön basınç yükü tatbik edilmiştir. Ön yükleme basıncı 0-62,1 kPa aralığında alınarak hava aracı kabin yapısının gerçek çalışma durumu simule edilmeye çalışılmıştır. Nümerik simülasyonlar ANSYS/DYNA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç değişimi deneysel çalışmalar yardımıyla oluşturulmuş zamana bağlı olarak azalan fonksiyon şeklinde tatbik edilmiş ve nonlinear dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Elastik birim şekil değiştirme değerleri iki farklı patlayıcı miktarı için toplam 18 farklı senaryo halinde nümerik ve deneysel olarak elde edilmiştir. Ön yükleme basıncının 0-62,1 kPa aralığında değişmesi durumunda plastik deformasyonlar gözlenmiştir. Plastik deformasyonların başladığı durumda ise dört ayrı patlayıcı miktarı için 24 farklı durum irdelenmiştir. Sonuç olarak; nümerik ve deneysel sonuçlar mukayese edilmiştir. Deneysel ve nümerik simülasyonlar ile hesaplanan orta nokta yer değiştirme değerleri arasında maksimum % 5 farklılık gözlenmiştir.

Jen ve Tai [44] de farklı boyutlarda profillerle desteklenmiş olan panel yapılarında patlama kaynaklı şok yükleri sonucu oluşan dinamik tepki lineer olmayan sonlu elemanlar kodu olan ABAQUS yardımıyla incelenmiştir. Nümerik sonuçlar; Ramajeyathilagam vd. tarafından [45] de verilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Plak çalışmalarının yanı sıra su altı patlamaları global gemi yapısı üzerinde deneysel ve nümerik olarak incelenebilmiştir.

Shin [46] da, üç boyutlu gemi modelinin su altı patlama simülasyonunu LS-Dyna USA kodu yardımı ile gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçları gemi şok testi verileriyle karşılaştırmıştır. Gemi yapısı sonlu elemanlar modeli oluşturularak uzak-alan patlaması 3 boyutlu (3D) nümerik simülasyonu LS-DYNA/USA kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, deneysel veriler ile nümerik simülasyon sonuçlarının uygunluğu ortaya konulmuştur. Su altı patlama analizleri serbest su yüzeyi etkisinden dolayı son derece karmaşık ve modellenmesi zor bir olaydır. Serbest su yüzeyinden yansıyan ve lokal kaviteye neden olan basınç dalgasının yanı sıra; gövde kaviteye, gaz baloncuk etkisi ve gaz dinamiği ile kompleks yapı-sıvı etkileşimi, su altı

patlamalarını anlaşılması zor bir hale getirmektedir. LS-DYNA yazılımı kullanılarak tüm bu etkiler analiz modeline tatbik edilmiştir.

Liang ve Tai [47] de su altı patlamasına maruz kalan 2000 Ton 90 m boyunda, 13,2 m genişliğinde ve 3,8 m draftta sahip savaş gemisinin zamana bağlı nümerik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapı sıvı etkileşimli sonlu elemanlar modeli ile geometrik ve malzeme nonlineer dinamik analizleri irdelenmiştir. Sonuç olarak gövde üzerindeki zamana bağlı şok yükü, ivme, hız ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

Qiankun ve Gangyi [48] de temas olmayan su altı patlamasına maruz gemi bloğu dinamik tepkilerini nümerik ve deneysel olarak incelenmişlerdir. Nümerik simülasyonlar ABAQUS yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. İvme ve hız cevapları deneysel ve nümerik olarak kıyaslanmış ve elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, hız cevaplarındaki kütle oransal sönüm faktörü nümerik olarak incelenmiştir. Quinkan ve Gangyi [48] tarafından yapılan bu çalışmada, deneysel ve nümerik analizler 9-12 m derinliğe sahip deniz ortamında gerçekleştirilmiştir. 6 kg TNT gemi kesitinden 2,5 m. derinliğe ve toplam uzaklığı 15,12 m olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu uzaklığın seçilmesi ile gövde şok faktörü $KSF=0,68 \text{ kg}^{1/2} \text{ m}^{-1}$ olarak ele alınmıştır. Analiz edilen gemi kesitinin uzunluğu 2,5 m, genişliği ve yüksekliği 1,2 m, draftı 0,6 m ve deplasmanı 1310 kg'dır. Simülasyonlar sırasında, patlama sonucu oluşan şok basıncı Zamyshlyayev ve Yakovlev [49] da ortaya koyduğu yaklaşım kullanılarak belli bir noktadan zamana bağlı basınç eğrisi tarifi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, temas olmayan su altı patlamasına maruz kalan gemi bloğu yapısı dinamik davranışı nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; nümerik analizler sırasında seçilen sıvı hacmin sonlu eleman boyutu ile ıslak yüzeylerdeki sıvı kalınlığı nümerik sonuçlardaki tutarlılığı etkileyen en önemli parametrelerdendir. Ayrıca; simülasyon ve deneylerle elde edilen ivme cevapları birbirleri ile uyumludur. Alfa Sönümünün düşük frekanslardaki ivme ve hız cevaplarını sönümlediği gözlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Ülkemiz etrafı denizlerle çevrili olması ve Asya'yı Avrupa'ya bağlayan konumu itibari ile farklı kültürler, medeniyetler ve dinler açısından tarih boyunca önemli bir merkez

olmuştur. Benzersiz bir coğrafi konuma sahip olması paralelinde çeşitli risk ve zorlukları da getirmektedir. Özellikle etrafında yaşanan siyasi ve askeri gelişmelerle birlikte ülkemizin jeopolitik önemi her geçen gün biraz daha artmaktadır. Bu nedenle; gelişmiş, modern ve güçlü bir donanmaya sahip olmak, ülkemiz adına bir zorunluluktur. Etrafı denizler ile çevrili olan bir ülke için, imkan ve yetenekleri yüksek modern bir deniz kuvveti o ülkenin savunması ve güvenliği açısından olduğu kadar dış politikası ve uluslararası ilişkilerine de yön veren önemli bir kuvvetidir.

İnsanoğlu tarih boyunca gerek ticaret ve gerekse seyahat nedeniyle sürekli olarak deniz yolunu kullanmıştır ve kullanmaya devam etmektedir. Bu nedenle topraklarını çevreleyen denizleri aktif ve verimli bir şekilde kullanan ülkeler sürekli olarak gelişmişlerdir.

Su altı mayınları ve torpidolar, saldırı veya savunma amaçlı kullanılan ucuz ve etkili yöntemlerdendir. Bu sebeple; deniz kuvvetleri ve ticari gemiler için daima bir tehdit unsuru olmuşlardır. Bir savaş gemisinin tasarımından yüzdürülmesine kadar olan süreçte yapılan mühendislik faaliyetleri içerisinde, gemi yapısının su altı patlamalarına karşı dinamik davranışının bilinmesi son derece önem taşımaktadır. Seçilecek olan gemi yapı malzemesinden kullanılacak savaş sistemlerine kadar bir çok elektronik ve mekanik ekipman için patlama kaynaklı şok yükleri hesaplanarak dinamik analizler yapılmalı ve imkanlar paralelinde deneysel çalışmalarla da kıyaslanmalıdır. Ancak böyle bir senaryonun deneysel olarak test edilmesi işlemi son derece pahalı ve zordur. Bu nedenle literatürde mevcut olan çalışmalar genellikle nümerik simülasyon ve analitik çözümler üzerinde yoğunlaşmışlardır.

Savaş gemilerinin mukavemet hesapları, değişik yüklemeler ve sınır şartlarına bağlı olarak dizayn aşamasında yapılmalıdır. Ayrıca yapı üzerinde kullanılacak savaş sistemleri, her türlü elektronik ekipman ile donanımlar yapılan hesaplamalara uygun olarak seçilmelidir. Bilgisayar teknolojisi ve kullanılan analitik ile nümerik yöntemlerinin gelişmesi savaş gemilerinin şok analizlerinin daha hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılmasını mümkün kılmaktadır.

Son yıllarda ülkemizde her alanda olduğu gibi savaş gemisi tasarım ve imalatı alanında da ciddi yatırımlar söz konusudur. Bu doğrultuda imal edilmesi düşünülen gemilerin su altı patlama analizlerinin yapılması bir zorunluluktur. Bu analizlerin yurtdışına

yaptırılması ise gizlilik açısından çeşitli sıkıntılar doğurabilmektedir. Ülkemizde ilk olacak tez çalışması ile deniz kuvvetlerimizin ihtiyacı olan su altı patlama analizleri nümerik ve analitik olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, anlık basınç yükü altında katmanlı kompozit bir plağın nonlinear dinamik davranışı irdelenerek, su altı patlama kaynaklı şok yüklerine dayanacak optimum plak yapısının bulunması hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Askeri amaçlarla gerçekleştirilen gemi inşaatında, su altı patlama kaynaklı şok analizlerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu doktora tezinde en temel gemi yapısal elemanları olan plak yapılarının su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık mukavemet analizleri gerçekleştirilmiştir. Patlama kaynaklı şok profili için literatürde mevcut olmayan, yeni bir basınç fonksiyonu önerilerek, Cole basınç fonksiyonu ile kıyaslanmıştır.

Anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit bir plağın lineer olmayan dinamik denklemleri virtüel iş ilkesi kullanılarak çıkarılarak, geometrik nonlinearlik etkileri ince plaklar için von Kármán büyük yer değiştirmeler teorisi kullanılarak hesaba katılmıştır. Zaman uzayında lineer olmayan diferansiyel denklemleri elde etmek için Galerkin yöntemi kullanılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada; 3 katmanlı kompozit plağın düzgün yayılı statik basınç yükü altındaki mukavemet ve hasar analizleri Tsai-Wu ve Tsai-Hill yaklaşımları ile Galerkin yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen plak orta noktası deformasyonları ve Tsai-Wu ile Tsai-Hill hasar indeksleri mukayese edilerek doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Literatürde su altı patlamasına maruz plaklar üzerinde yapılan analitik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma ile sönümlü ve sönümsüz halde dikdörtgen kesitli kenarlarından ankastre mesnetli anlık basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın geometrik doğrusal olmayan dinamik analizleri benzer şekilde Galerkin ve Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Su altı patlaması sonucu oluşan anlık basınç yükü için Cole yaklaşımına göre şok basıncının plak üzerine ilk geldiği pik

değeri ve basıncın eksponansiyel azaldığı ikinci kısmı daha iyi bir şekilde ifade eden basınç fonksiyonu önerilmiştir.

Suyun sönüm etkisinin incelenebilmesi ve önerilen basınç fonksiyonun doğruluğunun test edilebilmesi için geliştirilen algoritma ile bir dinamik sonlu elemanlar çözücüsü olan LS-DYNA yazılımı sonuçları karşılaştırılmıştır. 40 gr TNT tipi patlayıcının suyun 0,15 m altında patlaması senaryosu analiz edilerek çelik plak üzerine etkiyen basıncın zamana bağlı değişimleri mukayese edilmiştir. Çelik plak tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise literatürde çelik plağa ait deney sonuçlarının mevcut olmasıdır. Ramajeyathilagam vd çelik malzemeye sahip plaklar için patlama testlerini gerçekleştirmişlerdir, çelik plakların patlama analizleri LS-Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Ayrıca tez çalışması ile literatürde olmayan su altı patlama yüklerine maruz katmanlı kompozit plakların çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; çok amaçlı genetik algoritma yaklaşımlarından olan Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır. Katmanlı kompozitlerin su altı patlama yüklerine karşılık dinamik çözümlerini yapan Galerkin programına optimizasyon algoritması eklenerek optimum kütle ve hasar indeksine (Tsai-Wu teorisine göre) sahip plak yapıları ve bunların dizilim açıları belirlenmiştir.

PATLAYICI TİPLERİ VE PATLAMA OLAYI

Hızlı ve ani bir reaksiyon sonucu ısı, gürültü, darbe ve gaz açığa çıkaran katı, sıvı ve gaz halindeki kimyasal maddelere patlayıcı denir. Patlayıcı maddeler, kararsız haldeki kimyasal maddeler olup, ısı, darbe veya kıvılcım gibi bir etkiye maruz kalmaları durumunda hızlı kimyasal reaksiyonlar geçirerek kararlı yapıya sahip bileşiklere dönüşürler. Kimyasal reaksiyon sırasında yüksek oranda ısı, ses, darbe etkisi ve gaz açığa çıkarılırlar. Bu bölümde patlayıcı madde tanımı yapılarak, patlayıcı tip ve çeşitleri anlatılmıştır. Su altı patlama tanımı yapılarak, uzak alan ve yakın alan patlamaları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca; su altı patlaması adımları sırasıyla anlatılmıştır.

2.1 Genel Tanımlar

Hızlı ve ani bir reaksiyon sonucu ısı, gürültü, darbe ve gaz açığa çıkaran katı, sıvı ve gaz yapıdaki kimyasal maddelere patlayıcı denir. Patlayıcı maddeler, dışarıdan bir etkiye maruz kalmaları durumunda birbirini takip eden hızlı kimyasal reaksiyonlar geçirerek kararlı yapıya sahip bileşiklere dönüşürler. Kimyasal reaksiyon sırasında yüksek oranda ısı, ses, darbe etkisi ve gaz açığa çıkarılırlar. Patlayıcılar kullanım alanları ve amaçlarına göre, askeri amaçlar için kullanılan patlayıcılar, ateşlemeye yarayan patlayıcılar ve yanma sonucu ortaya çıkardıkları enerji ile yakıt olarak kullanılan patlayıcılar olmak üzere 3 ana grup altında incelenebilirler.

İdeal patlayıcılar az bir enerji ile uyarılabilmeli ve kolayca reaksiyona girebilmelidirler. Patlayıcıların çoğu bir şok tesirine, darbeye veya bir kıvılcıma maruz kalmadıkları takdirde patlamazlar. Ancak; yine de tüm patlayıcılar insanlar için tehlikelidirler.

Kara barut Çinliler tarafından bulunan ve 13. yy'den itibaren Avrupa'da kullanılan ilk patlayıcı çeşididir. 1833 yılına gelindiğinde Fransız bilim adamı Henri Braconnot tarafından yanıcı madde olan esterin bulunması ile modern patlayıcılar kullanılmaya başlamıştır. Alman kimyageri Christian F. Schönbein 1846'da kara baruttan iki kat daha etkili olan nitro selülozu elde ederek önemli bir buluş gerçekleştirmiştir [50].

1846 yılında İtalyan kimyager Ascanio Sobrero trinitro gliserini sentezlemiştir. Trinitro gliserinle toprağı karıştırarak silindir biçimine sokan ve dinamiti bulan ise Alfred B.NOBEL olmuştur [50, 51].

Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan patlayıcı madde olan TNT (trinitrotoluen) 1863 yılında Alman kimyageri J.Wilbrand tarafından bulunmuştur. Bir diğer tahrip gücü yüksek olan patlayıcı madde ise RDX'tir. RDX (siklotrimetilen trinitramin- $C_3H_6N_6O_6$) 1890'larda ilaç olarak kullanılmıştır. Ancak; patlayıcı etkisi 1920'li yıllara kadar fark edilmemiştir. PENT (Pentaeritrol tetranitrat- $C_5H_8N_4O_{12}$) ise 1920 yılından beri bilinmektedir. En genel halde patlayıcılar tahrip edici patlayıcılar, askeri patlayıcılar, ateşlemeye yarayan patlayıcılar ve fırlatıcı yakıt halinde olan patlayıcılar olarak sınıflandırılır [50].

Tahrip edici ve yıkıcı patlayıcılar: İnşaat işlerinde, baraj ve tünel yapımında veya maden ocaklarında kullanılırlar. Tahrip edici ve yıkıcı patlayıcıların en iyilerinden olan dinamitler, Nitrogliserin (NG), Amonyum nitrat (AN) ve Sodyum Nitrat ile talaşın karıştırılması sonucu elde edilirler. İstenilen güce göre kullanılan malzemelerin miktarları da değiştirilebilir. Dinamitler, güçlü oldukları için inşaat işlerinde ve tünel ile baraj yapımında kullanılırlar. Amonyum nitrat ve sodyum klorür ile sodyum karbonat içeren dinamitler gaz sıkışmasına neden olmadıkları için kömür ocaklarında sıkça kullanılırlar.

Askeri patlayıcılar: Askeri amaçlarla kullanılan tahrip gücü yüksek patlayıcılardır. Yüksek sıcaklıkta durmaya ve herhangi bir darbeye vs. karşı dayanıklı olmaları askeri patlayıcıların en önemli özellikleridir.

Fırlatıcı yakıt patlayıcıları: Bu tipteki patlayıcılar fırlatılması planlanan roketlerde veya mermilerin içerisinde kullanılırlar. Fırlatıcı yakıt olarak kullanılan patlayıcılar infilak

etmezler, girdikleri kimyasal reaksiyon sonucu yüksek miktarda gaz üretirler. Üretilen gaz sayesinde ise fırlatma işlemi gerçekleştirilir.

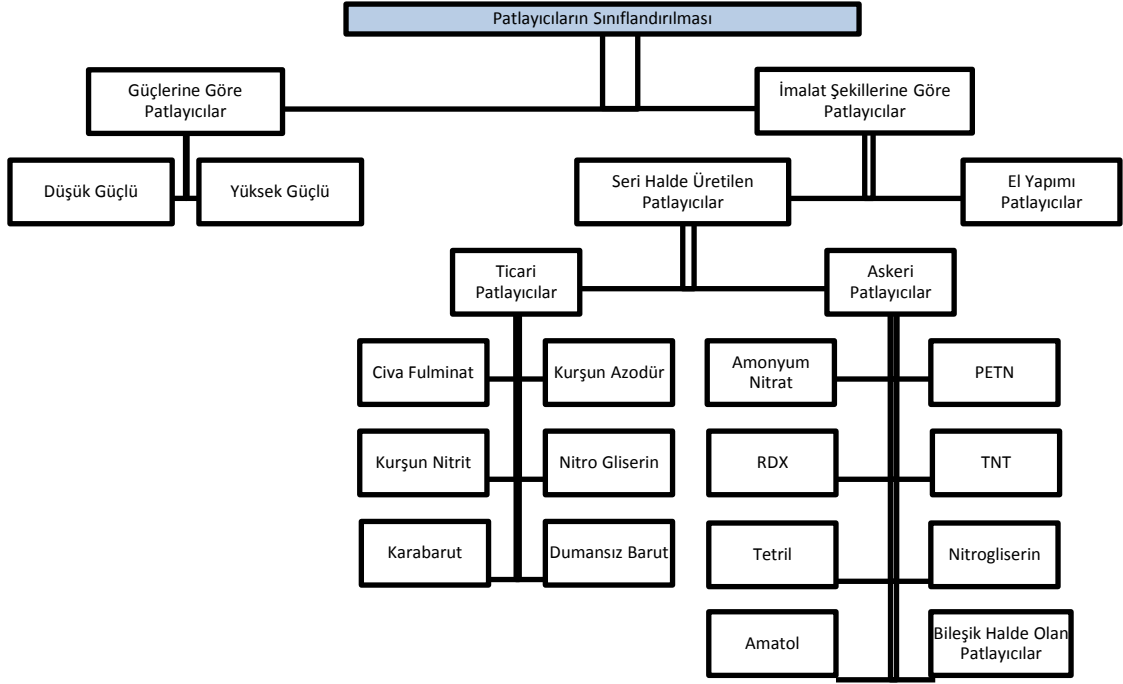
İnfilak (Detonasyon): Hızlı ve ani bir kimyasal reaksiyon olan patlama başlangıcına infilak veya başka bir ifade ile yüksek enerjili bir kimyasal bileşiğin patlaması olayına ve patladıktan sonra, çevreye şok dalgaları yayması işlemine infilak veya detonasyon denir. İnfilak işlemi sırasındaki kimyasal olaylar, yanma olayı ile benzerlik göstermektedir. Yanma olayında kıvılcım çok yavaş hareket eder fakat; detonasyon sonucu oluşan şok dalgaları son derece hızlı hareket ederler.

Detonasyon dalgasının önü pozitif basınç, arkası ise negatif basınç bölgesidir. Patlamadan sonra bölgede önce artı basınç nedeniyle hava itilmesi, sonrada eksi basınç nedeniyle hava emilmesi olur. Bu yüzden patlama sonucunda karmaşık bir kavitasyon alanı da bölgede oluşur.

Ateşleyiciler (Detonatörler): Detonatörler, patlayıcıları ateşlemek amacıyla kullanılırlar. Detonatör olarak genellikle kurşun asit kullanılmaktadır. Cıva fulminat da detonatör olarak kullanılır. Detonatörler kapsüllere yerleştirilen kurşun asitle yapılır. Kurşun asit ateşlenince bu bölgede bulunan düşük miktardaki PENT, RDX veya tetril ise asıl patlayıcıyı ateşler.

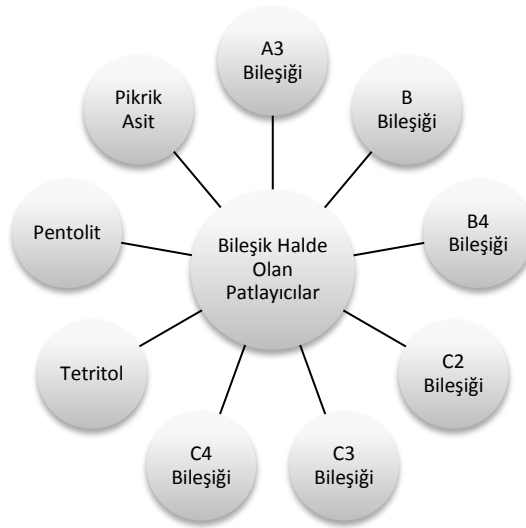
2.2 Patlayıcıların Sınıflandırılması

Patlayıcıları güçlerine göre iki ana başlık altında incelemek mümkündür. Bunlar düşük güçteki patlayıcılar ile yüksek güçteki patlayıcılar olarak sıralanabilirler. Askeri amaçlarla kullanılan patlayıcılar yüksek güçteki patlayıcılar olarak sıralanabilirler. Patlayıcılar hakkında yapılan bir diğer sınıflandırma ise imalat şekillerine göre yapılanıdır. İmalat şekillerine göre patlayıcılar seri üretim patlayıcılar ile el yapımı patlayıcılar olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilirler. Patlayıcıların sınıflandırılması Şekil 2. 1'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 1 Patlayıcıların sınıflandırılması

Bileşik halde olan patlayıcıları ise ayrıca gruptandırmak mümkündür. Bileşik halde olan patlayıcılar genel olarak 9 çeşittir (Şekil 2. 2).



Şekil 2. 2 Bileşik halde olan patlayıcılar

2.2.1 Askeri Patlayıcılar ve Çeşitleri

2.2.1.1 Amonyum Nitrat

Askeri patlayıcılar içinde duyarlılığı en az olan patlayıcı olması sebebiyle daha duyarlı patlayıcı maddelerle birleştirilerek kullanılırlar. Neme karşı dayanıksız olduğu için su altında kullanıma uygun değildir.

2.2.1.2 PETN (Penta Erythrite Tetra Nitrat)

Askeri patlayıcılar içinde en güçlü olanlarındandır. Kuvvet bakımından nitrogliserin ve RDX ile kıyaslanabilir ve TNT veya nitroselüloz ile birleşik olarak kullanılmaya uygundur. PETN sudan ve nemden etkilenmediği için su altında kullanıma uygundur.

2.2.1.3 RDX (Siklo Trimetilen Trinitramin)

Askeri patlayıcılar içinde en hassas ve güçlü olanlarındandır. Tek başına kullanılmaya müsaittir. RDX esas olarak A,B,C tipi patlayıcı madde bileşiklerinin bileşimlerinde de bulunmaktadır. PETN ile aynı güce sahip olmasına rağmen suda çözünmektedir ve bu nedenle su altında kullanıma pek uygun değildir.

2.2.1.4 TNT (Tri Nitro Tolüen)

Askeri amaçlarla kullanılan ve en çok bilinen patlayıcı madde tipidir. Kendi başına veya patlayıcı madde bileşiklerinde kullanılmaktadır. Yüksek tahrip gücüne ve enerjiye sahiptir. Tahrip kalıpları ile birlikte her türlü çalışma ortamında kullanılmaya müsait haldedir. Bu nedenle su altında kullanılabilir.

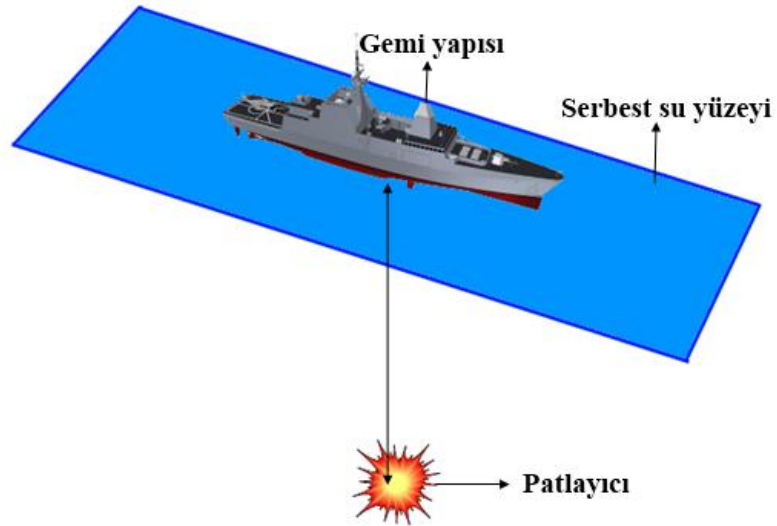
2.2.1.5 Tetril (Trinitro Fenil Metil Nitramin)

Askeri patlayıcılar içinde en çok kullanılanlardandır. Yüksek patlama gücüne sahiptirler. TNT ve pikrik asitten daha güçlü olmasına rağmen, RDX ve PETN esas maddeli patlayıcılar daha güçlü ve yıkıcı oldukları için Tetril yerine bu maddeler kullanılmaktadır.

2.3 Savaş Gemilerinin Maruz Kalabileceği Muhtemel Dış Tehditler ve Su Altı Patlama Olayı

Bir savaş gemisine dışarıdan etki edebilecek muhtemel birçok dış tehdit mevcuttur. Bunlar değişik tip, sayı ve büyüklükteki savaş silahları olabileceği gibi gemi yapısı üzerinde oldukça büyük yıkımlara sebep olacak su altı mayınları da olabilirler. Patlama olayı genel olarak şok dalgasının yayıldığı ortama göre hava patlaması (AIREX) ve sualtı patlaması (UNDEX) olarak sınıflandırılabilir. Gemi yapısı düşünüldüğünde yapılabilecek bir diğer sınıflandırma ise, patlayıcının yapı içerisinde patlaması veya yapı dışında ve hangi derinlikte patladığıyla ilgilidir. Bu çalışmada su altı patlamasının en küçük gemi yapısal elemanı olan plak yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Genel olarak su altı patlama problemi serbest su yüzeyinin altında belirli bir derinlikte duran patlayıcı kütlesinin infilakı ile başlar [52]. Serbest su yüzeyinde yüzmekte olan gemi yapısı, patlayıcı kütleyle belirli bir uzaklıkta durmaktadır (Şekil 2. 3). Gemi yapısı ile patlayıcı kütle arasındaki mesafeye bağlı olarak yakın alan veya uzak alan patlaması olarak problemi 2 farklı şekilde ele almak mümkündür.

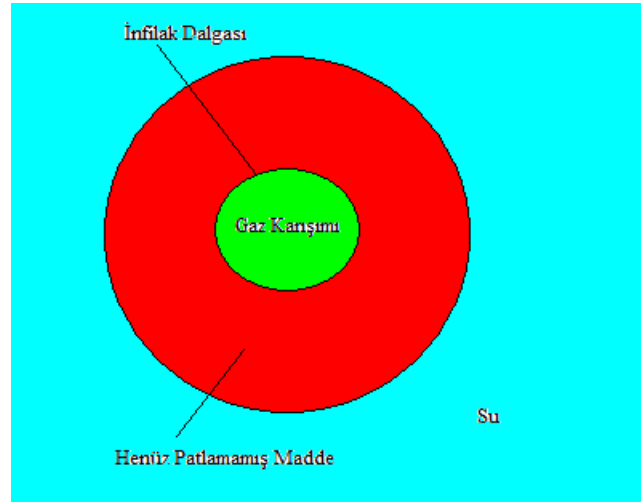


Şekil 2. 3 Su altı patlaması şematik gösterimi

Su altı patlama olayı, patlayıcı madde içerisindeki birbirini takip eden zincirleme kimyasal reaksiyonlarla başlar. Bu kimyasal reaksiyon tutuşmanın olduğu ilk kimyasal reaksiyon ve detonasyon şeklinde iki farklı proses halinde gerçekleşir. Patlama

prosesinin başlangıcında patlayıcı madde katı, sıvı veya gaz formda kararsız kimyasallar halindedir Detonatör, patlama olayının başlaması için aşılması gereken aktivasyon enerjisini patlayıcı maddeye verir. Detanatör malzemesi, patlayıcı maddeye göre daha hassas malzemedir oluşur. Patlayıcı maddenin detonatör tarafından tutuşturulması ile enerji açığa çıkar ve ardından yüksek miktarda ve basınçta ısınmış gazlar oluşur. Bu kimyasal reaksiyon patlama olarak isimlendirilir [52-54].

Başlangıç kimyasal reaksiyonu ile oluşan basınç yeteri kadar büyükse termo-mekanik şok dalgası ortaya çıkar. İnfalak sonucu oluşan gaz karışımı kendisine doğru hızla ilerlemekte olan infalak dalgası yüzünden genişleyemez. Patlama işlemi sonucunda oluşan artık gaz ürünleri yüksek hız nedeniyle genişlemek için yeterli zamanı bulamaz. Böylelikle gaz ürünlerinin hacmi genişleyemez ve basınç kaybı oluşmaz ancak buna karşılık sıcaklıkları sürekli artar. Böylece infalak dalgası önündeki gaz basıncı yüksek değerlere ulaşır. Patlama ile açığa çıkan gaz karışımının ulaştığı basınca 'infalak basıncı' veya 'Chapman-Jouguet' basıncı denir. Bu basınç sabit bir değere sahiptir ve kullanılan patlayıcı maddenin özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2. 4 Su altı patlama prosesi [53]

İnfalak dalgasının ilerlemesi ile birlikte kimyasal reaksiyon devam eder ve patlayıcı malzemenin tamamı gaz halini alır. Su altı patlaması ile ortaya çıkan artık gazlar ve infalak dalgası Şekil 2. 4'de gösterilmiştir. Patlama sonucunda ortaya çıkan artık gazlar son derece yoğun ve sıcaktır. Küresel şekilde ilerlemeye başlayan artık gazlardan oluşan gaz kabarcığı ile birlikte patlayıcı madde için infalak işlemi de tamamlanmış olur.

Su altı patlama olayı ile birlikte oluşan ilk gaz kabarcığının içindeki yoğun basınç, ortam içerisinde büyük bir sıkıştırma basıncı oluşmasına neden olur. İnfilak sonucu patlayıcı madde ile onu çevreleyen su ortamı arasında oluşan basınç dalgasına “şok dalgası” adı verilir. Yani özetle; şok dalgası, patlayıcıyı saran ve patlamanın gerçekleştiği ortamın oluşan artık gazların basıncı ile ileri doğru itilmesi sonucu oluşur. Bu dalga, patlama merkezinden dışa doğru olup çok hızlı bir şekilde hareket eder.

Şok dalgası profili, basınçtaki ani artışı takip eden çok hızlı sönümlenme ile birlikte eksponansiyel azalan bir eğri ile tanımlanır [52]. Şok dalgasının ulaştığı maksimum basınç “pik” basıncı olarak adlandırılır ve bir sualtı patlaması sonucu oluşan yapısal tepkilerin hesaplanmasında önemli rol oynar. Şok dalgası suda küresel dalgalar halinde yayılır ve ilerleme hızı ses hızından daha yüksektir. Şok dalgası patlama merkezinden ileriye doğru hareket ederken, yayılma hızı sudaki sesin yayılma hızına eşit bir değere kadar düşer [55]. Şok dalgasının hızı suyun sönümlenme etkisi ile birlikte, patlama merkezinden uzaklaştıkça azalır.

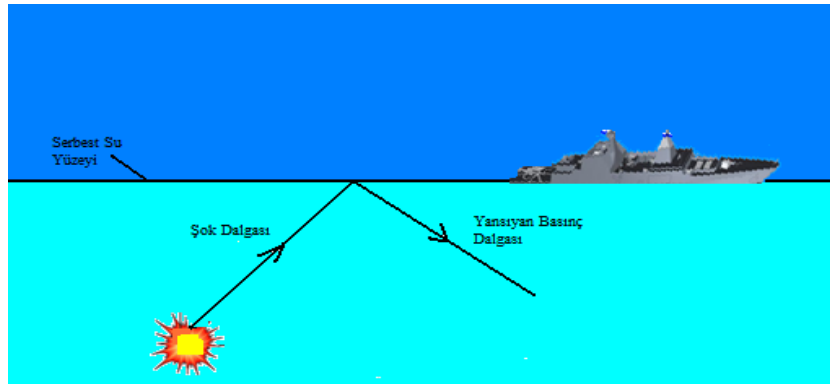
Patlama ile ortaya çıkan şok basınç dalgası kendisini karşılayan 3 değişik yüzey ile karşılaşır. Bunlar sırasıyla deniz dibi rijit üzeği, serbest su yüzeyi ve yapı-sıvı etkileşim arayüzeyidir. Deniz dibinden yansıyan şok basınç dalgası orijinal büyüklüğünden daha küçük bir değerde sıkıştırma basınç dalgası şeklindedir [52, 55].

Şok dalgasının karşılaşacağı en önemli yüzeylerden birisi yapı-sıvı arayüzeyidir. Yapı-sıvı yüzeyin eğelen şok dalgası ile birlikte gemi gövdesi üzerinde ani olarak yüksek değerde basınç yüklemesi oluşur. Basınç yüklemesini takiben yapı üzerine gelen yüklemeye eksponansiyel bir düşüş gözlenir. Uzak alan su altı patlamalarında oluşan basınç yükü tüm yapıya bir bütün olarak etki ettiği ve yapının da buna karşılık elastik davranış gösterdiği varsayılır [52, 55].

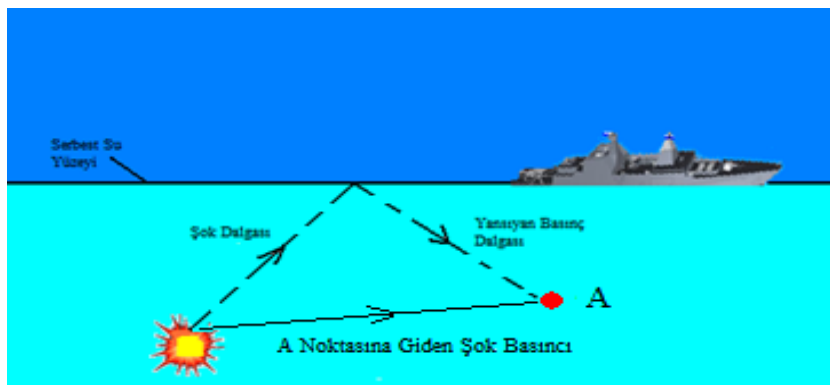
Yapı üzerine gelen basınç yüküyle birlikte yapı, yukarı yönlü ivmelenir. Yukarı yönlü ivmelenme, yapının kendisini saran su ortamının hızından daha düşük hızda hareket ettiği zamana kadar devam eder ve yükleme sıfıra düşer [52, 55]. Yüklemenin sıfıra düşmesi ile birlikte yapıdan kaynaklanan su yapıyı karşılayamaz ve yapı-sıvı arayüzünde kavitasyon bölgesi gelişmeye başlar [56]. Bu durumda oluşan kavitasyona ‘lokal’ veya ‘gövde’ kavitasyonu adı verilir. Lokal kavitasyon başladığı anda yapı düşey yönde maksimum hıza ulaşmıştır. Bu hıza başlama (kick-off) hızı adı verilir [55].

Başlama hızına ulaşıldıktan sonra yapı yavaşlar ve lokal kaviteasyon bölgesi kapanır. Bu durumda yapı üzerine tekrar yük almaya başlar. Çünkü; lokal kaviteasyonun kapanmaya başlamasının hemen öncesinde yapı ile su temas halinde değildir. Lokal kaviteasyonun kapanması ile birlikte su yapıya çarpar ve yapı geri yüklenmeye başlar [57]. Yapının geri yükleme basınç profili şok basınç profili ile benzerlik göstermekle birlikte büyüklük olarak daha düşük değerdedir.

İlerlemekte olan şok basınç dalgasının karşılaştığı bir diğer yüzey ise serbest su yüzeyidir. Serbest su yüzeyine gelen şok dalgası buradan geri yönde çekme basınç dalgası şeklinde yansır. Hava ve su arasındaki yoğunluk farkından dolayı, serbest su yüzeyine gelen şok dalgası ile yüzeyden yansıyan basınç dalgası neredeyse birbirlerine eşittir (Şekil 2. 5).



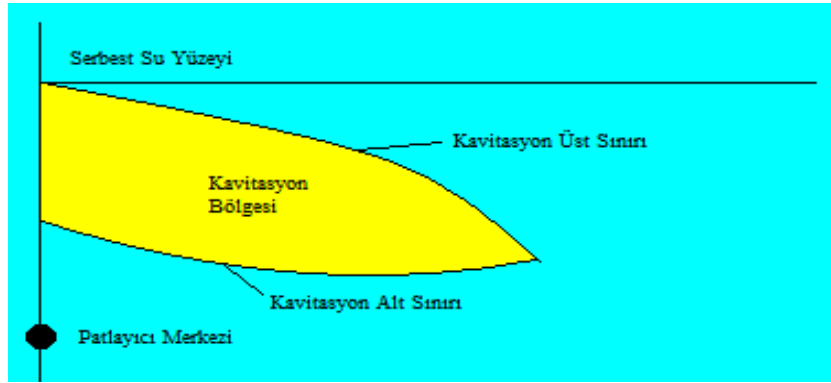
Şekil 2. 5 Serbest su yüzeyinden yansıma



Şekil 2. 6 Serbest su yüzeyinden yansıma ve kaviteasyon

Şok basınç dalgası ile yansıyan dalgaların karşılaştıkları Şekil 2. 6'da gösterilen A noktasında birbirlerini sönmüleyerek negatif basınç alanı oluştururlar. Bu karşılaşma kaviteasyona neden olur.

Serbest su yüzeyinden yansıyan basınç dalgası, su yüzeyine yakın bir yerde Şekil 2. 7’de gösterildiği gibi ‘toplu’ veya diğer bir ifade ile ‘bulk’ kavitasyon bölgesi oluşturur. Serbest su yüzeyinde basınç düşerek, kaynama basıncının altına düşer ve kavitasyon oluşur. Kavitasyon bölgesindeki basınç, suyun buhar basıncının üzerine çıkınca kavitasyon ortadan kalkar. Bulk kavitasyonunun büyüklüğü patlayıcının derinliğine ve patlayıcı cinsine bağlıdır [57].



Şekil 2. 7 Toplu kavitasyon bölgesi [53]

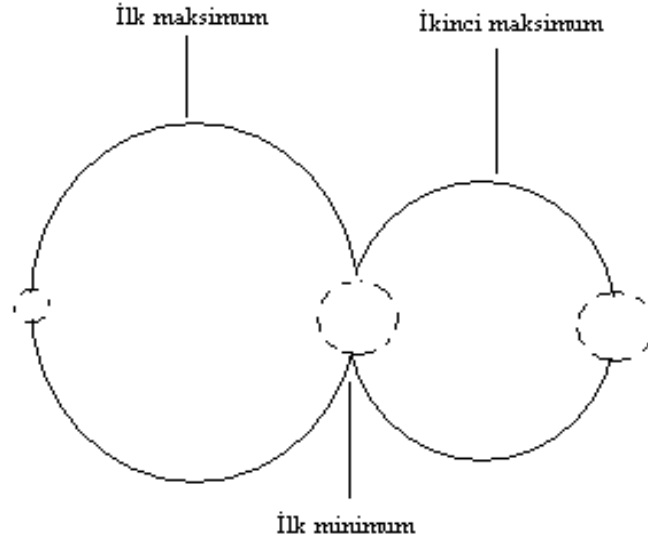
Kavitasyon üst sınırı, serbest su yüzeyinden yansıyan basınç dalgasının belli bölgelerde ortam basıncını buhar basıncının altına düşürmesi suretiyle oluşur. Kavitasyon üst sınırındaki toplam basınç, atmosfer basıncı, hidrostatik basınç, şok basıncı ve yansıyan basıncın bileşimidir [56].

Belli bir süre sonunda toplu kavitasyon bölgesi kapanmaya başlar. Kapanma işlemi sırasında kavitasyon üst sınırındaki su bir çekiç gibi aşağı doğru hareket ederek kavitasyon alt sınırının altında kalan suya hızlıca çarpar. Bu durumda oluşan etkiye kavitasyon darbesi adı verilir. Benzer şekilde lokal kavitasyon bölgesinin kapanması ile birlikte gemi yapısı üzerinde geri yükleme gerçekleşir. [7]

Patlama sırasında ortaya çıkan ilk zaman cevaplarının yanı sıra geç zaman cevapları yada ikincil zaman cevapları da gemi yapısında oluşturduğu etkiler bakımından önem taşımaktadır.

Daha önce bahsedildiği üzere infilak prosesi sonucu yüksek sıcaklık ve yoğunlukta küresel gaz kabarcıkları oluşmaktadır. Şok dalgasının oluşmaya devam etmesi ile gaz kabarcığı içerisindeki basınç düşer fakat yine de kabarcık içerisindeki basınç, onu çevreleyen ortamın hidrostatik basıncından daha yüksektir. Ancak belirli bir süre

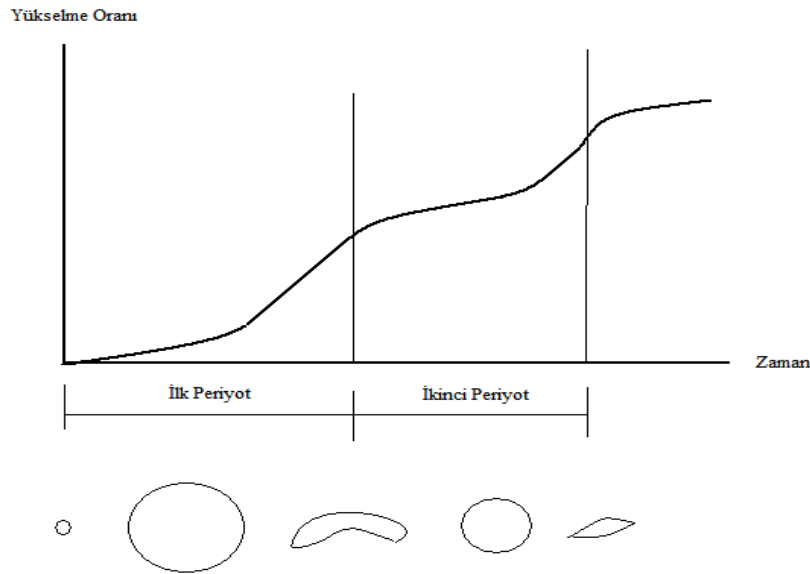
sonunda kabarcık içerisindeki basınç ile dış basınç dengeye gelir [52]. Bu durumda kabarcık içerisindeki gazlar genişlemeye başlarlar ve ortam içerisinde hızlı bir su akımının oluşmasına neden olurlar. Gaz kabarcığı içerisindeki gazlar, ortam ile hidrostatik dengeye ulaşmalarına rağmen kabarcığı çevreleyen akış halindeki suyun yüksek ataleti ile birlikte gaz kabarcığı genişlemeye devam eder. Atalete bağlı olan genişleme devam ettikçe kabarcık iç basıncı ortamın hidrostatik basıncının altına düşer [5]. Gaz genişlemesi hidrostatik basınç ile kabarcık içerisindeki gaz basıncı arasındaki basınç farkı su akışını durduruncaya kadar devam eder. Gaz kabarcığı içerisindeki basınç minimum, gaz kabarcığı çapı ise maksimum iken basınç artmaya ve gaz kabarcığı çapı ise azalmaya çalışır. Gaz kabarcığındaki bu daralma gaz kabarcığı içerisindeki sıkıştırma durana kadar devam eder ve kabarcık tekrar genişlemeye başlar [52]. Genişleme ve daralma prosesleri birbirlerini takip ederler ve sonuçta salınım yapan bir sistem ortaya çıkar. Şekil 2. 8’de gaz kabarcığı salınımı görülmektedir.



Şekil 2. 8 Gaz kabarcığı salınımı [52]

Gaz kabarcığının salınımı beraberinde yeni bir basınç dalgası etkisini de getirmektedir. Bu etkiye “ikincil” veya “kabarcık” etkisi adı verilir. Kabarcık darbe etkisi şok darbesi etkisine benzemektedir. Her iki durumda da oluşan etkilerin sudaki yayılma hızları aynıdır ve sesin yayılma hızıyla eşdeğerdir [8]. Şok basıncındaki pik değerler mikrosaniye mertebesinde ortaya çıkıp kaybolurken, gaz kabarcığında ise basınç etkilerinin maksimumları milisaniye mertebesinde oluşmaktadır.

İlk olarak oluşan gaz kabarcığı içerisindeki basıncın pik değeri, maksimum şok basıncının %10-20 altında bir değere sahiptir. Gaz kabarcığı içerisindeki basıncın zamanla değişimi, maksimum pik basınca kadar iç bükey bir eğri ve sönümlenerek kaybolması ise dış bükey olarak tarif edilebilir. Gaz kabarcığındaki salınım ile birlikte kabarcık serbest su yüzeyine doğru bir ilerleme hareketi gerçekleştirir. Gaz kabarcığının ilerlemesi; gazların oluşturduğu kaldırma kuvvetinden ve salınım hareketinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2. 9 Yükselme oranına karşılık kabarcık büyüklüğü [55]

Başlangıçta gaz kabarcığının hareket etmediği düşünülür. Gaz kabarcığının hareket etmesi, kabarcık darbe etkisini de önemli ölçüde değiştirir. Gaz kabarcığının düşey hız bileşeninin minimum olması durumunda gaz kabarcık etkisi düşük olmakla birlikte hız arttığında basınç düşerek kabarcık darbe etkisini düşürür. Bu durumda kabarcık darbe etkisi üçgen bir formla ifade edilecektir. Şekil 2. 9' da kabarcığın yükselmesine karşı şeklinin nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Su altı patlaması deniz dibine yakın bir yerde gerçekleşirse, küresel formdaki gaz kabarcığının şekli değişerek yarı küresel yada elipsoid hal alır. Su altı patlamalarında gaz kabarcık darbesi, şok basınç etkisinden sonra yapı üzerine gelen en önemli ikincidir. Ancak yine de şok basıncının çok altında bir etki oluşturduğu için çoğu durumda ihmal edilebilmektedir. Gaz kabarcık etkisi yüksek olsa dahi bazı durumlarda gemi

yapısı üzerinde deformasyon etkisi oluşturmaz. Gaz kabarcığı etkisinin gemi yapısı üzerinde etkili olması, dalga frekansına ve gaz kabarcığının olduğu yerin gemi yapısına olan uzaklığına bağlıdır [52, 53, 55, 56, 58]

Gaz kabarcığı darbesi faz açısına bağlı olarak çok basıncı deformasyonuna katkıda bulunur. Darbe yüklemesi lokal kaviteye sebep olmayacağı için etki tümüyle gemi yapısına ulaşır. Su altı patlaması gemi yapısına yakın bir yerde gerçekleşirse yani yakın alan patlaması ise gaz kabarcık etkisi sönmülmmeden gemi yapısına etki edecektir. Uzak alan patlamalarında ise etki sönmülenecektir.

Gemi yapısının rezonans frekansı ile şok basınç frekansı ve gaz kabarcık darbe frekansı çakışırsa yapı üzerinde dövünme (whipping) hareketi başlar. Dövünme ile birlikte yapı üzerinde çok ciddi yapısal deformasyon etkileri gözlenir [7].

Gaz kabarcığı serbest su yüzeyine veya gemi yapısına geldiğinde öncelikle bir çeki kuvveti, serbest su yüzeyinden yansıdığı anda ise basma kuvveti etkisi oluşturur [52, 53, 58]. Gaz kabarcığı serbest su yüzeyine veya gemi gövdesine geldiğinde iki farklı tipte yükleme meydana getirir.

Bu yüklemelerden ilki; gaz kabarcığı ile birlikte hareket eden su kütesinin gemi gövdesine çarpması ile oluşan yükleme durumudur. Bu durumda oluşan basınç etkisi son derece yüksektir ve şok basıncının etki süresinden daha uzundur. Oluşan yükler gemi yapısı üzerinde belirli bölgelerde son derece yüksek deformasyonlara sebep olurlar. İkinci yükleme durumu ise; gaz kabarcığının yapı üzerine geldiği durumda oluşur. Gaz kabarcığının patlaması ve buna paralel olarak suyun jet etkisi ile oluşan yükleme durumunda su jeti etkisi yapı üzerinde ciddi deformasyonlar oluşturur. Eğer gaz kabarcığı serbest su yüzeyine yakın bir bölgede oluşur ise serbest su yüzeyinde bir püskürme etkisi oluşur ve atmosfere doğru köpüklü su ile birlikte artık gazlar atılır.

2.3.1 Uzak Alan Su Altı Patlamaları

Uzak alan su altı patlamaları gemi yapısı üzerinde ciddi deformasyonlara neden olmaktadır. Su altı patlamalarında patlayıcının gemi yapısına yakın olması durumunda, yapı üzerinde plastik deformasyonlar ve yıkım gözlenir. Patlayıcı mesafesi arttıkça belli bir noktaya gelindiğinde yapı dağılmadan kalır fakat yapı üzerinde plastik deformasyonlar gözlenmeye devam eder. Uzaklık biraz daha arttığında ise plastik

deformasyonlar artık gözlenmez, yapı üzerinde sadece elastik deformasyonlar oluşur [7,12]. Uzak alan su altı patlamalarında gemi yapısı içerisindeki sistemler üzerinde ciddi zararlar gözlenebilmektedir. Uzak alan su altı patlamaları iki kategoriye ayrılır. Bunlardan ilki; patlayıcının yeterince uzakta olması durumunda, şok dalgası ve gaz kabarcık etkisine karşılık yapı üzerinde dağılma gözlenmemesi durumudur. İkinci olarak ise; patlama yeterince derin mesafede gerçekleşir ve gaz kabarcık darbe etkisi gemi yapısına gelmeden sökülür.

2.3.2 Yakın Alan Su Altı Patlamaları

Yakın alan su altı patlamaları gemi yapısı üzerinde su altı patlamaları ile oluşan tüm etkileri içermektedir. Yakın alan su altı patlamaları gemi yapısı üzerinde global ve lokal etkiler oluşturur. Gemi yapısal cevabı ilk zaman ve geç zaman cevaplarını birlikte içerir. İlk zaman cevapları, şok yüklerine karşılık plak veya panel deformasyonları ve dağılmalarını içerir. Geç zaman cevapları ise, plak ve panel yapısının gaz kabarcık darbesi veya kabarcık jetiyle oluşan deformasyon ve dağılmalarından oluşmaktadır.

TEMEL DENKLEMLER

Bu bölümde öncelikle ince ve kalın plak tanımı yapılmış ve ince plakların büyük sehimleri için Von Karman'ın türettiği geometrik doğrusal olmayan plak denklemleri anlatılmıştır. İnce bir plağın yer değiştirme bağıntılarının elde edilmesinde yapılan kabuller verilmiş ve yer değiştirme denklemleri elde edilmiştir. Birim uzama-yer değiştirme ilişkileri çıkarıldıktan sonra, katmanlı kompozit ince plaklar için yapılan kabuller anlatılmış ve bünye denklemleri verilmiştir. Virtüel iş ilkesi kullanılarak ince plağın geometrik doğrusal olmayan davranışını yöneten hareket denklemlerinin elde edilmesi anlatılmıştır. Patlama sonucu oluşan ve plağa etki eden basınç yükünün nasıl hesaplanacağı üzerinde durulmuştur ve anlık basınç yükü altındaki plak dinamik davranışı geometrik nonlineer olarak incelenmiştir.

3.1 Genel Kabuller

Plaklar; kalınlıkları, düzlem içi boyutlarına göre oldukça küçük olan, düzlem şeklindeki yapısal elemanlardır. Düzlemsel bir şekle sahip olan plaklar, enine yüklere maruz kaldıklarında üzerlerinde kesme kuvveti, eğilme ve burulma momentleri ortaya çıkar. Literatürde kullanılan iki tip plak teorisi bulunmaktadır. Bunlardan biri kalın plak teorisidir. Reissner-Mindlin tarafından ortaya konan bu teoriye göre plak boyutlarının L/h oranı 5-10 arasında ise incelenen plak yapısı kalın plak teorisine göre değerlendirilmelidir. Kalın plaklarda, kayma gerilmelerinden kaynaklı deformasyonlar önemli mertebededir ve hesaba katılmak zorundadır. Kullanılan bir diğer teori ise klasik plak teorisi diye de adlandırılan ince plak teorisidir. Kirchoff-Love tarafından ortaya konan bu teoriye göre L/h oranı 10-100 arasında olan plaklar ince plak olarak kabul edilirler. İnce plaklarda kayma gerilmelerinden kaynaklanan deformasyonlar ihmal

edilebilecek mertebededir ve hesaplarda kayma gerilmeleri dikkate alınmazlar. Kirchoff-Love plak teorisine göre levhanın orta düzlemine dik düzlemlerde kayma oluşmamaktadır ve böylece deformasyondan önce orta düzleme dik olan düzlemler deformasyondan sonra da orta düzleme dik kalırlar.

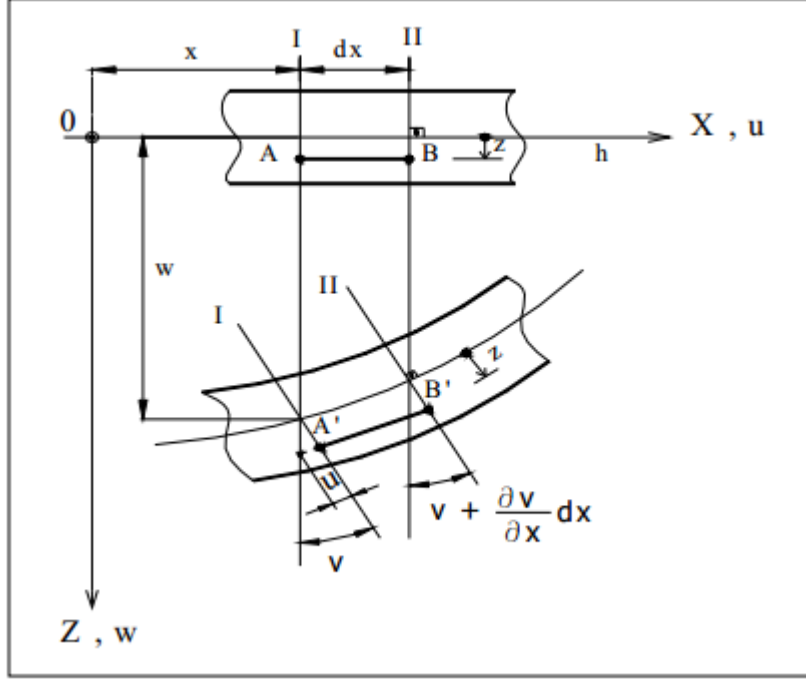
Yukarıda anlatılan kalın ve ince plak teorileri kinematik bağıntılarda doğrusal bir deformasyon alanı kabul etmekle birlikte, plağın maksimum sehimi kalınlığının 1/10 mertebelerine ulaşıncı kinematik bağıntılarda doğrusal olmayan terimlerin katkıları baskın olmaya başlar. Büyük yerdeğıştirmeler için kinematik denklemler von Karman tarafından ortaya konmuştur. Bu tez çalışmasında ince plakların büyük deformasyon davranışı incelenecektir.

Ortotropik N adet katmana sahip tabakalı kompozit plaklar, Klasik Laminasyon Teorisi'ne göre incelenmektedir. Şekil 3. 1'de deformasyon öncesi ve sonrasında plak davranışı gösterilmiştir. Klasik Laminasyon Teorisi, Kirchoff-Love kabuk teorisi ve Von-Karman ince plakların büyük yer değıştirmeler teorisine göre yapılan kabuller aşağıda verilmiştir [59]:

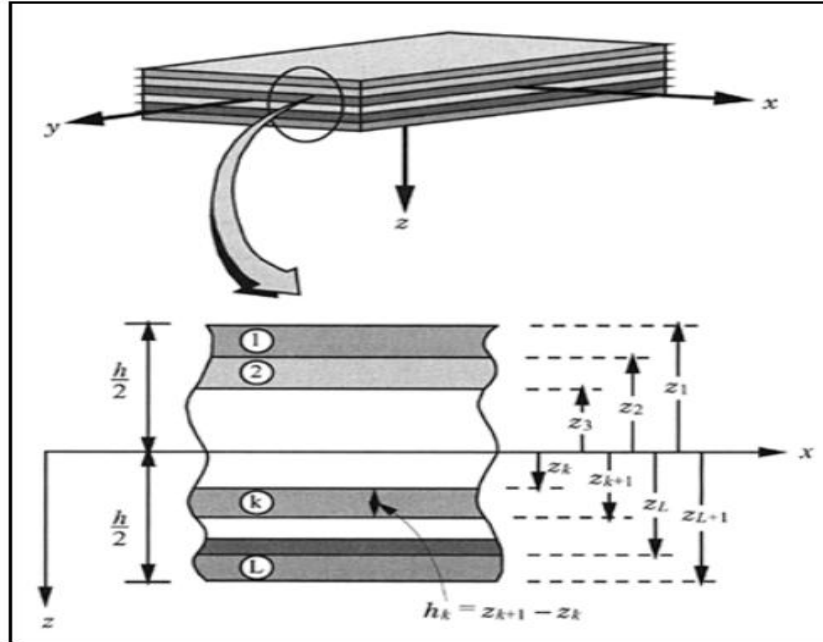
- Tabakalar arasındaki bağlar oldukça iyidir, yapıştırma tabakası çok incedir ve tabaka kayma etkisiyle şekil değıştirmez.
- Yükleme öncesi plak orta düzlemi düzdür.
- Plak kalınlığı h, diğler boyutlarına göre çok küçüktür.(en az a,b>10h).
- Plak deformasyonundan doğan yerdeğıştirmeler plak kalınlığına göre küçüktür.
($\delta_{\max} = w_{\max} = (1/10 - 1/5)h$)
- Deformasyondan önce plağın orta yüzeyinin normali olan çizgi, deformasyon sırasında yüzeye normal kalır.

Doktora çalışması sırasında kullanılan N adet tabakadan oluşan h kalınlığındaki katmanlı kompozit plak modeli ve koordinat sistemi Şekil 3. 2'de görölmektedir. Bu bölümde incelenen plak katmanlı kompozit olarak modellenmiş olup, en genel hali ile Klasik Katmanlama Teorisi kullanılmıştır. Klasik Katmanlama Teorisine göre; her bir tabaka için düzlem gerilme durumu geçerlidir. Bu teori kullanılarak, uzama, eğilme ve

burulma deformasyonları bağı olarak ele alınabilir, aksenal ve kesme yüklerinden dolayı oluşan düzlem-içi yüklemeler, eğilme ve burulma momentlerini içermektedir.



Şekil 3. 1 Deformasyon öncesi ve sonrası plak davranışı [59]



Şekil 3. 2 Katmanlı kompozit plak [60]

Katmanlı kompozit plakların katmanlama teorisi ile homojen, izotropik plakların klasik teorisi [61] arasındaki en büyük fark, katman gerilme-birim uzama ilişkileridir. Bunun

dışında denge denklemleri, birim uzama-yer değiştirme bağıntıları gibi teorinin diğer bileşenleri klasik plak teorisinde olduğu gibi ele alınır.

3.2 Yerdeğiştirme ve Şekil Değiştirme İlişkileri

N adet katmandan oluşan h kalınlığındaki kompozit plak geometrisi Şekil 3. 2'de gōsterilmiřtir. Plak denklemleri temel olarak yer değiştirme alanının kalınlık doğrultusundaki koordinat olan z'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Buna gōre; yerdeğiştirmeler z koordinatının nonlinear fonksiyonları olarak yazılabilir.

$$u(x, y, z) = u^0(x, y) + z\beta_x(x, y) + z^2\gamma_x(x, y) + \dots \quad (3.1)$$

$$v(x, y, z) = v^0(x, y) + z\beta_y(x, y) + z^2\gamma_y(x, y) + \dots \quad (3.2)$$

$$w(x, y, z) = w^0(x, y) + z\beta_z(x, y) + z^2\gamma_z(x, y) + \dots \quad (3.3)$$

burada u, v ve w sırasıyla x, y ve z yōnündeki yer deęiřtirmeleri, u^0 , v^0 ve w^0 plak orta yūzeyindeki yer deęiřtirmeleri, x, y ve z kartezyen koordinatları, β ve γ eęilmelerden dolayı gelen ilave terimleri gōstermektedir. Kirchoff-Love ince plak teorisine gōre u ve v iēin ilk iki terim ve w iēin bir terim alınır. $\beta_x = -\partial w^0 / \partial x$ ve $\beta_y = -\partial w^0 / \partial y$ kabulū yapılır.

Bu ifade Kirchoff-Love teorisindeki orta yūzeeye dik olan ēizgilerin deformatsiyondan sonrada orta yūzeeye dik kalmalarını ifade eder.

$$u = u^0 - z \frac{\partial w^0}{\partial x} \quad (3.4)$$

$$v = v^0 - z \frac{\partial w^0}{\partial y} \quad (3.5)$$

$$w = w^0 \quad (3.6)$$

3.3 Gerinim-Yerdeğiştirme Bağıntıları

Bu ēalıřmada; kartezyen koordinatlarda geometrik olarak doęrusal olmayan birim uzama-yer deęiřtirme iliřkileri Von Kármán būyūk yerdeęiřtirmeler teorisine ifade edilmiřtir. Bu durumda gerinim-yerdeęiřtirme iliřkileri ařaęıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\
\varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Denklemlerdeki $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ kartezyen koordinatlardaki gerinimleri veya diğerk bir ifade ile birim uzama bileşenlerini ifade etmektedirler. Benzer şekilde u, v, w sırası ile x,y ve z doğrultularındaki yerdeğıştirmeleri göstermektedir. Yukarıda verilen yerdeğıştirme ifadeleri gerinim ifadelerindeki yerlerine konularak düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u^0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^0}{\partial x} \right)^2 \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v^0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \right)^2 \\
\varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial w^0}{\partial y}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

şeklinde elde edilir. Birim uzamaların bir kısmı z'den bağımsızdır ve bunlar plak orta düzlemindeki gerinimleri ifade etmektedirler.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u^0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^0}{\partial x} \right)^2 \\
\varepsilon_y^0 &= \frac{\partial v^0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \right)^2 \\
\varepsilon_{xy}^0 &= \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} + \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial w^0}{\partial y}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Yukarıdaki denklemlerde z'ye bağı olan terimler plağın orta yüzey eğrilikleri olarak ifade edilirler. Bunlar sırasıyla;

$$\begin{aligned}
\kappa_x &= - \partial^2 w^0 / \partial x^2 \\
\kappa_y &= - \partial^2 w^0 / \partial y^2 \\
\kappa_{xy} &= - 2 \partial^2 w^0 / \partial x \partial y
\end{aligned} \tag{3.10}$$

şeklinde ifade edilirler. Eğriliklere göre gerinim-yerdeğıştirme denklemleri düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \varepsilon_x^0 + z\kappa_x \\
\varepsilon_y &= \varepsilon_y^0 + z\kappa_y \\
\varepsilon_{xy} &= \varepsilon_{xy}^0 + z\kappa_{xy}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

olarak yazılabilir.

3.4 Bünye Bağlıları

Ortotropik tek yönlü elyaf takviyeli kompozit plakalarda, tabakalar çok ince olduklarından düzleme dik yönde gerilmelerin $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$ olduğu kabul edilir. Bu durumda birim şekil değiştirme ve gerilme ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Denklemlerde gösterilen Q_{ij} terimleri indirgenmiş katılık matrisi veya direngenlik matrisi olarak isimlendirilir.

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad Q_{12} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad Q_{66} = G_{12} \tag{3.13}$$

Elyaflarla genel eksen takımı (x-y) arasında θ açısı kadar fark bulunması durumunda gerilmeler, lokal eksen sistemi (1-2) ile genel eksen sistemi (x-y) arasında bir (T) dönüşüm matrisi kullanılarak genel eksen sisteminde ifade edilir[60].

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & 2\sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -2\sin(\theta)\cos(\theta) \\ -\sin(\theta)\cos(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

Genel ve lokal eksen takımındaki gerilme ifadelerini tekrar yazarsak;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

Lokal eksenlerdeki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak, gerilme bileşenleri genel eksen takımında düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Benzer olarak şekil değiştirme ifadelerinin lokal ve genel eksen sistemleri arasındaki ilişkisi aşağıdaki biçimde gösterilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Birim şekil değişimindeki (1/2) çarpanlarını yok edip ifadeleri daha basit hale getirmek için Reuter [R] matrisi kullanılır.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Bu durumda genel eksenle lokal eksen arasındaki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Yukarıdaki ifade düzenlenirse;

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \quad (3.20)$$

elde edilir. Burada $[\bar{Q}]$ dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisidir. Gerilme şekil değiştirme ilişkisi genel eksen takımında matris formunda aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Bu ifade de yer alan $[\bar{Q}]$ dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisinin elemanları aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\
\bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \\
\bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\
\bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta \\
\bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta \\
\bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Yukarıda verilen ifadelerde;

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}) \\
Q_{12} &= Q_{21} = \nu_{12} E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}) \\
Q_{22} &= E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}) \\
Q_{66} &= G_{12}
\end{aligned} \tag{3.23}$$

şeklinde dir. Bu eşitliklerdeki parametreler aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
E_1 &= E_f \nu_f + E_m (1 - \nu_f) \\
E_2 &= E_f E_m / E_f (1 - \nu_f) + E_m \nu_f \\
G_{12} &= G_f G_m / G_f (1 - \nu_f) + G_m \nu_m \\
\nu_{12} &= \nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m \\
\nu_{21} &= E_2 \nu_{12} / E_1 \\
G_f &= E_f / 2(1 + \nu_f) \\
G_m &= E_m / 2(1 + \nu_m)
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Yukarıdaki ifadelerde E_f ve E_m elyafın ve matris malzemesinin elastisite modüllerini, G_f ve G_m elyafın ve matris malzemesinin kayma modüllerini, ν_f ve ν_m elyafın ve matrisin toplam hacimdeki oranlarını, ν_f ve ν_m elyafın ve matrisin Poisson oranlarını, E_1 , E_2 , G_{12} bir kompozit katmanın elyaf yönündeki, elyafa dik olan yöndeki elastisite modüllerini ve kayma modülünü, ν_{12} ve ν_{21} elyaf yönü ve ona dik olan yöndeki Poisson oranlarını ifade etmektedir. Ancak bu ifadeler kullanılarak kompozit malzemelerin mekanik özellikleri hesaplanıyor olmakla birlikte, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak en sağlıklı yol numune testlerinin gerçekleştirilmesidir.

(3.11) ifadesinde verilen birim uzama gerilme ifadeleri matris formunda yazılırsa;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \tag{3.25}$$

Bünye denklemleri tekrar düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 + z\kappa_x \\ \varepsilon_y^0 + z\kappa_y \\ \varepsilon_{xy}^0 + z\kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

elde edilir.

3.5 Kuvvet ve Moment Bileşenleri

Katmanlı kompozit plağın kuvvet ve moment bileşenleri her bir katmandaki gerilme bileşenlerinin ve bunların plak orta yüzeyine göre momentlerinin toplamı şeklinde yazılabilirler.

$$\{\bar{N}\} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz \quad (3.27)$$

Benzer şekilde moment bileşenleri de aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\{\bar{M}\} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz \quad (3.28)$$

Denklem (3.26) da verilen bünye denklemleri, (3.27) ve (3.28) denklemlerinde yerlerine yazılarak düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left(\int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z dz \right) \quad (3.29)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left(\int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \right) \quad (3.30)$$

olarak elde edilirler. Bu denklemlerdeki integrasyonlar yapılır ise (3.29) ve (3.30) denklemleri aşağıdaki gibi elde edilirler.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Bu denklemlerdeki katmanların sırasıyla uzama katılıkları, bağı katılıkları ve eğilme katılıkları aşağıdaki gibidir.

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (3.33)$$

$$B_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k z dz = 1/2 \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (3.34)$$

$$D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 dz = 1/3 \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (3.35)$$

Bu denklemlerdeki indisler i,j=1,2 veya 6 şeklinde yerlerine yazılır ve düzenlenirler ise kuvvet ve moment bileşenleri matris formunda şu şekilde verilebilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

biçiminde genelleştirilmiş bünye denklemi yazılır.

3.6 Katmanlı Kompozit Bir Plağın Geometrik Doğrusal Olmayan Davranışı İçin Hareket Denklemleri

Bu bölümde, Klasik Laminasyon Teorisi'nin yönetici hareket denklemlerinin bulunabilmesi için virtüel iş prensibi kullanılmıştır. Malzemenin sıcaklık değişiminden ve elektrik alan etkisinden bağımsız olduğu kabul edilerek virtüel iş prensibine göre; dengede olan bir sistemin herhangi bir virtüel yer ve şekil değiştirmesinde, dış

kuvvetlerin işi iç kuvvetlerin işine eşittir. Bu kapsamda virtüel iş denklemi şu şekilde yazılır [60].

Hamilton'un dinamik sistemler için genel olarak verdiği virtüel iş prensibi şu şekildedir [60].

$$\int_0^T (\delta U + \delta V - \delta K) dt = 0 \quad (3.37)$$

Bu ifadede yer alan δU virtüel şekil değiştirme enerjisini, δV dış kuvvetlerin yaptığı işi ve δK virtüel kinetik enerjiyi göstermektedir. Tüm bu enerji ifadeleri (3.37) denkleminde yerlerine yazılırsa denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \delta J_e = \int_T dt \iint_A \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + 2\sigma_{xy} \delta \varepsilon_{xy}] dz dA - \iint_A [q_x \delta u + q_y \delta v + q_z \delta w] dA \\ - \iint_A [\bar{m}(\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w})] dA = 0 \end{aligned} \quad (3.38)$$

\bar{m} plağın birim alanının kütlesini, q_x , q_y ve q_z sırasıyla x,y ve z yönlerindeki yayılı kuvvetleri göstermektedir. İfadelerdeki terimlerin üzerinde bulunan noktalar ise zamana göre türevleri ifade etmektedir. Terim terim kısmi integrasyon uygulanarak δu , δv ve δw varyasyonları üzerindeki türevler kaldırılır ve elde edilen denklemlerde δu , δv ve δw keyfi varyasyonları için sıfıra eşit olma şartından katmanlı kompozit plağın hareket denklemleri diferansiyel formda elde edilir.

$$-\frac{\partial N_x}{\partial x} - \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} - q_x + \bar{m}\dot{u}^0 = 0 \quad (3.39)$$

$$-\frac{\partial N_y}{\partial y} - \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} - q_y + \bar{m}\dot{v}^0 = 0 \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - 2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} - \left(\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \right) \frac{\partial w^0}{\partial x} - \left(\frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \right) \frac{\partial w^0}{\partial y} \\ - \left(N_x \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \right) - q_z + \bar{m}\dot{w}^0 = 0 \end{aligned} \quad (3.41)$$

olarak elde edilir. (3.36) ile verilen genelleştirilmiş bünye denklemleri, (3.39), (3.40), (3.41) ifadelerinde yerlerine konulursa hareket denklemleri plağın orta noktasının yer değiştirmeleri cinsinden aşağıdaki gibi elde edilirler.

$$\begin{aligned}
L_{11}u^0 + L_{12}v^0 + L_{13}w^0 + N_1(w^0) + \bar{m}\ddot{u}^0 - q_x &= 0 \\
L_{21}u^0 + L_{22}v^0 + L_{23}w^0 + N_2(w^0) + \bar{m}\ddot{v}^0 - q_y &= 0 \\
L_{31}u^0 + L_{32}v^0 + L_{33}w^0 + N_3(u^0, v^0, w^0) + \bar{m}\ddot{w}^0 - q_z &= 0
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Denklemlerde verilen doğrusal operatörler L_{ij} sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$L_{11} = -A_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - 2A_{16} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - A_{66} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \tag{3.43}$$

$$L_{12} = -(A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - A_{16} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - A_{26} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \tag{3.44}$$

$$L_{13} = 3B_{16} \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y} + (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} + B_{11} \frac{\partial^3}{\partial x^3} + B_{26} \frac{\partial^3}{\partial y^3} \tag{3.45}$$

$$L_{21} = -(A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - A_{16} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - A_{26} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \tag{3.46}$$

$$L_{22} = -A_{66} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - A_{22} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - 2A_{26} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \tag{3.47}$$

$$L_{23} = (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3}{\partial y \partial x^2} + B_{22} \frac{\partial^3}{\partial y^3} + 3B_{26} \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} + B_{16} \frac{\partial^3}{\partial x^3} \tag{3.48}$$

$$L_{31} = -B_{11} \frac{\partial^3}{\partial x^3} - 3B_{16} \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3}{\partial y^3} \tag{3.49}$$

$$L_{32} = -B_{16} \frac{\partial^3}{\partial x^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} - B_{22} \frac{\partial^3}{\partial y^3} \tag{3.50}$$

$$L_{33} = D_{11} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4}{\partial x^3 \partial y} + (2D_{12} + 4D_{66}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4}{\partial y^4} \tag{3.51}$$

Denklemlerde verilen doğrusal olmayan operatörler N_i sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
N_1(w^0) = & -A_{11} \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} - (A_{12} + A_{66}) \frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} - A_{16} \frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \\
& - 2A_{16} \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} - A_{26} \frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} - A_{66} \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2}
\end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}
N_2(w^0) = & -(A_{12} + A_{66}) \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} - A_{22} \frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} - 2A_{26} \frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \\
& - A_{26} \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} - A_{16} \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} - A_{66} \frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2}
\end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned}
N_3(u^0, v^0, w^0) = & 2(B_{66} - B_{12}) \left(\frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2(B_{12} - B_{66}) \left(\frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \right) \\
& - A_{11} \left(\frac{\partial^2 u^0}{\partial x^2} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) - (3A_{11}/2) \left(\frac{\partial w^0}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \\
& - (A_{12} + A_{66}) \left(\frac{\partial^2 v^0}{\partial y \partial x} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) \\
& - 2A_{66} \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y \partial x} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) - 2A_{16} \left(\frac{\partial^2 u^0}{\partial y \partial x} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) \\
& - A_{16} \left(\frac{\partial^2 v^0}{\partial x^2} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) - 3A_{16} \left(\frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) \\
& - 3A_{16} \left(\frac{\partial w^0}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 w^0}{\partial y \partial x} - A_{26} \left(\frac{\partial^2 v^0}{\partial y^2} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) - 4A_{26} \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) \\
& - A_{66} \left(\frac{\partial^2 u^0}{\partial y^2} \frac{\partial w^0}{\partial x} \right) - (A_{66} + A_{12}/2) \left(\frac{\partial w^0}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \\
& - (A_{12} + A_{66}) \left(\frac{\partial^2 u^0}{\partial x \partial y} \frac{\partial w^0}{\partial y} \right) \\
& - A_{22} \left(\frac{\partial^2 v^0}{\partial y^2} \frac{\partial w^0}{\partial y} \right) - (3A_{22}/2) \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \\
& - A_{26} \left(\frac{\partial^2 u^0}{\partial y^2} \frac{\partial w^0}{\partial y} \right) - 2A_{26} \left(\frac{\partial^2 v^0}{\partial x \partial y} \frac{\partial w^0}{\partial y} \right) - 3A_{26} \left(\frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \right) \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \right)^2 \\
& - A_{16} \left(\frac{\partial^2 u^0}{\partial x^2} \frac{\partial w^0}{\partial y} \right) - A_{66} \left(\frac{\partial^2 v^0}{\partial x^2} \frac{\partial w^0}{\partial y} \right) \\
& - (A_{66} + A_{12}/2) \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} - A_{11} \left(\frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \frac{\partial u^0}{\partial x} \right) \\
& - A_{12} \left(\frac{\partial v^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \right) - A_{16} \left(\frac{\partial u^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \right) \\
& - A_{16} \left(\frac{\partial v^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \right) - A_{12} \left(\frac{\partial u^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \right) - A_{22} \left(\frac{\partial v^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \right) \\
& - A_{26} \left(\frac{\partial u^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \right) - A_{26} \left(\frac{\partial v^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \right) \\
& - 2A_{16} \left(\frac{\partial u^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \right) - A_{26} \left(\frac{\partial v^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \right) \\
& - 2A_{66} \left(\frac{\partial u^0}{\partial y} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \right) - 2A_{66} \left(\frac{\partial v^0}{\partial x} \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \right)
\end{aligned}$$

(3.54)

3.7 Katmanlı Kompozit Plak İçin Başlangıç ve Sınır Şartları

Plak başlangıçta durgun halde olduğu için $t=0$ anında tüm yer değiştirme ve hız bileşenleri de sıfırdır. Bu çalışmada plak yapısı tüm kenarlarından ankastre olarak modellendiği için sınır Şartlarının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$x = 0, a \text{ ve } y = 0, b \quad \rightarrow \quad u^0 = v^0 = w^0 = 0$$

$$x = 0, a \quad \rightarrow \quad \partial u^0 / \partial x = \partial v^0 / \partial x = \partial w^0 / \partial x = 0$$

$$y = 0, b \quad \rightarrow \quad \partial u^0 / \partial y = \partial v^0 / \partial y = \partial w^0 / \partial y = 0$$

olarak alınır.

ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Bu bölümde daha önce elde edilen katmanlı kompozit plağın hareket denklemlerinin çözümü için öncelikle sınır koşullarını sağlayan yaklaşım fonksiyonlarının seçimi gerçekleştirilmiştir. Ardından, hareket denklemlerine Galerkin yöntemi uygulanarak doğrusal olmayan ve bağlı diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin çözümü için MATHEMATICA programlama dilinde yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Kompozit plakların patlama yüklerine karşılık incelenmesi gereken bir diğer özelliği olan hasar indeksi değişik teoriler için geliştirilen algoritmaya ilave edilmiştir.

4.1 Yaklaşım Fonksiyonları

Savaş gemileri işletme ömürlerinde değişik dinamik yüklemelere maruz kalabilmektedirler. Bu yükleme senaryolarından en önemlisi ve yıkıcı olanı ise su altı patlama kaynaklı şok yüklemesidir. Tez çalışması kapsamında kompozit olarak modellenen bir savaş gemisi panelinin su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık geometrik nonlinear dinamik davranışı incelenmiştir. Bu bölümde öncelikle, geminin taşıyıcı postaları arasında ankastre mesnetli olarak davranan plak yapısı için yaklaşım fonksiyonlarının seçimi gerçekleştirilmiştir. Ardından Bölüm 3’de detaylı olarak verilen kompozit plağın hareket denklemlerine Galerkin yöntemi uygulanmış ve hareket denklemleri nonlinear ve bağlı diferansiyel formda elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin çözümü için MATHEMATICA programlama dilinde bir algoritma geliştirilmiştir.

Plak hareket denklemlerinin çözümü için seçilen ve geometrik sınır şartlarını sağlayan yaklaşım fonksiyonları koordinatlara bağlı bir fonksiyon ile zamana bağlı bir

fonksiyonun çarpımı şeklinde plağın orta noktasının yerdeğıştirmeleri cinsinden aşığıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
u^0 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{ij}(t) \phi_{ij}(x, y, z) \\
v^0 &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L V_{kl}(t) \lambda_{kl}(x, y, z) \\
w^0 &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N W_{mn}(t) \psi_{mn}(x, y, z)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Bu bölümde öncelikle, geminin taşıyıcı postaları arasında ankastre mesnetli olarak davranan plak yapısı için geometrik sınır şartlarını sağlayan yaklaşım fonksiyonlarının seçimi gerçekleştirilmiştir.

Plak tüm kenarlarından ankastre mesnetli olması durumu için geometrik sınır şartlarını sağlayan;

$$\begin{aligned}
u^0 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{ij}(t) \sin \frac{(1+j)\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \sin \frac{i\pi y}{b} \\
v^0 &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L V_{mn}(t) \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{l\pi x}{a} \sin \frac{(1+k)\pi y}{b} \\
w^0 &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N W_{mn}(t) \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{\pi y}{b}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

yaklaşım fonksiyonları seçilmiştir.

4.2 Galerkin Yönteminin Uygulanması

Katmanlı kompozit plakların statik ve dinamik mukavemet analizleri gerçekleştirilirken Navier tipi analitik çözüm yöntemlerinden faydalanılır. Ancak, Navier tipi analitik çözüm yöntemleri yapı sadece basit mesnet sınır koşulları altındayken ve belirli tipteki kompozit plaklar için uygulanabilmektedir. Farklı sınır koşulları ve farklı açılardaki katmanlı kompozit plaklar için hesaplama yapılmak istenirse Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri (Galerkin, En Küçük Kareler, Moment ve Kolokasyon yöntemleri), Varyasyonel Yöntemler (Rayleigh-Ritz yöntemi), Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi vb. yaklaşık çözüm yöntemlerinden yararlanılması gerekmektedir [60]. Galerkin yöntemi sürekli ortamlar mekaniği problemlerinde, yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan çok güçlü bir ağırlıklı artıklar yöntemidir. Bu yöntemde

yaklaşım fonksiyonlarının çözülecek diferansiyel denklem sistemi içerisinde yerlerine konulmasıyla ortaya çıkan hata fonksiyonunun (ε_R), ağırlık fonksiyonlarıyla (ϕ) çarpımının çözüm bölgesi üzerindeki integralleri sifira eşitlenerek sonuç elde edilir.

$$\int_{\Omega} \varepsilon_R \phi_i d\Omega = 0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.3)$$

Galerkin yönteminde ağırlık fonksiyonu olarak yaklaşım fonksiyonlarının kendisi seçilir. Böylece Galerkin yöntemi hatayı mümkün mertebe küçültecek uygun U_{ij} , V_{kl} , W_{mn} katsayılarının hesaplanabilmesini sağlar [60].

$$\begin{aligned} \iint_A (L_{11}u^0 + L_{12}v^0 + L_{13}w^0 + N_1(w^0) + d_1\dot{u}^0 + \bar{m}\ddot{u}^0 - q_x) \phi dA &= 0 \\ \iint_A (L_{21}u^0 + L_{22}v^0 + L_{23}w^0 + N_2(w^0) + d_2\dot{v}^0 + \bar{m}\ddot{v}^0 - q_y) \lambda dA &= 0 \\ \iint_A (L_{31}u^0 + L_{32}v^0 + L_{33}w^0 + N_3(u^0, v^0, w^0) + d_3\dot{w}^0 + \bar{m}\ddot{w}^0 - q_z) \psi dA &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Denklemlerde plak yapısı başlangıç anında durgun olduğundan dolayı yerdeğiştirmeler ve bunların türevleri yani hızları sıfırdır.

$$\begin{aligned} U(0) &= 0 & \dot{U}(0) &= 0 \\ V(0) &= 0 & \dot{V}(0) &= 0 \\ W(0) &= 0 & \dot{W}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.3 Su Altı Patlama Basınç Fonksiyonu

Gemi ve deniz yapıları, su altında oluşan patlamaların etkisiyle, güçlü şok dalgalarına ve anlık basınç yüklerine, dolayısıyla zamana bağlı dış zorlamalara maruz kalabilmektedirler. Patlama olayı ile ortaya çıkan basınç dalgası kısa bir süre içerisinde tepe değerine ulaştığından dolayı, yapı ani yüklenmiş olarak düşünülebilir. Bu durumda, su içerisindeki hedef noktada su altı patlama basıncının zamanla değişimi Cole tarafından [52] aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$P_{\max} = K_1 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_1} \quad (4.6)$$

Bu ifadede P_{\max} (Pa) basıncın maksimum değerini, R (m) patlama merkezinden hedefe olan yarıçap mesafesini, W (kg) patlayıcı madde miktarını ifade etmektedir. K_1 ve A_1

maksimum basınca etki eden patlayıcı parametreleridir [52, 53, 58, 62]. TNT tipi patlayıcıya ait parametreler Çizelge 4. 1'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1 TNT parametreleri

Hesaplanan	Parametre
Pik basınç	$K_1=23800, A_1=1,16$
Şok dalgası geliş süresi	$K_2=0,058, A_2=0,185$
Şok dalgası impuls	$K_3=1,798, A_3=0,98$
Şok dalgası enerjisi	$K_4=3034,9, A_4=2,155$
Gaz dinamiği için Jones sabitleri	$K_J=2712,28$
İkincil basınç etkisi	$K_{bp}=12,148, A_{bp}=-1/6$

Patlama olayı sonucunda ortaya çıkan şok basıncı ani ve hızlı bir şekilde zaman sabiti θ 'ya bağlı olarak eksponansiyel bir şekilde azalır. Zaman sabiti θ (μs) şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\theta = W^{\frac{1}{3}} K_2 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_2} \quad (4.7)$$

Maksimum basınç ve zaman sabiti dikkate alınarak patlama olayı sonucunda hedef noktaya etki eden şok basıncının zamanla değişimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P(t) = P_{\max} e^{-(t-t_d)/\theta} \quad 0 \leq t \leq \theta \quad (4.8)$$

Basınç değişim ifadesinde yer alan zaman gecikmesi t_d patlayıcı yarıçap mesafesine R ve patlayıcının serbest su yüzeyinden olan düşey mesafeye R_0 bağlıdır.

$$t_d = (R - R_0) / c \quad (4.9)$$

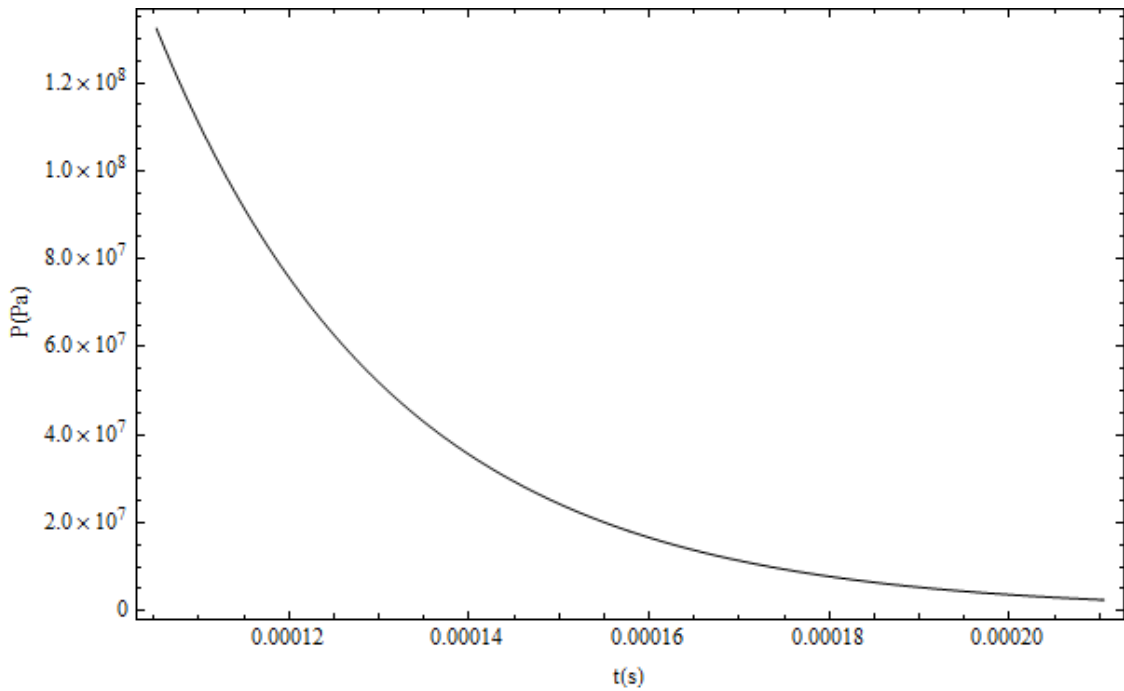
burada c (m/s) sesin su içerisindeki yayılma hızıdır.

Yukarıdaki ifadeler patlayıcı türü olarak Trinitrotolüen (TNT) seçildiği durum için düzenlenirse, maksimum basınç P_{\max} (Pa) ve zaman sabiti θ (μs) şu şekilde elde edilir [63]

$$P_{\max} = 52.16 \times 10^6 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \quad (4.10)$$

$$\theta = 92.5 \times W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{-0.22} \quad (4.11)$$

Cole yaklaşımı kullanılarak suyun 0,15 m derinliğinde 40 gr TNT patlaması sonucu hedef noktaya etkiyecek basınç değerinin belirlenmesi ve şok basıncının zamanla değişiminin gözlenebilmesi için MATHEMATICA yazılımı kullanılmıştır. **Hata! Başvuru kaynağı ulunamadı.**'da Cole yaklaşımı dikkate alınarak suyun 0,15 m derinliğinde 40 gr TNT patlaması sonucu su içerisindeki hedef noktada gözlenen şok basıncının maksimum değeri ve bu basıncın zamanla değişimi verilmiştir. Hedef noktaya etki eden basıncın maksimum değeri 1.32372×10^8 (Pa) olarak elde edilmiştir. Basıncın zamanla değişimi Şekil 4. 1'de verilmiştir.



Şekil 4. 1 Cole yaklaşımı ile 40 gr TNT için basınç eğrisi

Cole yaklaşımı ile suyun belirli bir derinliğindeki hedef noktaya gelecek basınç tahmin edilmesine rağmen yüzen bir cisim üzerindeki basıncın hesaplanması için yapı-sıvı etkileşiminin dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla yüzen bir cisim üzerindeki basıncın hesaplanabilmesi amacıyla Taylor Plak Teorisi'nden yararlanılmıştır [64].

4.4 Yapı-Sıvı Etkileşimi ve Taylor Plak Teorisi

Su altı patlama analizlerinde yapı-sıvı etkileşimi oldukça önem arz etmektedir. Su altı patlamasına maruz kalan bir yapının davranışının incelenmesi ile aynı zamanda yapının sıvı ile etkileşimi de irdelenmiş olur. Şok yükü altındaki bir yapının etrafındaki sıvı hızlı bir şekilde hareket eder ve böylece yapı deformasyona uğrar. Aynı zamanda yapıyı saran sıvının basıncı da yapının hareketine bağlı olarak değişim gösterir.

Yapı-sıvı etkileşimine maruz plağın hareket denklemleri şu şekildedir [57, 62, 65-67]

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = F(t) \quad (4.12)$$

denklemden yer alan [M] yapısal kütle matrisi, [C] yapısal sönüm matrisi, [K] yapısal katılık matrisi, {x} yapısal yerdeğiştirme ve F(t) ise yapıya uygulanan kuvveti göstermektedir [57].

$$F(t) = -[G][A_f](\{p_i\} + \{p_s\}) \quad (4.13)$$

bu ifade de [G] yayılı yükü elemanın ilgili serbestlik derecesine dağıtan sıvı ile yapının temas noktasındaki bağ matrisi, [A_f] sıvı çözüm ağı elemanlarının alan matrisi, p_i ilk şok basıncı ve p_s plak üzerine yayılan basıncı ifade etmektedir. Plağın yüzey normali yönündeki hız bileşeni ve suyun hızı birbirine eşittir [57].

$$[G^T]\{\dot{x}\} = \{v_i\} + \{v_s\} \quad (4.14)$$

denklemden yer alan v_i su altı patlaması ile ilk olarak hareket eden su parçacığının hızını, v_s plakayla hareket eden su parçacığının hızını temsil etmektedir [57].

Su altı patlamasında ele alınan suyun sıkıştırılmaz ve sürtünmesiz olduğu kabul edilirse, plak üzerine etkiyen basıncı ve hız bileşenini şu şekilde yazılabilir [57];

$$\{p_s\} = \rho_w c_w \{v_s\} \quad (4.15)$$

ρ_w ve c_w sırasıyla suyun yoğunluğu ve sesin su içerisindeki yayılma hızı olmak üzere denklemler düzenlenirse;

$$\{p_s\} = \rho_c ([G]^T \{\dot{x}\} - \{v_i\}) \quad (4.16)$$

Denklem 4.16'daki ifade 4.13'de yerine yazılırsa kuvvet-zaman ilişkisi şu şekilde elde edilir;

$$\{F(t)\} = -[G][A_f][\{p_i\} + \rho\{c\}([G]^T \{\dot{x}\} - \{v_i\})] \quad (4.17)$$

Kuvvet ifadesini plağın hareket denkleminde yerine yazarsak;

$$[M]\{\ddot{x}\} + (C + [G][A_f][G]^T \rho_w c_w)\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[G][A_f](\{p_i\} + \rho_w c_w \{v_i\}) \quad (4.18)$$

elde edilir. Burada $\rho_w c_w$ plağın su içerisindeki hareketine bağlı olarak olarak plaktan suya geçen enerjiyi veya diğer bir ifade ile sönümü göstermektedir. 4.18 ifadesinde tek bilinmeyen terim plağın deplasmanı olan x terimidir. Tez çalışmasında plak deplasmanı Galerkin yöntemi ile bulunmuştur. Plağın hareket denklemini sudaki basıncın atmosfer basıncının altına düştüğü, yani kavitasyon başlangıcına kadar geçerlidir. 4.18 ifadesindeki sönüm terimlerini çıkarırsak, bir boyutlu plak için hareket denklemini şu şekilde elde edilir [58, 63, 68, 69].

$$[m]\{\ddot{x}\} + \rho_w c_w \{\dot{x}\} = 2P_{\max} e^{-t/\theta} \quad (4.19)$$

m plağın birim alanı başına kütesidir. Başlangıç koşulları uygulanıp $\psi_a = \rho_w c_w \theta / m$ için denklem düzenlenirse plak üzerindeki basıncın değişimi elde edilir [70].

$$P_p(t) = 2P_{\max} e^{-t/\theta} - \frac{2P_{\max} \psi_a}{(\psi_a - 1)} [e^{-t/\theta} - e^{-\psi_a t/\theta}] \quad (4.20)$$

olarak elde edilir. Plak üzerindeki pik basıncı ise;

$$P_p(t) = 2P_{\max} \psi_a^{\frac{1}{1-\psi_a}} \quad (4.21)$$

denklemini ifade edilir. Basınca bağlı olarak plak hızı ise;

$$V_{\max} = \frac{2P_{\max} \theta}{m} \psi_a^{\frac{\psi_a}{1-\psi_a}} \quad (4.22)$$

denklemleri ile elde edilir. Arkasında hava olan plağa şok dalgası tarafından aktarılan enerji miktarı E_{pa} ;

$$E_{pa} = \frac{1}{2} m V_{ma}^2 = \frac{2P_{\max}^2 \theta^2}{m} \psi_a^{\frac{2\psi_a}{1-\psi_a}} \quad (4.23)$$

şeklinde yazılır. Plağın maksimum enerjiye ulaşması için geçen zaman t_{ca} veya bir diğer ifadeyle kavitasyonun oluşması için geçen zaman;

$$t_{ca} = \frac{\theta \ln \psi_a}{\psi_a - 1} \quad (4.24)$$

olarak ifade edilir. Arkasında hava olan plağın birim alanına etkiyen impuls;

$$I_p = 2P_{\max} \theta \psi_a^{\frac{\psi_a}{1-\psi_a}} \quad (4.25)$$

ile elde edilir.

Su içerisine tamamen batmış durumda olan ve arkası su dolu olan plak için hareket denklemleri düzenlenirse;

$$m\ddot{x} + 2\rho_w c_w \dot{x} = 2P_m e^{-t/\theta} \quad (4.26)$$

şeklinde yazılabilir. Maksimum hız ise;

$$V_{ma} = \frac{P_m \theta}{m} \psi_w^{\frac{\psi_w}{1-\psi_w}} \quad (4.27)$$

yazılır ve burada $\psi_w = 2\rho_w c_w \theta / m$ olarak düzenlenebilir. Plak üzerindeki basınç, plağın arkasındaki hidrostatik basınca eşit olduğunda plak maksimum hızına ulaşmış olur. Bu durumda plağa aktarılan enerji E_{pw}

$$E_{pa} = \frac{1}{2} m V_{mw}^2 = \frac{P_{\max}^2 \theta^2}{2m} \psi_w^{\frac{2\psi_w}{1-\psi_w}} \quad (4.28)$$

birim alan başına plak üzerindeki impuls,

$$I_{pw} = 2P_{\max} \theta \psi_w^{\frac{\psi_w}{1-\psi_w}} \quad (4.29)$$

denklemleri ile ifade edilir. Plağın maksimum hıza ulaşması için geçen süre t_{cw} ise;

$$t_{cw} = \frac{\theta \ln \psi_w}{\psi_w - 1} \quad (4.30)$$

olarak yazılabilir.

Bu bölümde verilen denklemler ile su altı patlama sonucunda plak yapısına etki eden basınç yükü ve yapı-sıvı etkileşiminden kaynaklı ve plak hızına bağlı olan ilave etkiler anlatılmıştır. Yukarıda verilen denklemler ile plağın belirli bir noktasındaki basınç yükü hesaplanmasına rağmen plak yüzeyindeki toplam basıncın hesaplanması için Gauss integrasyonundan yararlanılmıştır.

4.5 Gauss İntegrasyonu ve Plak Üzerindeki Toplam Basıncın Hesaplanması

Denklem 4. 31’de Galerkin metodunun plak hareket denklemine uygulanışı verilmiştir. Su altı patlama kaynaklı şok basıncının yalnızca düşey doğrultuda etki edeceği düşünülerek basıncın x ve y bileşenleri ihmal edilmiştir. Galerkin metoduna göre basınç ifadesinin de yaklaşım fonksiyonu ile çarpılarak alan üzerinde integralinin alınması gerekmektedir.

$$\iint_A \left(L_{31}u^0 + L_{32}v^0 + L_{33}w^0 + N_3(u^0, v^0, w^0) + d_3\dot{w}^0 + \bar{m}\ddot{w}^0 - P_z \right) \psi_{mn} dA = 0 \quad (4.31)$$

$m = 1, M$ ve $n=1, N$

Denklem 4.20 ifadesi içerisinde Çizelge 4.1’de verilen TNT parametreleri yerlerine konularak düzenlenirse basınç denklemi şu şekilde elde edilir;

$$P = 2 \times 52.16 \times 10^6 \left(\frac{W_{TNT}}{R} \right)^{1/3} e^{-\frac{(t-t_d)^2}{\theta^{2.2}}} - \frac{\rho w c \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \dot{W}[m, n] \psi}{R_0 / R} \quad (4.32)$$

Denklem 4.31’in basınç ile ilgili terimlerine göre Galerkin yönteminin uygulanması sırasında basınç ifadesi, yaklaşım fonksiyonu ile çarpılmaktadır. Bu durumda basınç ile ilgili terim;

$$\int_0^a \int_0^b P \cdot \psi \cdot dx dy \quad (4.33)$$

şeklinde ifade edilir. Seçilen yaklaşım fonksiyonununun düşey bileşeni ise;

$$\psi_{mn} = \sin\left[\frac{\pi x}{a}\right] \sin\left[\frac{n\pi x}{a}\right] \sin\left[\frac{m\pi y}{b}\right] \sin\left[\frac{\pi y}{b}\right] \quad (4.34)$$

ile verildiği için ifadeler yerlerine konularak tekrar düzenlenirse;

$$\int_0^a \int_0^b \left(1.0432 \times 10^8 e^{-\frac{7.490109864870828 \times 10^8 (t-t_d)^2}{\left(\frac{W^{1/3}}{\sqrt{R_0^2+x^2+y^2}}\right)^{2.2}} \left(\frac{W_{TNT}^{1/3}}{\sqrt{R_0^2+x^2+y^2}}\right)^{1.13}} \right) \left(\sin\left[\frac{\pi x}{a}\right] \sin\left[\frac{n\pi x}{a}\right] \sin\left[\frac{m\pi y}{b}\right] \sin\left[\frac{\pi y}{b}\right] \right) dy dx \quad (4.35)$$

şeklinde elde edilir. Bunun yanı sıra; basınç ifadesi yapı sıvı etkileşimi dikkate alındığında karmaşık bir hal alacaktır. Bu gibi durumlarda, analitik olarak integralin hesaplanması zor veya bazen mümkün olmadığı için, integrallerinin alınmasında sayısal integrasyon yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Bu çalışmada basınç ve yaklaşım fonksiyonun çarpılması sonucu elde edilen ifadenin integralinin hesaplanabilmesi için Gauss--Legendre integrasyonundan faydalanılmıştır. Bu işlem için MATHEMATICA yazılımı kullanılarak bir algoritma geliştirilmiştir.

Karmaşık veya kompleks ifadelerin integralleri alınırken kullanılan Gaussian integral formülleri en genel halde şu şekilde yazılabilir;

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=1}^N w_i f(\xi_i) \quad (4.36)$$

burada w_i ve x_i katsayılarıdır. x_i noktanın yaklaşık değeridir.

Gaussian integral formülleri genellikle $[-1,1]$ integrasyon aralığında oldukça hızlı cevap verirler. Bu nedenle integral sınırları $[-1,1]$ olacak şekilde basit bir dönüşüm formülü uygulanır. Bu işlem sadece matematiksel olarak işlemleri kolaylaştırmak ve formülü genel bir şekilde ifade etmek adına yapılır. Değişken dönüşümü yardımı ile;

$$\int_{-1}^1 f(\xi) d\xi = \frac{b-a}{2} \int_{-1}^1 f\left(\frac{b-a}{2}\xi + \frac{b+a}{2}\right) d\xi \approx \frac{b-a}{2} \sum_{i=1}^n w_i f\left(\frac{b-a}{2}\xi_i + \frac{b+a}{2}\right) \quad (4.37)$$

olarak yazılabilir.

Toplam fonksiyonu Gauss-Legendre kuralı olarak isimlendirilir. $[-1,1]$ aralığında Gauss fonksiyonu içerisindeki ξ_i Legendre polinomunun kökleri olarak tanımlanır. n mertebeden Legendre polinomu şu şekilde yazılır;

$$P_n = \frac{1}{2\pi i} \oint (1-2t\xi+r^2)^{-1/2} t^{-n-1} dt \quad (4.38)$$

şeklinde ifade edilir. Ağırlıklar olarak tanımlanan w_i ise;

$$w_i = \frac{2}{(1 - \xi_i^2)[P_n'(\xi_i)]^2} \quad (4.39)$$

olarak yazılır. Bu çalışmada basınç ve yaklaşım fonksiyonun çarpılması sonucu elde edilen ifadenin integralinin hesaplanabilmesi için 12 noktalı Gauss--Legendre integrasyonundan faydalanılmıştır. 12 noktalı Gauss-Legendre integrasyonunda ağırlıklar w_i ve ξ_i şu şekildedir. Çizelge 4. 2'de tez çalışmasında kullanılan Gauss-Legendre fonksiyonu için katsayılar verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Gauss-Legendre fonksiyonu için katsayılar

i	w_i	ξ_i
1	0,2491470458134028	-0,1252334085114689
2	0,2491470458134028	0,1252334085114689
3	0,2334925365383548	-0,3678314989981802
4	0,2334925365383548	0,3678314989981802
5	0,2031674267230659	-0,5873179542866175
6	0,2031674267230659	0,5873179542866175
7	0,160078328543362	-0,7699026741943047
8	0,160078328543362	0,7699026741943047
9	0,1069393259953184	-0,9041172563704749
10	0,1069393259953184	0,9041172563704749
11	0,0471753363865118	-0,9815606342467192
12	0,0471753363865118	0,9815606342467192

4.6 Kompozit Plakların Hasar Teorileri

Tabaka şeklindeki katmanlı kompozit malzemelerin hasar veya kırılma özellikleri incelenirken çekme veya basma deneylerinden elde edilen veriler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde dayanım değerleri malzeme eksenleri ile ilgilidir. Kompozit malzemelerin dayanım karakterlerine bağlı olan teoriler izotropik malzemelerden daha karmaşıktır ve dayanım özellikleri, eksenel dayanım özelliklerine bağlıdır.

Kompozit malzemelerin 1,2,3 eksenindeki mukavemetleri aşağıdaki gibi isimlendirilmektedir [71].

X^C, X^T : 1 yönünde maksimum basma ve çekme dayanımı

Y^C, Y^T : 2 yönünde maksimum basma ve çekme dayanımı

Z^C, Z^T : 3 yönünde maksimum basma ve çekme dayanımı

S_{12} : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

S_{23} : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

S_{13} : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

$\varepsilon_1^C, \varepsilon_1^T$: 1 yönünde maksimum basma ve çekme birim uzaması

$\varepsilon_2^C, \varepsilon_2^T$: 2 yönünde maksimum basma ve çekme birim uzaması

$\varepsilon_3^C, \varepsilon_3^T$: 3 yönünde maksimum basma ve çekme birim uzaması

γ_{12}^F : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısı

γ_{23}^F : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı

γ_{13}^F : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı

Katmanlı kompozit malzemelerin hasar indeksleri incelenirken birçok farklı teoriden faydalanılır. Bu bölümde hasar teorilerinden önemli olanları hakkında genel bilgiler verilmeye çalışılmıştır.

4.6.1 Maksimum Gerilme Teorisi

Bu teori Jenkins tarafından ortaya atılmıştır. Maksimum gerilme teorisi, maksimum normal gerilme teorisinin ortotropik malzemelerin hasarına uygulanmış halidir. Her üç

yönde aşağıdaki kriterler sağlandığı durumda hasar meydana gelmeyecektir [72]. σ_1 , σ_2 , σ_3 sırasıyla x, y ve z yönünde hesaplanan normal gerilmeleri, τ_{12} , τ_{13} , τ_{23} ise hesaplanan kayma gerilmelerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} -X^C < \sigma_1 < X^T \\ -Y^C < \sigma_2 < Y^T \\ -Z^C < \sigma_3 < Z^T \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} -S_{12} < \tau_{12} < S_{12} \\ -S_{23} < \tau_{23} < S_{23} \\ -S_{13} < \tau_{13} < S_{13} \end{aligned} \quad (4.41)$$

4.6.2 Maksimum Birim Şekil Değişirme Teorisi

Maksimum birim şekil değişirme teorisi St.Venant maksimum birim şekil değişirme teorisinin kompozit malzemelerin hasarı için özelleştirilmiş halidir. $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ sırasıyla x,y,z yönlerindeki normal gerinimleri, $\gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}$ ise hesaplanan kayma gerinimlerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} -\varepsilon_1^C < \varepsilon_1 < \varepsilon_1^T \\ -\varepsilon_2^C < \varepsilon_2 < \varepsilon_2^T \\ -\varepsilon_3^C < \varepsilon_3 < \varepsilon_3^T \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} -\gamma_{12}^F < \gamma_{12} < \gamma_{12}^F \\ -\gamma_{23}^F < \gamma_{23} < \gamma_{23}^F \\ -\gamma_{13}^F < \gamma_{13} < \gamma_{13}^F \end{aligned} \quad (4.43)$$

4.6.3 Hoffman Teorisi

Hofmann teorisine göre hasar ve kırılma olmaması için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır. σ_x, σ_y sırasıyla x ve y yönünde hesaplanan normal gerilmeleri, $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ise hesaplanan kayma gerilmelerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_x^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_y^2}{Y^T Y^C} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz}}{S_{23}} \right)^2 + \left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) \sigma_x \\ + \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right) \sigma_y - \frac{\sigma_x \sigma_y}{X^T X^C} \leq 1 \end{aligned} \quad (4.44)$$

4.6.4 Hashin Teorisi

Hashin teorisi kompozit katmanlarının herbirinin hasarını ayrı ayrı analiz etmekte kullanılır. Bu teoriye göre matris yapıda veya elyafta hasar olup olmadığı incelenebilmektedir. Hashin teorisine göre 4 farklı hasar modu mevcuttur. Bunlar sırasıyla elyaf üzerinde çekme, elyaf üzerinde basma, matris üzerinde çekme ve matris üzerinde basma olması durumlarıdır.

Elyaf üzerinde çekme gerilmesi olduğu durumda aşağıdaki koşul sağlanırsa yapıda hasar meydana gelmez. $\sigma_{11} \geq 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} < 1 \quad (4.45)$$

Elyaf üzerinde basma durumunda hasar olmaması için aşağıdaki koşul sağlanmalıdır $\sigma_{11} < 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 < 1 \quad (4.46)$$

Matris üzerinde çekme gerilmesi olması durumunda hasar olmaması için $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$;

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} < 1 \quad (4.47)$$

Matriste basma gerilmesi olması durumunda hasar olmaması için $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$;

$$\left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} \right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} < 1 \quad (4.48)$$

4.6.5 Tsai-Hill Teorisi

Tsai-Hill teorisi izotrop malzemeler için geçerli olan Von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış özel bir halidir. Buna göre yapıda hasar olmaması için sağlanması gereken kriter şu şekildedir.

$$\left(\frac{\sigma_x}{S_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{S_2} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz}}{S_{23}} \right)^2 - \frac{\sigma_x \sigma_y}{S_1^2} \leq 1 \quad (4.49)$$

burada;

$$\begin{aligned}
S_1 &= X^C \quad \text{eğer } \sigma_x \leq 0 \\
S_1 &= X^T \quad \text{eğer } \sigma_x > 0 \\
S_2 &= Y^C \quad \text{eğer } \sigma_y \leq 0 \\
S_2 &= Y^T \quad \text{eğer } \sigma_y > 0
\end{aligned} \tag{4.50}$$

olarak alınmalıdır.

4.6.6 Tsai-Wu Teorisi

Tsai-Wu hasar teorisi katmanlı kompozit malzemelerin hasar analizlerinde en çok kullanılan yöntemdir. Buna göre aşağıdaki şartlar sağlandığı durumlarda malzemede herhangi bir hasar meydana gelmeyecektir.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1 \quad i, j=1, 2, \dots, 6. \tag{4.51}$$

$$\left[\left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right) \sigma_2 + \left(\frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C} \right) \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^C} \right. \\
\left. + \frac{\sigma_3^2}{Z^T Z^C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 \right] < 1 \tag{4.52}$$

$$F_{12}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Y^T Y^C} \tag{4.53}$$

$$F_{23}^2 = \frac{1}{Y^T Y^C} \frac{1}{Z^T Z^C} \tag{4.54}$$

$$F_{13}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Z^T Z^C} \tag{4.55}$$

Maksimum gerilme teorisi ve maksimum şekil değiştirme teorilerinde kayma gerilmesinin normal gerilme ile ilişkisi bulunmamaktadır. Hashin teorisinde kayma gerilmeleri ile normal gerilmelerin etkileşimleri yer almaktadır. Bu çalışmada; diğer teorilere göre daha konservatif olması sebebiyle Tsai-Hill ve Tsai-Wu hasar teorileri kullanılmıştır.

OPTİMİZASYON

Optimizasyon, bir problemin çözümünde matematiksel modeller geliştirilerek, daha iyi bir sonuç elde edilinceye kadar olası tüm çözümlerin amaç işlevine göre aranması ve karşılaştırılması işlemlerinin tümüdür. Optimizasyon amaç sayısı bakımından tek amaçlı veya çok amaçlı olmak üzere ikiye ayrılır. Klasik optimizasyon yöntemleri ile tek bir amaç fonksiyonuna sahip problemler tek bir adımda çözülebilirler ancak; çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde birbirleri ile çelişen bir çok amaç aynı anda çözülmelidir. Bu yüzden çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde topluluk tabanlı optimizasyon yöntemleri tercih edilmektedir. Bu bölümde Genetik algoritmalar hakkında genel bilgiler verilerek, çok amaçlı optimizasyon yöntemleri anlatılmıştır. Genetik algoritma yöntemlerinden olan Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm NSGA-II) işlem adımları anlatılmıştır.

5.1 Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar (GA), en iyi çözümü ararken biyolojik ifadelerden (seçme, çaprazlama, mutasyon, elitizm vb.) faydalanırlar. Genetik algoritmaların diğer optimizasyon yöntemlerinden farkı tek bir çözüm yerine her adımda çözümlerden oluşan bir topluluk oluşturmalarıdır. Bu nedenle; genetik algoritmalarda her adımda bir çözüm topluluğu kullanıldığı için, elde edilen sonuçlar da bir çözüm topluluğu olacaktır. Çok sayıda en iyi çözümün bir adımda bulunabilmesi, genetik algoritmaların en önemli özelliklerindedir. Bunun yanı sıra genetik algoritmalar, çözüm uzayının büyük olmasına rağmen iyi bir çözüme kısa zamanda ulaşırlar. Genetik algoritmada, her bir çözüm bir dizi (birey) olarak adlandırılmaktadır ve bireylerin oluşturduğu topluluk ile

çözümüne ulaşılmaktadır. Genetik algoritmaların temelleri, ilk defa 1975 yılında John Holland tarafından atılmıştır [73].

GA parametreleri, biyolojideki genleri temsil ederler ve parametrelerin toplu kümesi de kromozomları oluştururlar. GA'ların her bir ferdi yani her bir aday çözüm kromozom şeklinde temsil edilir. Bu aday çözümler kümesi de popülasyon olarak adlandırılır. GA başlamadan önce optimizasyon problemini tanımlayan bir amaç fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. GA optimizasyonuna başlandığında başlangıç popülasyonu rastgele seçilir. Popülasyon içerisindeki her bir birey ikili düzende veya tamsayı olarak kodlanabilmektedir. Kodlama işleminin ardından, amaç fonksiyonu, parametrelere ve girişlere göre hesaplanır. Bireyler değerlendirme aşamasında belirli amaç fonksiyonunda gösterdikleri uygunluklarına göre değerlendirilir ve uygunluk değerlerinin yüksekliğine göre daha büyük bir olasılıkla seçim metodlarından birisi yardımı ile seçilmektedirler. Seçme metoduyla bir sonraki nesili üretecek anne-baba bireyler seçilirler. Seçilen bireyler çaprazlama havuzuna gönderilirken diğerleri ise yok olurlar.

Çaprazlama ile çocuk bireyler veya başka bir ifade ile yeni çözüm önerileri üretilir. Çaprazlama bir olasılık değeri ile yapılır. Eğer çaprazlama meydana gelmez ise ebeveynler aynen bir sonraki popülasyona aktarılır. Farklı bireylerin oluşturulması, çeşitliliğin sağlanması ve çaprazlama sonucunda kaybolabilen iyi özelliklerin geri kazanılabilmesi için mutasyon işlemi uygulanır ve en iyi bireyler çözümlere eklenir. Son olarak; belirlenen adım sayısına ulaşıldığında veya sonlandırma kriteri sağlandığında GA'nın bir adımı tamamlanmış olur.

5.2 Genetik Algoritma İçin Biyolojik Altyapı

GA'nın tam olarak anlaşılması için öncelikle bazı terimlerin bilinmesi gerekmektedir. GA terminolojisinde kullanılan terimler bu bölümde verilmiştir.

5.2.1 Gen

GA terminolojisi içinde anlamlı bilgi taşıyan en küçük birime denir [74]

5.2.2 Kromozom

Birden fazla genin bir araya gelmesi ile oluşan diziye kromozom denir [74].

5.2.3 Popülasyon

Kromozomların bir araya gelerek oluşturduğu topluluğa popülasyon denir. Popülasyondaki kromozom sayısının artması sonucu çözüme ulaşma süresi kısalmır [75].

5.2.4 Kodlama

Herhangi bir probleme GA uygulanmadan önce verinin uygun şekilde kodlanması gerekmektedir. Genetik modelin hızlı çalışması için kodlamanın doğru yapılması gerekmektedir.

5.2.5 Ebeveyn

Popülasyon oluşturulduktan sonra, uygunluk fonksiyonundan dönen değere göre yüksek değere sahip olan ve popülasyondaki diğer bireyler ile çoğalma fırsatı verilen bireylere ebeveyn denir.

5.2.6 Çocuk

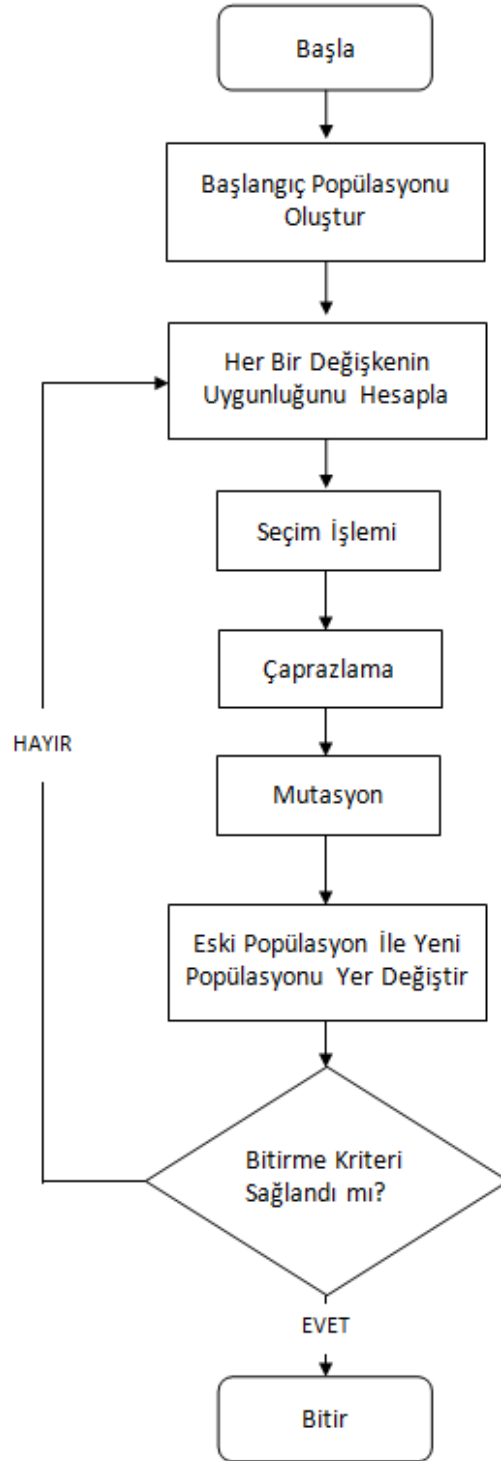
Çocuklar ebeveynlerin çaprazlama ve mutasyona tabi tutulması sonucunda oluşturulur. Çaprazlama rastgele bir çaprazlama noktası seçilmesi ve ebeveynlerin genetik bilgilerinin birleştirilmesiyle yapılır [76].

5.2.7 Uygunluk

Kromozomların, çözümde gösterdikleri başarı derecesini belirleyen bir değerlendirme işlemidir. Hangi kromozomların bir sonraki nesile taşınacağı ve hangi kromozomların yok olacağına uygunluk değerlerinin büyüklüğüne göre karar verilir.

5.3 Genetik Algoritma İşlem Adımları

Standart bir GA programı için geçerli olan işlem adımları ve akış şeması Şekil 5. 1’de verildiği gibidir.



Şekil 5. 1 Genetik algoritma akış şeması

GA işlem adımlarından ilki, olası çözümlerin oluşmasını sağlayacak kromozomlardan oluşan başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıdır. Bu işlem için belirlenen bir sayı yoktur ve popülasyon büyüklüğü problemin tipine göre değişmektedir. Rastgele üretilen popülasyondaki parametreler, amaç fonksiyonunda yerlerine konularak uygunluk değerleri hesaplanır ve değerlendirilirler. Bazı mühendislik problemlerinde başlangıç popülasyonunun oluşturulması, başlangıçta bilinen bazı çözümler üzerinden yapılır, yani popülasyon tamamen rastgele olarak değil de bir kısmı bilinen değerlerden oluşturulur. Popülasyon büyüklüğünün seçimi problemin çözümünü veya çözüm süresini doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra; popülasyonun büyük seçilmesi çözüm süresini uzatırken, az sayıda seçilmesi kromozomların çeşitliliğinde azalmaya neden olacağından çözümün hassasiyetini düşürecektir [77].

5.3.1 Uygunluk Değerinin Hesaplanması

GA sürecinde gelecek nesillere aktarılacak bireylerin seçimini sağlayabilmek için bir uygunluk kriterinin belirlenmesi gerekmektedir. Popülasyondaki bireyler ve ebeveynlerinden üretilmiş çocukları için bir hesap yapılır ve herbir bireye bir uygunluk değeri atanır. Bireylerin herbirine atanan bu atanan değer, çözüm kümesi içerisindeki yerlerini belirler. Çözümü istenen problem için uygunluk fonksiyonları belirlenmelidir. Belirli bir kromozom için uygunluk fonksiyonu, o kromozomun temsil ettiği çözümün kullanımıyla veya yeteneğiyle orantılı olan sayısal bir değer verir. Problemin tipine bağlı olmak şartıyla, bir çözümün uygunluk değeri ne kadar büyük ise, yaşama ve çoğalma şansı artmaktadır [78, 79].

5.3.2 Genetik Algoritmanın Kodlanması

GA programlamasında öncelikle, problemi oluşturan değişkenlerin kromozomları oluşturan her bir gende kodlanması işlemi gerçekleştirilir. Optimizasyon döngüsü başlamadan önce optimize edilmesi gereken parametrelerin istenilen şekle dönüştürülmesi işlemine kodlama (encoding) denir. Genetik algorithmada bireylerin kodlanması ikili sayı kodlama, gerçel sayı kodlaması veya gray kodlama biçimlerinden herhangi birisi yardımı ile yapılır. Bu kodlama tipleri içerisinde en çok kullanılanı ikili kodlamadır. Bu kodlama sisteminde kromozomlar, 0'lar ve 1'lerden oluşan dizilerdir.

Her parametre için n bit kullanılır. Uygunluk fonksiyonları, kromozomları problemin parametreleri haline getirmektedirler ve hesap yapmaktadırlar [80, 81].

Kromozomlar bit gösterimi ile Şekil 5. 2’de verildiği gibi hafızada tutulmaktadır. Her bit rastgele olarak tutulmaktadır.

1	0	0	1	0	1
---	---	---	-----	-----	-----	---	---	---

Şekil 5. 2 Kromozom gösterimi

5.3.2.1 İkili (Binary) Kodlama Yöntemi

İkili kodlamalar en çok tercih edilen kodlamalardır ve birçok çalışmada ikili kodlama kullanılmıştır. Kromozomları oluşturan genler 0 veya 1 değerini alırlar. Gray kodlamanın en büyük dezavantajı Hamming Ciff olayıdır. Buna göre uygunluk değerinde çok küçük bir değişiklik olması için, birçok bitin değiştirilmeye ihtiyaç duymasındır[82]. Şekil 5. 3 ve Şekil 5. 4’te ikili ve gray kodlama örnekleri verilmiştir.

Kromozom 1	11011001000110110
Kromozom 2	11011111010101100

Şekil 5. 3 İkili kodlama gösterimi

	Binary (İkili)	Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110

Şekil 5. 4 İkili ve Gray kodlama gösterimi

5.3.2.2 Gerçel Sayı veya Değer Kodlama Yöntemi

Gerçel sayılar veya değerlerin kullanıldığı kodlama şekline gerçel sayı veya değer kodlama adı verilmektedir. Şekil 5. 5’de verildiği gibi pek çok uygulamada alfabetik karakterler veya gerçek sayısal değerler kullanılmaktadır.

Kromozom 1	2.354 4.123 0.2336 3.6534 0.5345
Kromozom 2	ADBJEKLEGRTSLMFDWREKPDADR
Kromozom 3	(kırmızı),(sarı),(yeşil),(mavi),(siyah),(beyaz)

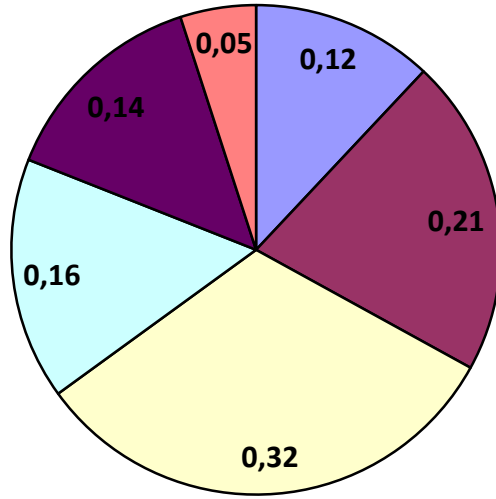
Şekil 5. 5 Değer kodlama gösterimi

5.3.3 Seçim Mekanizması

Seçim mekanizması; puan değerine bağlı olarak, bireylerin üreme için sonraki topluluğun (anne-baba) adayları arasından seçilmesi olarak tanımlanabilir. Bir başka ifade ile bir ebeveyn topluluğu bir seçme mekanizması kullanılarak belirlenir. Oluşturulacak olan bir sonraki kuşak için yavru meydana getirecek bireylerin nasıl seçileceği ve her bir bireyin kaçar tane yavruya sahip olacağı öncelikle belirlenmelidir [83]. Seçme mekanizması için üç farklı yöntem kullanılır. Bunlar sırasıyla; Rulet çarkı seçimi, turnuva seçimi ve stokastik evrensel örnekleme yöntemleridir.

5.3.3.1 Rulet Çarkı Seçim Mekanizması

Bu yöntem puan orantılı seçme mekanizmasıdır ve uygunluk değerlerine göre ebeveyn topluluğunu seçmektedir. Rulet çarkı seçim tekniğinin uygulanması için öncelikle, kromozomların toplam uygunluk değeri hesaplanmalıdır. Herbir popülasyon bireyi için hesaplanan uygunluk değerleri bir çarkın dilimlerini oluşturmaktadır. Uygunluk değeri büyük olanın çarktaki yeri de büyük olacaktır ve bu durumda popülasyondaki bu bireylerin seçilme olasılığı artacaktır. Kromozomlar, toplam uygunluk değerine bölünerek her bir kromozom için 0-1 arasında değişen seçim ihtimalleri veya seçim olasılıkları hesaplanır. Ardından kümülatif ihtimaller hesaplanır. Popülasyon sayısı kadar yani çark toplam birey sayısı kadar çevrilerek, rastgele 0-1 arasında sayılar üretilir. Üretilen rastgele sayı birinci kromozomun kümülatif seçim ihtimalinden küçük ise, birinci kromozom seçilir. Değil ise, diğerlerinin kümülatif ihtimalleriyle karşılaştırılarak hangisi küçük ise o kromozom seçilir [84-88].



Şekil 5. 6 Uygunluk değerlerine göre bireylerin rulet çemberine yerleşimi

Şekil 5. 6'da uygunluk değerlerine göre bireylerin rulet çemberindeki yerleşimi ve kapladıkları alanları görülmektedir.

5.3.3.2 Stokastik Üiversal Seçim Mekanizması

Genel olarak tek bir seçim yaparak, tüm N sayıdaki bireyi örnekleme mantığına dayanmaktadır. Bunun için rulet çemberine seçim çemberi adı verilen bir parça eklenir. Bu parça eşit aralıklı N adet göstergeye ayrılmıştır. Bu sayede birden fazla birey tek seferde seçilmiş olacaktır. Çember bir kez çevrilir ve durduğu anda göstergelerin bulunduğu yerler bireyleri gösterir [74, 77-79, 86, 88-90].

5.3.3.3 Sıralı (Rank) Seçim Mekanizması

Rulet tekerleği seçimi, uygunluklar birbirlerine göre çok farklılık gösterdiği durumlarda sorunlara yol açabilmektedir. Bir popülasyon içerisinde % 95 gibi uygunluğu yüksek olan kromozomun yanında diğer kromozomların seçilme olasılığı yok denecek kadar azdır. Sıralı (Rank) seçimi, öncelikle popülasyonu sıralamakta ve her kromozomun bu popülasyondaki yerine bakmaktadır. Bu işlem sayesinde bütün kromozomların seçim şansı olacaktır.

5.3.3.4 Turnuva Seçim Mekanizması

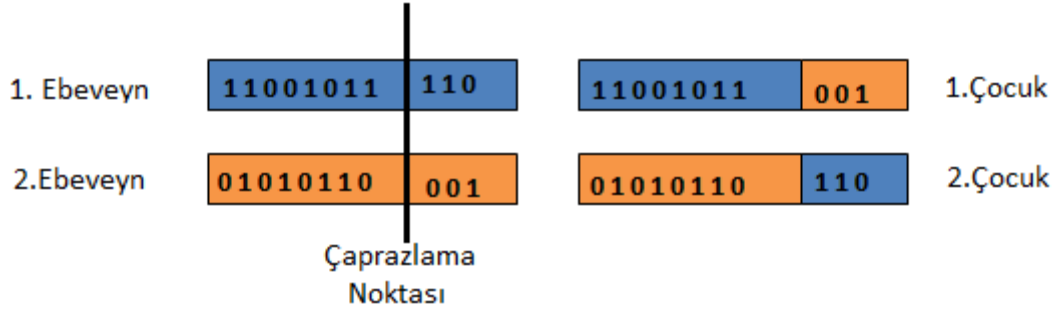
Seçim mekanizmaları arasında en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Turnuva seçiminde, belirli sayıdaki birey o anda mevcut olan popülasyon içerisinde seçilir ve bu bireylerden en uygun olanı yani uygunluk değeri en iyi olan birey alınarak yeni popülasyona aktarılır. Diğer bireyler mevcut popülasyonun içinde bırakılarak seçilme şansları devam ettirilir. Turnuva yöntemi her seferinde yalnız bir kazanan olacağını varsaymaktadır. Seçme işlemi, gelecek popülasyonun tamamlanmasına yetecek kadar sık tekrarlanır. Turnuva yönteminde ayrıca, turnuvanın boyutu bireylerin sayısına eşit alınırsa, seçilen birey o anki popülasyon içerisindeki en iyi birey olacaktır [84-90].

5.3.3.5 Elitist Seçim Mekanizması

Elit birey, bir popülasyonda uygunluk değeri en iyi olan birey anlamına gelmektedir. En iyi uygunluk değerine sahip birey veya belirli bir yüzdeye giren en iyi bireyler korunarak yeni popülasyona doğrudan eklenir. Ancak elitizm dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Aksi halde çeşitlilik kaybına neden olabilmektedir. Tek amaçlı GA'larda yalnızca bir tek en iyi birey olduğu için elitizm uygulanması daha kolaydır. Ancak çok amaçlı GA'larda tek bir en iyi birey yerine en iyi bireylerden oluşan bir küme söz konusudur. Bu durumda elitizm uygulanması daha zordur. Çok amaçlı GA'larda elit bireyler bir kümede saklanmakta ve bir sonraki popülasyona aktarılmaktadır [86, 87, 89, 90] .

5.3.4 Çaprazlama Mekanizması

Çaprazlama mekanizması, ebeveyn (eşleşme) havuzundan bazı genleri seçerek yeni bireylerin oluşturulması olarak özetlenebilir. Bu işlem için, kromozomların bulunduğu eşleme havuzundan iki adet kromozom seçilir. Eşleme sürecinde, seçilen kromozomlardan bir ve birden fazla yeni nesil oluşturma olayına "çaprazlama" denir. Literatürde kullanılan birçok çaprazlama mekanizması vardır. En yaygın olarak kullanılan, iki kromozomdan iki tane yeni nesil elde edilmesidir. Ebeveyn havuzundan rastgele seçilen iki birey, ikili kodları bir noktadan kesilerek bölümlere ayrılır ve bu iki bireyin kesilen parçaları birbirleri ile yer değiştirilerek iki yeni birey elde edilir. Çaprazlama işlemi tek noktadan, daha fazla noktadan, düzgün veya karışık olarak yapılabilmektedir. Şekil 5. 7'de tek noktadan çaprazlama işlemine bir örnek verilmiştir.

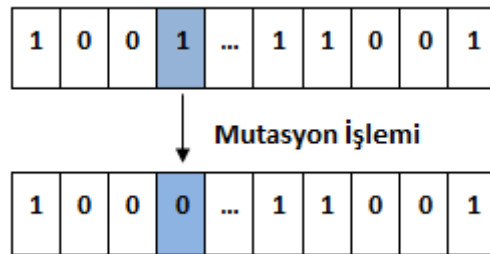


Şekil 5. 7 Tek noktalı çaprazlama

Çaprazlama sonucunda elde edilen bireylerin ebeveynlerine göre daha iyi olması beklenmektedir. Ancak bu her zaman mümkün olmamaktadır. Eğer çaprazlamaya uğrayacak bireyler birbirlerine çok benzerler ise elde edilen bireylerde birbirlerine çok benzeyeceklerdir ve bu durum popülasyondaki çeşitliliği azaltacaktır. Eğer çaprazlama işlemi ile bireyler arasındaki benzerlik giderilemez ise mutasyon işlemi yapılmalıdır.

5.3.5 Mutasyon Mekanizması

Çaprazlama işleminden sonra uygulanan işlem mutasyondur. Mutasyon, kromozomdaki bitlerin ufak bir yüzdesini değiştirir. Kromozomda, mutasyon olasılığına göre rastgele bitlerden "1" olanlar "0" ve "0" olanlar ise "1" olarak değiştirilir. Eğer rastgele seçilmiş sayı, mutasyon olasılığından düşük ise mutasyon işlemi uygulanır. Mutasyon işlemi ile popülasyon içerisindeki çeşitlilik arttırılmaktadır. Mutasyon oranının yüksek seçilmesi çeşitliliği azaltmaktadır. Şekil 5. 8'de mutasyon işleminin uygulanması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. 8 Mutasyon işleminin uygulanması

5.3.6 Genetik Algoritmalarda Parametre Seçimi

GA'ların kontrol parametrelerinin doğru bir şekilde seçimi algoritmanın performansını etkileyen en önemli etkenlerdendir. Parametre, olarak şunlar sıralanabilir. Popülasyon büyüklüğü, maksimum jenerasyon sayısı, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı [91].

5.3.6.1 Popülasyon Büyüklüğü

Popülasyonun aşırı küçük seçilmesi algoritmanın, arama uzayının daralmasından dolayı belirli bir alt optimal noktaya doğru sürüklenmesine neden olmaktadır. Popülasyonun aşırı büyük seçilmesi ise; GA programının bir jenerasyonu tamamlayabilmesi için gerekli süreyi uzatmaktadır, bu durum gerçek zamanlı uygulamalarda büyük problemlere neden olmaktadır [92].

5.3.6.2 Çaprazlama Oranı

Çaprazlama oranının düşük seçilmesi durumunda; yeni nesle çok az sayıda yeni yapı girecektir. Üreme operatörü algoritma içerisinde etkili operatör haline gelmekte ve araştırma işleminin sonuca ulaşma hızını düşürmektedir. Yüksek çaprazlama oranının kullanılması durumunda ise, çaprazlama operatörü benzer veya daha iyi yapıları üretmeden kuvvetli olan yapılar bozulduğundan algoritmanın performansı azalmaktadır [92].

5.3.6.3 Mutasyon Oranı

Mutasyon oranının yüksek seçilmesi, araştırmaya aşırı derecede rastgelelik katacağı için sonuca ulaşmak zorlaşacaktır. Popülasyonun gelişmesi duracak ve geriye gitme olacaktır. Bu oran küçük tutulur ise, araştırma uzayının tamamı taranamayacaktır ve problem alt optimal çözüme doğru gidecektir [92].

Bunların yanı sıra; bitirme koşulunun seçimi, kaç noktada çaprazlama yapılacağı ve kodlamanın nasıl yapıldığı GA performansını etkileyen diğer hususlardır.

5.4 Çok Amaçlı Genetik Algoritmalar

Optimizasyon problemleri amaç sayısına göre tek amaçlı ve çok amaçlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek amaçlı problemler tek bir amaç fonksiyonu ile, çok amaçlı problemler ise birden fazla amaç fonksiyonu ile optimize edilirler.

Çok amaçlı optimizasyonun tek amaçlı optimizasyondan en önemli farkı, aynı anda birbirleriyle çelişen amaçların (kalınlık ve gerilme gibi) olduğu problemlerle uğraşmalarıdır. Örneğin, karmaşık bir tasarım düşünüldüğünde yüksek mukavemet hedeflenirken kalınlıkların da minimize edilmesi gerekmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi birden fazla amaç olduğunda bunlardan bazıları kısıt olarak tanımlanabilir. Örneğin, bir sistem yüksek performans ve düşük maliyet ile optimize edilirken, sistemin belirli boyutları geçmemesi ayrı bir optimizasyon kriteri olarak tanımlanabilir.

Çok amaçlı genetik algoritmalar (ÇAGA) mühendislik problemlerinin birçoğunun çözümünde kullanılırlar. Çünkü problemlerin birçoğu çok amaçlıdır. Çok amaçlı problemlerin çözümü tek amaçlı problemlere göre oldukça karmaşık ve zordur. Bu nedenle ÇAGA'nın kullandığı birçok kavram vardır. Bu kavramlar aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır [89, 93].

5.4.1 Optimizasyon Parametreleri

Parametre veya karar vektörü şu şekilde yazılabilir:

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_N]^T \quad (5.1)$$

bu ifadede yer alan T transpozeyi ve N ise parametre sayısını göstermektedir. Parametrelerin sınırları doğru bir şekilde belirlenmelidir. Aksi halde parametrelerin yanlış seçilmesi sonucu arama uzayı büyüyebilir ve bunun sonucu olarak çözüm süresi oldukça uzayabilir veya sonuca ulaşılamayabilir [89, 94].

5.4.2 Amaç Fonksiyonu

Çok amaçlı optimizasyon problemleri için k amaçlı bir amaç fonksiyonu şu şekildedir:

$$F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T \quad (5.2)$$

Her amaç fonksiyonu minimizasyonu veya maksimizasyonu hedeflemektedir. Parametre uzayının yanı sıra birde amaç uzayı söz konusudur. Her x değerine karşılık, amaç uzayında bir nokta bulunur ve bu nokta $f(x) = z$ olarak gösterilir[89, 94].

5.4.3 Baskınlık ve Pareto-Optimalliği

Çok amaçlı optimizasyon ile ilgili ilk çalışmalar Pareto tarafından verilmiştir ve Pareto optimizasyonu olarak adlandırılmıştır [95]. Çok amaçlı bir maksimizasyon problemi, amaçların değişik kombinasyonlarına göre değişik çözümlerden oluşan bir çözüm kümesine sahiptir. En uygun çözümler hiçbir çözümün kendisine üstünlük sağlayamadığı çözümlerdir. Çok amaçlı optimizasyonda kullanılan bazı tanımlar bir maksimizasyon problemi için aşağıda verilmiştir [89, 94].

Baskınlık: Bir karar vektörü (x_1), başka bir karar vektörüne (x_2) şu koşullar altında baskın olur.

x_1 tüm amaç fonksiyonlarında x_2 'den daha iyi ise $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$

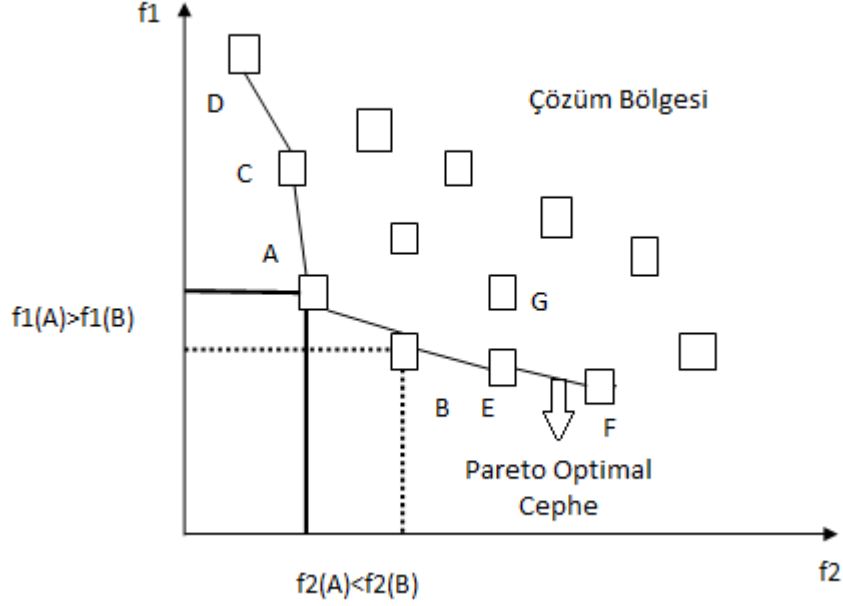
x_1, x_2 'den en azından bir amaç fonksiyonunda iyi ise $f_k(x_1) < f_k(x_2)$

$f(x_1)$ amaç fonksiyonu $f(x_2)$ 'ye baskındır denir. Bir en iyileme probleminin çözümleri, baskın olmayan veya üstün noktalar türünden matematiksel olarak ifade edilir. Örneğin; bir maksimizasyon probleminde, x_1 şeklinde bir vektör, x_2 şeklindeki bir vektörden daha büyük tanımlanır ve $x_2 \prec x_1$ şeklinde gösterilir. Buna göre, x_2 'nin hiçbir değeri x_1 'den büyük değilse, x_2 'nin en az bir değeri x_1 'den küçüktür. Bu durumda x_1, x_2 'den kısmen dahi olsa büyükse x_1, x_2 'yi domine eder.

Pareto-Optimal: Bir karar vektöründe (x^*) baskın olan başka bir karar vektörü yoksa Pareto-optimal olarak adlandırılır. Amaç vektörü ($f^*(x)$) x 'in Pareto-optimal olduğu durumda Pareto-optimaldir.

Pareto-Optimal Küme: Pareto-optimal karar vektörleri veya Pareto-optimal bireylerden oluşan kümedir. Diğer bir ifade ile; çok amaçlı optimizasyonda, her çözümün diğer çözümlerin her birinden en az bir kriter fonksiyonuna göre daha iyi olduğu çözüm kümesidir.

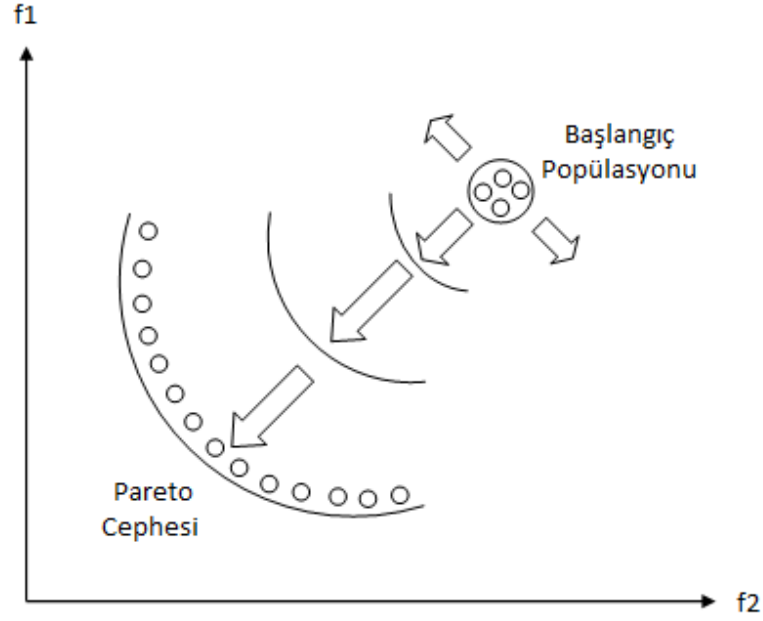
Pareto-Optimal Cephe: Pareto-optimal cephe tüm amaç fonksiyonları dikkate alındığında baskın olan bireylerden oluşan cephedir. Şekil 5. 9’da örnek bir çözüm bölgesi ve pareto optimal cephe verilmiştir.



Şekil 5. 9 Pareto-optimal cephe

Tercih Edilen Çözüm: Çözüm kümesi içerisinde, karar vericinin istediği ek kriterler kullanılarak seçilen baskın (Pareto) bir çözümdür. Pareto optimal bireyler ve Pareto-optimal küme $P^*=[A,B,C,D,E,F]$ şeklindedir. Bu küme aynı zamanda Pareto-optimal cepheyi oluşturmaktadır.

Çok amaçlı genetik algoritmalarda tek bir en iyi çözüm yerine en iyi çözümlerden oluşan Pareto-optimal çözümler kümesi vardır ve çözümler en iyiden kötüye doğru sıralanırlar. Sıralama yapmanın nedeni, bir sonraki nesildeki bireylerin nasıl elde edileceğini belirleyen seçme mekanizmasına bilgi üretmektir. Amaçlar tek tek dikkate alındığında bireylerin sıralanmasında bir amaca göre iyi olan çözüm diğerlerine göre en kötü olabilir. Tüm amaç fonksiyonları dikkate alındığında Pareto-optimal cephedeki bireylerin birbirlerine göre bir üstünlüğü olmayacaktır. Çok amaçlı optimizasyonun asıl hedefi, amaç fonksiyonlarına göre Pareto-cephesini bulmak veya ona yaklaşmak ve bu cephe üzerinde düzgün bir dağılım sağlamaktır [89, 94]. Şekil 5. 10’da başlangıç popülasyonu ve pareto optimal cephenin elde edilmesi verilmiştir.



Şekil 5. 10 Pareto-optimal genetik optimizasyon

5.5 Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-NSGA)

Çok amaçlı genetik algoritma üzerine birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalardan ilki Fonseca ve Fleming [96] tarafından ortaya konulmuştur. Çok amaçlı genetik algoritmalarda bir bireyin uygunluğu veya puanı o popülasyonda bulunan o bireye baskın olan bireylerin sayısına 1 eklenmesi sonucu elde edilir. Bu sayede o popülasyonda baskın olan bireylerin puanı kendilerine baskın olan birey olmadığı için 1 olarak tanımlanır.

Puanlama işlemi yapılırken öncelikle her birey için bir ham puan atanmaktadır. Ardından, aynı popülasyonda bulunan diğer bireylerin ham puanlarının ortalaması hesaplanır ve bu sayede daha iyi bireylere daha yüksek puanlar atanması sağlanmış olur. Çok amaçlı genetik algoritmalarda çeşitliliğin sağlanması için paylaşım yöntemi kullanılmaktadır ve paylaşım işlevi amaç uzayında gerçekleştirilmektedir. Paylaşım yarışmasının iyi seçilmesi çeşitliliğin sağlanması adına son derece önemlidir.

NSGA ilk olarak Goldberg [97] tarafından ortaya atılmıştır. NSGA yöntemi üzerine ilk uygulamalar Deb. vd. [1] tarafından gerçekleştirilmiştir. NSGA Pareto tabanlı ve elitist olmayan bir yöntemdir. NSGA uygulamalarında, ilk oluşturulan ve bastırılmayan

bireyleri içeren cepheye 1 puanı verilir ve bu bireyler o popülasyondan kaldırılır. Ardından, azalan popülasyondaki ikinci bastırılmayan cephedeki bireylere 2 puanı verilir ve bu işlem tüm bireylere puan verilene kadar devam eder.

NSGA birçok alt popülasyon oluşturur. Amaç fonksiyonları da dikkate alındığında ilk popülasyon ikinciden ve ikinci popülasyon ise üçüncüden daha iyi bireylere sahiptir. Ancak aynı Pareto cephesine sahip bireyler arasında bir ayırım yapılması oldukça zordur. Deb. [1] bireylerin çeşitliliğinin sağlanabilmesi için paylaşım yöntemini önermiştir. Bireylerin paylaşılmış puanlarının hesaplanabilmesi için ilk olarak Pareto cephesine ait tüm bireylerin puanı popülasyon boyutuna (N) eşitlenir. Bu herhangi bir popülasyondaki bireyin alabileceği en büyük değerdir. Paylaşım yaklaşımına göre, bireyin kendisi ile birlikte aynı Pareto cephesine sahip çok fazla komşusu var ise, o bireyin puanı yarıçap sayısı kadar azaltılır ve paylaşılmış puan hesaplanır. Paylaşılmış puanın hesaplanması için aşağıdaki formülasyon kullanılır.

NSGA Puan Atama Algoritması [1]

Adım 1: Paylaşım yarıçapı (σ_s) ile küçük pozitif sayı ϵ seçilir ve $F_{\min}=N+\epsilon$ ile program başlatılır. Cephe sayıcı $j=1$ alınır. (N popülasyon boyutudur.)

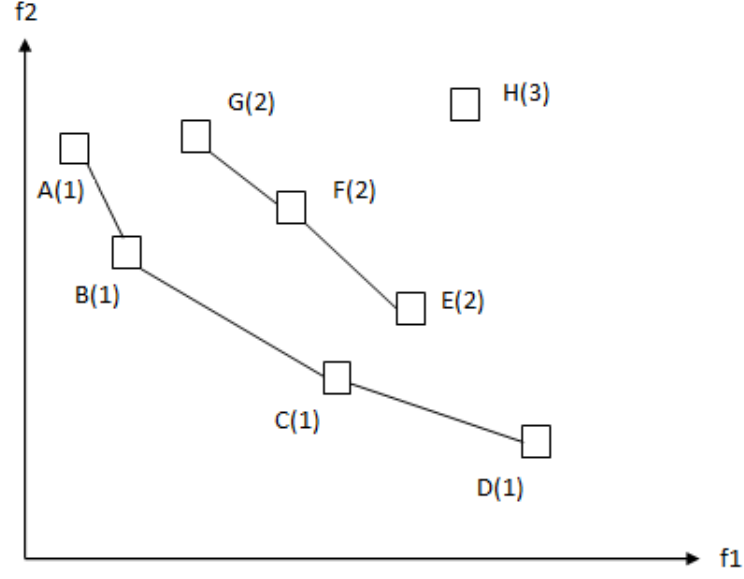
Adım 2: P popülasyonu baskınlık durumuna göre gruplandırılır.

$(P_1, P_2, \dots, P_p) = \text{Sırala}(P, \leq)$,

Adım 3: Her $q \in P_j$ bireyi için

a) Puan Atanır $F_j(q) = F_{\min} - \epsilon$

b) Yarıçap sayısı nc_q , $nc_i = \sum_{i=1}^N sh(d_{ij})$ formülü ile hesaplanır



Şekil 5. 11 Pareto cepeleri ve puan gösterimi

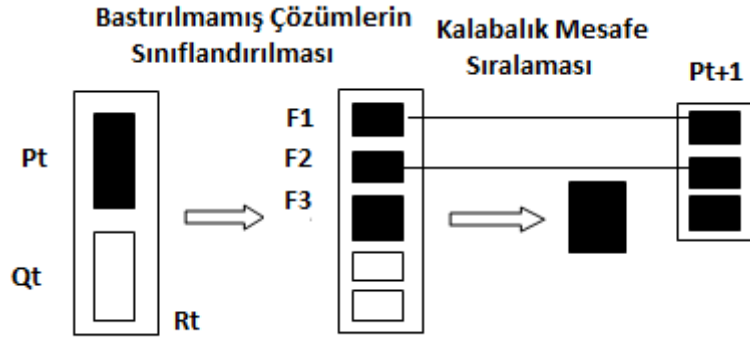
Şekil 5. 11’de pareto cepeleri ve puanlama gösterilmiştir. Bireyler puan değerlerine göre sıralanmaktadır.

5.5.1 Hızlı ve Elitist Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (Fast and Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-NSGA-II)

Bastırılmayan sıralamalı genetik algoritma (NSGA), çok amaçlı genetik algoritmalar arasında önemli bir yere sahip olmakla birlikte, hesaplama zamanının uzun olması ve karmaşıklığı, elitist bir yaklaşım olmayışı ve seçim yaklaşımının yetersiz kalması dezavantajları arasında gösterilebilir.

Hızlı ve elitist bastırılmayan genetik algoritma (NSGA-II), bastırılmayan sıralamalı genetik algoritma (NSGA)’nın aksine elitist bir yaklaşımdır ve Pareto optimal yüzeyde daha geniş bir dağılım göstermektedir [98]. NSGA-II yöntemi ile öncelikli olarak popülasyon büyüklüğü de dikkate alınarak rastgele P_0 ebeveyn popülasyonu oluşturulur ve bu popülasyondaki bireyler pareto üstünlüklerine göre sıralanırlar. Rulet seçimi, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanmasının ardından N boyutlu Q_n popülasyonun bireyleri oluşturulur. Elitizm işlemi ise, önceki en iyi bastırılmamış bireyler ile o an mevcut popülasyon karıştırılarak gerçekleştirilir. Böylece birleşik popülasyon $R_t = P_t \cup Q_t$ oluşturulur. Önceki popülasyonun tümü mevcut popülasyonun bireyelerine eklendiği için elitizm her koşulda sağlanmış olur. Oluşturulan bu popülasyon

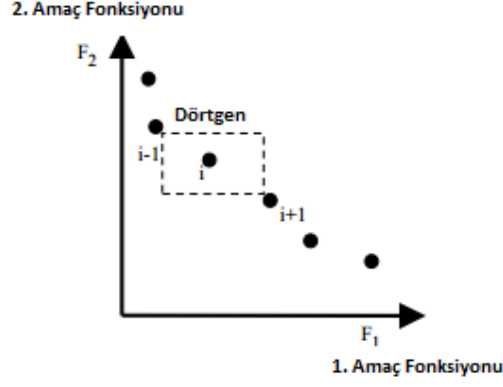
2N boyutludur. En iyi bastırılmamış küme olan F_1 'e ait olan çözümler, birleşik çözümdeki en iyi çözümlerdir. F_1 'in boyutu N_2 den küçük ise, yeni popülasyon P_{t+1} için F_1 kümesi tamamen alınır. P_{t+1} popülasyonun diğer elemanları, oranları dikkate alınarak sonradan gelen bastırılmamış yüzeylerden seçilirler. F_2 ve F_3 kümesinden seçilen çözümler ile P_{t+1} popülasyonu doldurulur. NSGA-II işlem adımları Şekil 5. 12'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 5. 12 NSGA-II işlem adımları [99]

5.5.1.1 Yoğunluk Tahmini ve Kalabalık Mesafe (Crowding Distance) Sıralaması

Popülasyon içerisindeki belirli bir nokta etrafında bulunan çözümlerin yoğunluğunu tahmin etmek amacıyla, çözümün her iki yanındaki çözümlere olan mesafenin ortalaması alınır. Bu mesafe en yakın komşu çözümlerden bir dörtgen geçirilerek hesaplanır. Bu yöntem kalabalık mesafe sıralaması (crowding distance) adı verilir. Kalabalık mesafe değeri iki komşu çözüme olan mesafenin ortalaması alınarak elde edilir. Şekil 5. 13'de verildiği gibi kalabalık mesafe sıralaması sayesinde pareto cephe üzerindeki bireylerin uygunluk değerleri hesaplanarak sıralama gerçekleştirilir. Bu sayede değişik işlem adımlarındaki seçim işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilir ve pareto cephe üzerinde düzgün bir yayılım elde edilir [98].



Şekil 5. 13 Kalabalık mesafe sıralaması [98]

5.6 Sualtı Patlama Kaynaklı Şok Yüklerine Maruz Katmanlı Kompozit Plak İçin Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu İşlem Adımları

Bu bölümde bastırılmayan sıralamalı genetik algoritma (NSGA-II) kullanılarak örnek bir 3 katmanlı kompozit plağın optimizasyonu için yazılan MATHEMATICA programı akış şeması anlatılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon programına başlamadan önce, birbirleriyle çelişen en az iki amaç fonksiyonun doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada; kütle ve kompozit hasar indeksi birbirleri ile çelişen iki amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Katmanlı kompozit plağın hasar indeksi ve kütlesi aynı anda minimize edilmek istenmiştir ve sonuç olarak optimum bir noktada bu amaç sağlanmıştır.

$$\begin{aligned} \min_x &= FI \\ \min_x &= m \end{aligned} \quad (5.3)$$

buna karşılık parametreler;

$$\begin{aligned} ns_i^a &\leq ns_i \leq ns_i^u, \\ hk_i^a &\leq hk_i \leq hk_i^u, \\ \theta a_i^a &\leq \theta a_i \leq \theta a_i^u, \\ mn_i^a &\leq mn_i \leq mn_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5.4)$$

burada, x karar parametreleri vektörüdür, m plak kütlesi, FI kompozit plak hasar indeksi, ns_i^a ve ns_i^u katman sayısı alt ve üst parametre limiti, hk_i^a ve hk_i^u katman kalınlığı alt ve üst parametre limiti, θa_i^a ve θa_i^u katman açısı alt ve üst parametre

limiti, mn_i^a ve mn_i^u malzeme numarası alt ve üst parametre limiti olarak tanımlanır. Sınırlayıcı parametreler olarak kompozit plağın katman sayısı, katman kalınlığı, katman açısı ve malzeme özellikleri hesaba katılmıştır.

Genetik algoritmalarda bireylerin kodlanması ikili sayı, gerçel sayı kodlaması ve gray kodlama biçimlerinden birisiyle gerçekleştirilir. Bu çalışmada; N katmanlı kompozit plağın optimizasyonu probleminde kullanılan genetik parametreler; gerçek değer kodlaması, popülasyon birey sayısı $n=40$, çaprazlama olasılığı $P_c = 1$, mutasyon olasılığı $P_m = 1 / (3 * \text{Katman Sayısı}) = 1/9$ olarak ele alınmıştır. Seçme mekanizması ise Rulet çarkı seçim yöntemidir.

Bu bölümde verilen işlem adımları 3 katmanlı kompozit plak içindir. Bastırılmayan sıralı genetik algoritma (NSGA-II) algoritmasının işlem adımları sırasıyla şu şekildedir:

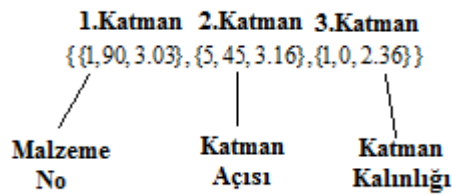
1.Adım: Optimizasyon algoritmasının ilk aşaması kromozomların kodlanmasıdır. 3 katmanlı kompozit plak optimizasyonu için oluşturulan kromozomların kodlanmasında gerçek değer kodlaması kullanılmıştır.

2.Adım: Belirlenen popülasyon boyutu dikkate alınarak rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Bu örnek için dikkate alınan popülasyonun birey sayısı $n=40$ 'dır. 3 katmanlı kompozit plak optimizasyonu için oluşturulan ilk popülasyon şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
& \{ \{1, 90, 3.03\}, \{5, 45, 3.16\}, \{1, 0, 2.36\} \}, \{ \{1, 0, 2.41\}, \{4, 30, 3.09\}, \{1, 30, 2.19\} \}, \\
& \{ \{7, 45, 2.13\}, \{4, 45, 2.29\}, \{7, 30, 2.6\} \}, \{ \{6, 60, 2.47\}, \{7, 30, 2.2\}, \{7, 15, 3.09\} \}, \\
& \{ \{7, 60, 2.6\}, \{6, 45, 2.64\}, \{1, 15, 2.54\} \}, \{ \{4, 75, 3.3\}, \{3, 75, 2.5\}, \{7, 60, 3.01\} \}, \\
& \{ \{1, 0, 2.29\}, \{3, 90, 2.67\}, \{4, 45, 2.68\} \}, \{ \{3, 75, 2.58\}, \{3, 15, 2.63\}, \{5, 60, 2.74\} \}, \\
& \{ \{1, 90, 2.95\}, \{1, 45, 2.6\}, \{4, 0, 2.56\} \}, \{ \{6, 60, 2.52\}, \{1, 45, 2.56\}, \{1, 60, 2.33\} \}, \\
& \{ \{3, 15, 3.12\}, \{5, 15, 2.47\}, \{6, 45, 2.48\} \}, \{ \{2, 90, 2.59\}, \{4, 30, 3.18\}, \{5, 75, 3.09\} \}, \\
& \{ \{6, 90, 3.05\}, \{5, 75, 2.89\}, \{4, 30, 2.98\} \}, \{ \{4, 90, 2.32\}, \{1, 30, 3.3\}, \{1, 15, 3.18\} \}, \\
& \{ \{4, 60, 3.3\}, \{4, 45, 3.33\}, \{5, 15, 2.44\} \}, \{ \{7, 75, 2.0\}, \{4, 60, 3.09\}, \{3, 75, 2.83\} \}, \\
& \{ \{1, 15, 2.81\}, \{4, 30, 3.14\}, \{1, 60, 2.43\} \}, \{ \{1, 90, 2.43\}, \{1, 90, 2.97\}, \{7, 0, 2.06\} \}, \\
& \{ \{1, 90, 2.25\}, \{6, 0, 2.36\}, \{5, 0, 2.93\} \}, \{ \{3, 45, 2.36\}, \{5, 90, 2.12\}, \{2, 60, 2.13\} \}, \\
& \{ \{7, 75, 2.59\}, \{4, 15, 2.28\}, \{1, 15, 2.2\} \}, \{ \{1, 0, 2.19\}, \{5, 60, 2.5\}, \{2, 60, 2.37\} \}, \\
& \{ \{3, 45, 2.86\}, \{7, 0, 2.16\}, \{5, 75, 2.12\} \}, \{ \{6, 30, 2.67\}, \{3, 60, 2.28\}, \{6, 45, 2.56\} \}, \\
& \{ \{6, 75, 2.1\}, \{7, 45, 2.21\}, \{6, 45, 2.29\} \}, \{ \{1, 45, 2.12\}, \{4, 45, 2.59\}, \{4, 15, 3.26\} \}, \\
& \{ \{3, 45, 2.28\}, \{1, 0, 3.09\}, \{7, 45, 3.17\} \}, \{ \{5, 75, 2.01\}, \{2, 45, 2.01\}, \{3, 75, 2.27\} \}, \\
& \{ \{3, 90, 2.37\}, \{6, 60, 2.74\}, \{3, 75, 2.16\} \}, \{ \{1, 75, 2.33\}, \{6, 0, 2.23\}, \{3, 15, 2.93\} \}, \\
& \{ \{7, 60, 2.79\}, \{2, 90, 2.85\}, \{2, 15, 2.91\} \}, \{ \{7, 15, 2.28\}, \{1, 0, 2.02\}, \{4, 90, 2.47\} \}, \\
& \{ \{3, 45, 3.2\}, \{4, 90, 2.85\}, \{2, 75, 2.37\} \}, \{ \{1, 30, 3.28\}, \{6, 30, 2.35\}, \{1, 15, 3.03\} \}, \\
& \{ \{6, 60, 3.29\}, \{2, 45, 2.94\}, \{3, 15, 2.16\} \}, \{ \{3, 90, 2.02\}, \{1, 0, 2.85\}, \{1, 45, 3.07\} \}, \\
& \{ \{5, 0, 2.19\}, \{3, 15, 2.39\}, \{2, 45, 3.33\} \}, \{ \{3, 60, 2.72\}, \{5, 0, 2.2\}, \{3, 60, 2.43\} \}, \\
& \{ \{4, 30, 2.01\}, \{5, 75, 2.93\}, \{7, 45, 2.02\} \}, \{ \{4, 0, 2.87\}, \{1, 60, 2.14\}, \{1, 30, 2.32\} \}
\end{aligned}$$

(5.5)

örnek olarak popülasyonun ilk bireyini ele alacak olursak;



Şekil 5. 14 Oluşturulan ilk birey

Şekil 5. 14’de birinci katmanın ilk bitinde malzeme numarası yer almaktadır. Optimizasyon çalışmasında kullanılan her bir farklı malzeme tipi için ayrı numaralar verilmiştir. İkinci bitinde yer alan değer ise katman açısını göstermektedir. 1. Katman için açı değeri 90 derecedir. Son bit ise katmanın kalınlığını göstermektedir ve 1. Katman için kalınlık 3,03 mm’dir.

3. Adım: Amaç fonksiyonları hesaplanır.

Amaç fonksiyonlarının hesaplanmasında öncelikle kompozit plağın hasar indeksi belirlenir. Hasar indeksinin hesaplanmasında Tsai-Hill hasar teorisi kullanılmıştır. Hasar indeksi 1 değerinin altında kalırsa plak üzerinde herhangi bir hasar gözlenmez. Dolayısıyla amaç fonksiyonlarından ilki hasar indeksini minimize etmeyi hedeflemektedir. Ancak burada en büyük zorluk hangi zaman adımında ve plağın hangi noktasında hasar analizinin yapılmasının bulunmasıdır. MATHEMATICA yazılımı kullanılarak yazılan program yardımıyla $\frac{R_0}{c}$ 'den $\frac{2R_0}{c}$ 'ye kadar 10 zaman adımında ve $(STP+1)^3 \times Katman Sayısı$ kadar noktada gerilme hesabı yapılmış ve Tsai-Hill teorisi kullanılarak hasar indeksinin maksimum olduğu durum incelenmiştir.

$$FI = Max\left[\left(\frac{\sigma_{Tot}[[id,1]]}{If[\sigma_{Tot}[[id,1]] < 0, XC, XT]}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Tot}[[id,2]]}{If[\sigma_{Tot}[[id,2]] < 0, YC, YT]}\right)^2 - \frac{\sigma_{Tot}[[id,1]]\sigma_{Tot}[[id,2]]}{If[\sigma_{Tot}[[id,1]] < 0, XC, XT]^2} + \left(\frac{\sigma_{Tot}[[id,3]]}{SS}\right)^2\right] \quad (5.6)$$

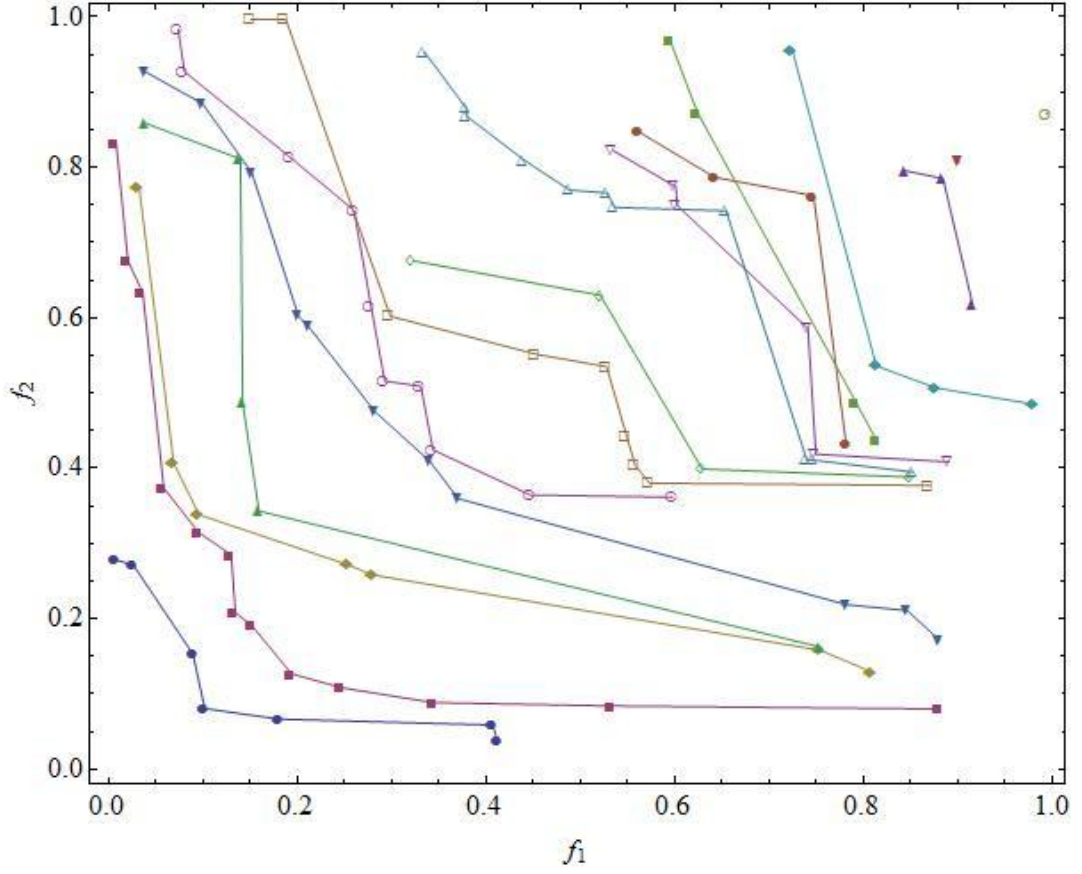
Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan bir diğer amaç fonksiyonu ise kompozit plağın kütlesini minimize etmeyi hedeflemektedir. Plak kütlesinin bulunabilmesi için öncelikle plak alanı hesaplanmış ve ilgili katmandaki malzeme özellikleri de dikkate alınarak kütlesi bulunmuştur.

$$ab \sum_{ip=1}^{Layers} LAY[i,3] \cdot \rho_k \quad (5.7)$$

bu denklemlerde a ve b plak boyutları, ρ_k her bir katman için malzeme yoğunluğudur.

4.Adım: Pareto optimal çözümler kümesi belirlenir.

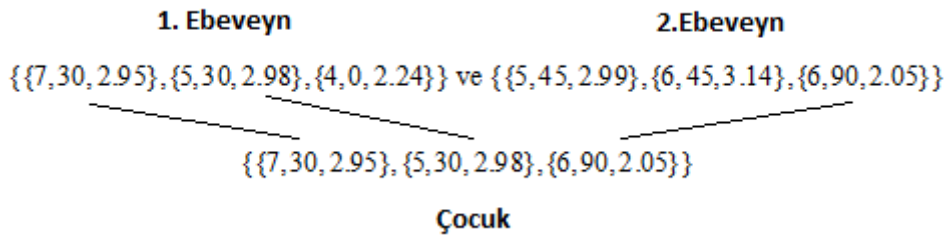
Çok amaçlı optimizasyonda, amaç fonksiyonları olan hasar indeksi ve kütle bileşenlerinin oluşturmuş olduğu kümeye pareto çözüm kümesi adı verilir. Şekil 5.15'de amaç fonksiyonları ve uygunluk değerleri verilmiştir.



Şekil 5. 15 Amaç fonksiyonları ve uygunluk değerleri

5.Adım: Popülasyondaki her bir bireyin, içinde bulunduğu pareto cephesi ve kalabalık mesafe (crowding distance) sıralaması kullanılarak uygunluk değerleri hesaplanır.

6.Adım: Rulet tekerleği seçim yöntemine göre ebeveyn bireyleri belirlenir ve bu bireylere P_c olasılığı ile çaprazlama uygulanır. Burada analiz edilen 3 katmanlı örnek için çaprazlama olasılığı $P_c = 1$ seçilmiştir. Bu durumda oluşturulan her birey için çaprazlama gerçekleştirilecektir. Örneğin rastgele seçilen 2 adet ebeveynin çaprazlanması ve yeni oluşan birey Şekil 5. 16'daki gibidir.

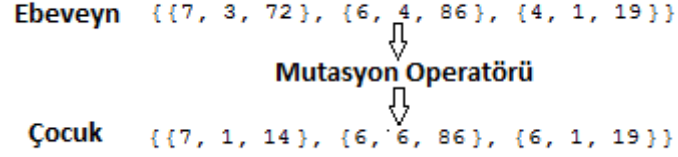


Şekil 5. 16 Çaprazlama operatörü ve oluşan yeni birey

7.Adım: Çaprazlama sonucu oluşan bireylere P_m olasılığı ile mutasyon işlemi uygulanır.

$$P_m = 1 / (3 * Katman Sayısı) \quad (5.8)$$

Buna göre bu çalışmada kullanılan 3 katmanlı kompozit plak için mutasyon olasılığı $1/9$ 'dur. Mutasyon operatörü ve oluşan birey Şekil 5. 17'de verilmiştir.



Şekil 5. 17 Mutasyon operatörü ve oluşan birey

8.Adım: Üretilen bireylerin uygunluk değeri hesaplanır. Bu bireyler bir önceki popülasyon ile birleştirilir elde edilen popülasyon içerisinde en uygun bireyler bir sonraki popülasyonu oluşturacak şekilde seçilir.

9.Adım: Maksimum nesil sayısına ulaşıldıysa algoritma sonlandırılır. Aksi halde nesil sayısı 1 arttırılarak 2. Adıma geri dönülür.

ANALİZ SONUÇLARI VE DOĞRULAMA

Bu bölümün ilk yarısında öncelikle seçilen yaklaşım fonksiyonunun uygun olup olmadığının anlaşılabilmesi için ankastre mesnetli plağın serbest titreşim analizleri bir sonlu elemanlar çözücüsü olan NASTRAN yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. NASTRAN yazılımı ile elde edilen serbest titreşim frekansları ve mod şekilleri MATHEMATICA yazılımı kullanılarak hesaplananlarla mukayese edilmiştir. Ardından; 3 katmanlı kompozit plağın düzgün yayılı statik basınç yükü altındaki mukavemet ve hasar analizleri Tsai-Wu ve Tsai-Hill yaklaşımları ile Galerkin yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Galerkin yönteminin uygulanabilmesi için MATHEMATICA yazılımı ile bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca; NASTRAN yazılımı ile kompozit plağın sonlu eleman modeli oluşturularak statik analizler gerçekleştirilmiştir. Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen plak orta noktası deformasyonları ve Tsai-Wu ile Tsai-Hill hasar indeksleri mukayese edilerek doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümün ikinci yarısında; sönümlü ve sönümsüz halde dikdörtgen kesitli kenarlarından ankastre mesnetli anlık basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın geometrik doğrusal olmayan dinamik analizi Galerkin ve Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Su altı patlaması sonucu oluşan anlık basınç yükü için Cole yaklaşımına göre şok basıncının plak üzerine ilk geldiği pik değeri ve basıncın eksponansiyel azaldığı ikinci kısmı daha iyi bir şekilde ifade eden basınç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen basınç fonksiyonu MATHEMATICA ve ANSYS yazılımları kullanılarak kompozit plağa dinamik bir şekilde tatbik edilmiştir.

Son kısmında ise; suyun sönüm etkisinin dikkate alındığı dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Suyun sönüm etkisinin incelenebilmesi ve önerilen basınç

fonksiyonun doğruluğunun test edilebilmesi için MATHEMATICA yazılımı kullanılarak geliştirilen algoritma ile bir dinamik sonlu elemanlar çözücüsü olan LS-DYNA yazılımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Sönümlü durumda basınç fonksiyonu plak boyutları olan x ve y ile plağın hızı olan w' bağlıdır. Bu durumda toplamda 3 değişken mevcuttur ve ANSYS yazılımı aynı anda 3 değişkenin tarif edilmesine izin vermemektedir. Bu nedenle sönümlü analizler için ankastre mesnetli çelik plak LS-Dyna yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. 40 gr TNT tipi patlayıcının suyun 0,15 m altında patlaması senaryosu analiz edilerek çelik plak üzerine etkileyen basıncın zamana bağlı değişimleri mukayese edilmişlerdir. Çelik plak tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise literatürde çelik plağa ait deney sonuçlarının mevcut olmasıdır. Ramajeyathilagam vd [45] çelik malzemeye sahip plaklar için patlama testlerini gerçekleştirmişlerdir, çelik plakların patlama analizleri LS-Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

6.1 Kompozit Plağın Geometrik Doğrusal Olmayan Statik Analizleri

Ankastre plak yapısının su altı şok yüklerine karşılık nonlineer dinamik mukavemet analizi gerçekleştirilmeden önce, seçilen yaklaşım fonksiyonlarının uygun olup olmadığının anlaşılabilmesi için öncelikle ankastre mesnetli plak için serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Kompozit plağın serbest titreşim analizleri NASTRAN yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Patlama sonucunda plak yapısına etki eden şok basıncı simetrik olduğundan dolayı; plağın antisimetrik modlarının çözüm fonksiyonuna katılmasına gerek yoktur. NASTRAN yazılımı ile elde edilen serbest titreşim frekansları ve mod şekilleri MATHEMATICA yazılımı kullanılarak hesaplananlarla mukayese edilmiştir. Bu durumda seçilen yaklaşım fonksiyonlarının geometrik sınır şartlarını ve beklenen deformasyon biçimlerini sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

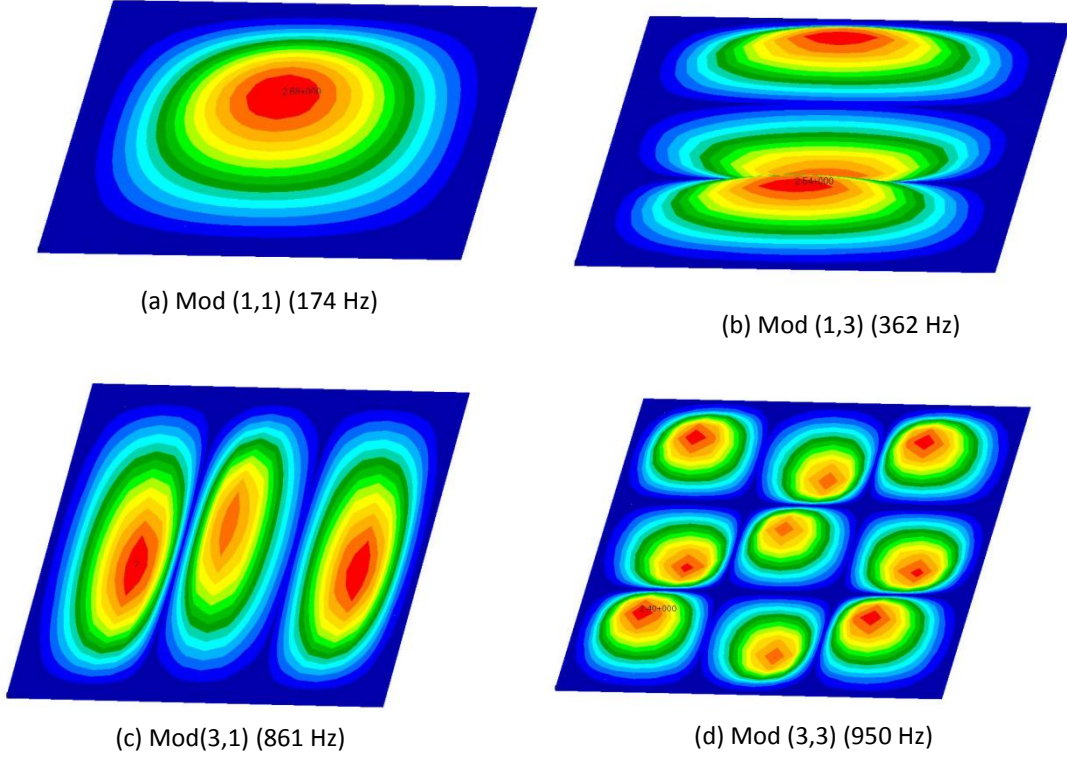
Bu çalışmada; doğal frekans analizleri kenarlarından ankastre mesnetli 3 katmanlı kompozit bir plak için gerçekleştirilmiştir. Seçilen malzeme ($0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$) elyaf oryantasyonunda üç katmanlıdır. Analizlerde kullanılan kompozit malzemenin her bir katmanı karbon elyaf ve Çizelge 6. 1'de verilen 3 numaralı malzemedir. Plağın boyutları $a = 0,4$ m, $b = 0,4$ m ve $h = 0,86$ mm'dir. Her bir katmanın kalınlığı 0,2867 mm dir.

Katmanlı kompozit plağın statik ve dinamik analizleri ile optimizasyon çalışmasında kullanılan malzeme tipleri ve mekanik özellikleri

Çizelge 6. 1 Kompozit malzeme özellikleri [100, 101]

No	Malzeme	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ρ (kg/m ³)	X^T (MPa)	X^C (MPa)	Y^T (MPa)	Y^C (MPa)	S (MPa)
1	T300 Karbon Elyaf	138	11	5.5	0.28	1760	1500	900	27	200	80
2	Gr/Ep	181	10.3	7.17	0.28	1663	1500	1500	40	246	68
3	AS4 Karbon Elyaf	126	11	6.6	0.28	1790	1950	1480	48	200	79
4	E-Glass, Gevetex	53.4	17.7	5.83	0.278	1992	1140	570	35	114	72
5	E-Glass, Silenka	45.6	16.2	5.83	0.278	1992	1280	800	40	145	73
6	Kevlar/Ep	75	6	2	0.34	1400	1300	280	30	140	60
7	Boron/Ep	200	15	5	0.23	2075	1400	2800	90	280	140

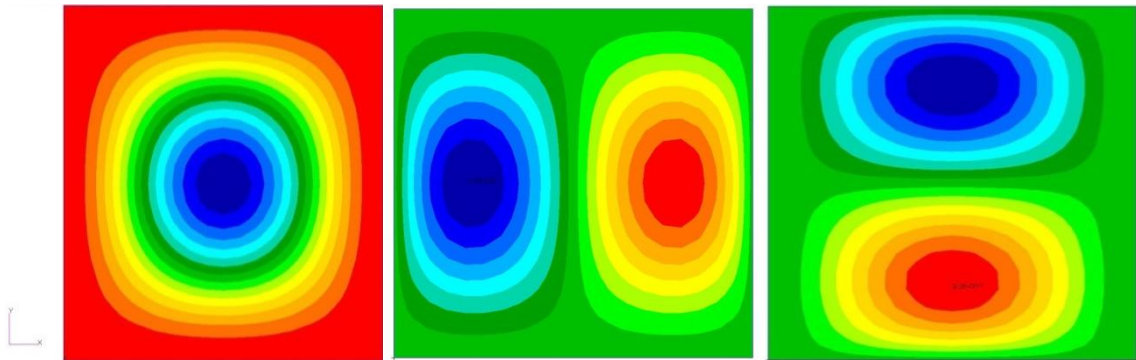
Çizelge 6. 1'de analizlerde ve optimizasyon çalışmalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir. Ayrıca her bir malzeme için farklı renk kodları verilerek optimizasyon sonuçlarının daha anlaşılır şekilde gösterilmesi hedeflenmiştir. Kenarlarından ankastre mesnetli plağın doğal frekans analizleri gerçekleştirilirken seçilen karbon elyaf malzemenin mekanik özellikleri sırasıyla $E_1=126$ GPa, $E_2=11$ GPa, $G_{12}=6,6$ GPa, $\nu_{12}=0,28$, $\rho=1790$ kg/m³ şeklindedir.



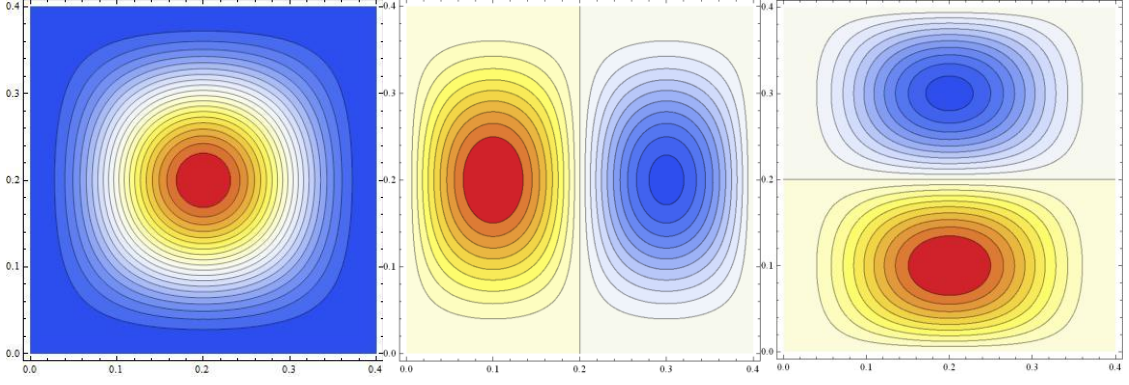
Şekil 6. 1 NASTRAN yazılımı ile elde edilen serbest titreşim frekansları ve mod şekilleri

Şekil 6. 1'de ankastre mesnetli kompozit bir plağın serbest titreşim frekansları ve mod şekilleri NASTRAN sonuçları verilmiştir. Burada sadece analizlerden elde edilen simetrik modlar gösterilmiştir. Antisimetrik modlar dikkate alınmamıştır.

Buna göre ankastre mesnetli kompozit plağın en küçük serbest titreşim frekansı 174 Hz'dir. Ortaya çıkan modun (1,1) modu olduğu Şekil 6. 2 ve Şekil 6. 3'de görülmektedir. 174 Hz frekansında düşey yön olan W için W (1,1), enine yön olan U için U (2,1) ve diğer yatay yön olan V için ise V (1,2) modları gözlenmiştir.

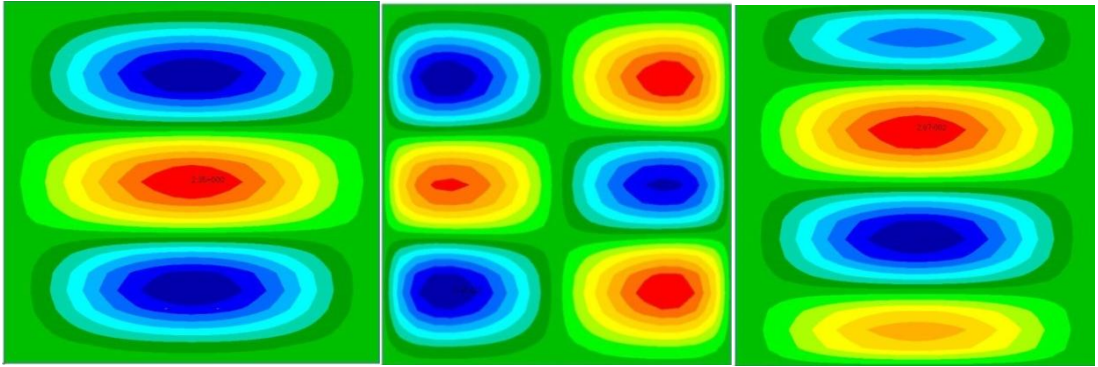


Şekil 6. 2 Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 1.mod şekli (sırasıyla W,U,V)

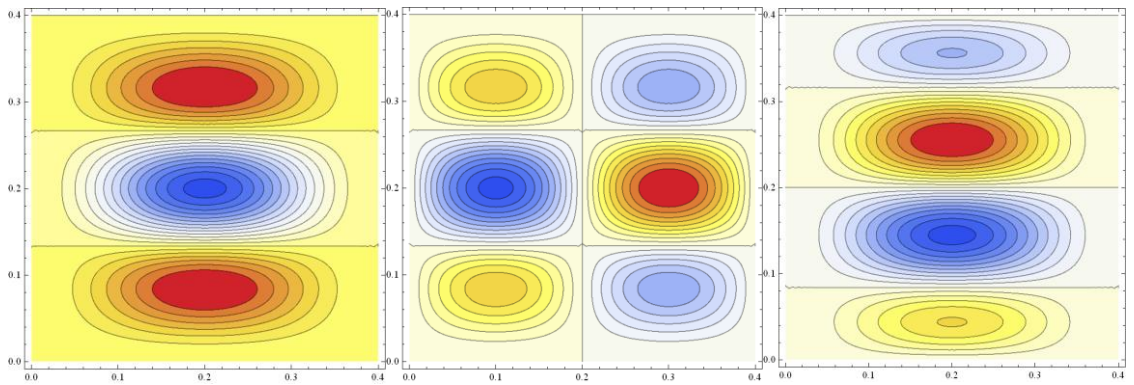


Şekil 6. 3 Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V)

Şekil 6. 4 ve Şekil 6. 5’de verilen ikinci doğal frekans ve simetrik mod 362 Hz değerinde hesaplanmış olup ankastre plağın Mod (1,3)’dür. 362 Hz frekansında düşey yön olan W için W (1,3), enine yön olan U için U(2,3) ve diğer yatay yön olan V için ise V (1,3) modları gözlenmiştir.



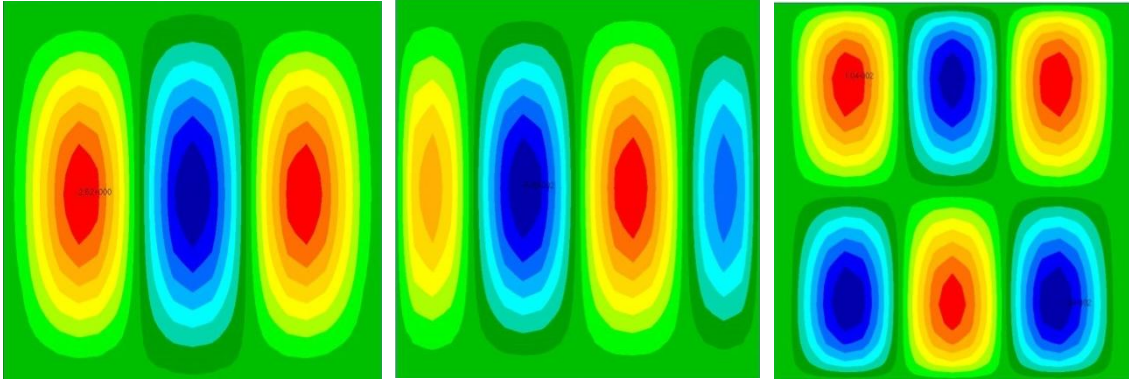
Şekil 6. 4 Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 2.mod şekli (sırasıyla W,U,V)



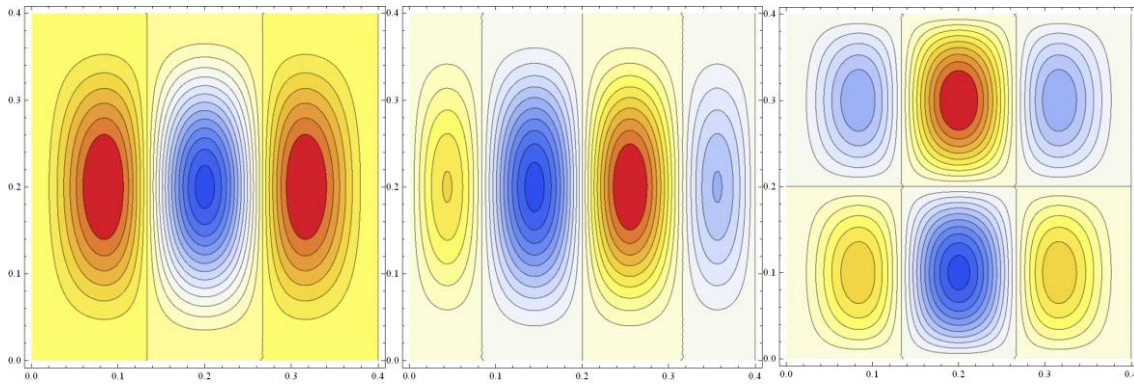
Şekil 6. 5 Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V)

Şekil 6. 6 ve Şekil 6. 7’de verilen üçüncü doğal frekans ve simetrik mod şekli 861 Hz değerine sahip olup ankastre plağın Mod (3,1)’dir. 861 Hz frekansında düşey yön olan

W için W (3,1), enine yön olan U için U(4,1) ve diğer yatay yön olan V için ise V (3,2) modları gözlenmiştir.

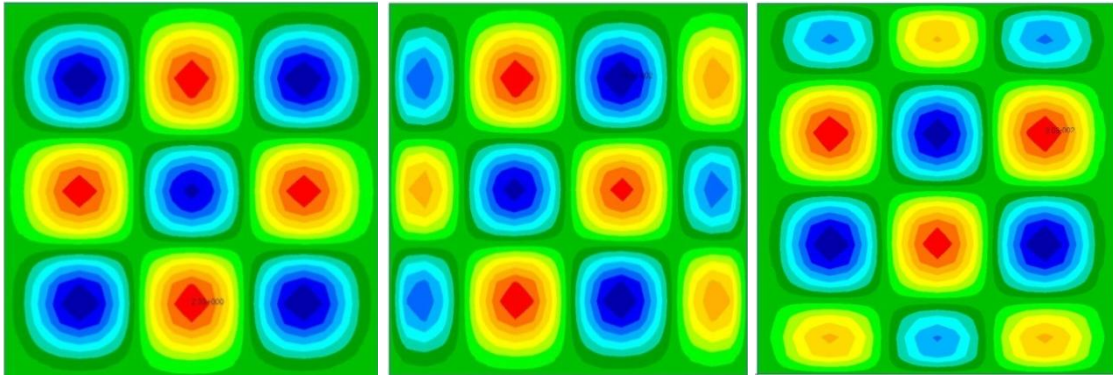


Şekil 6. 6 Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 3.mod şekli (sırasıyla W,U,V)

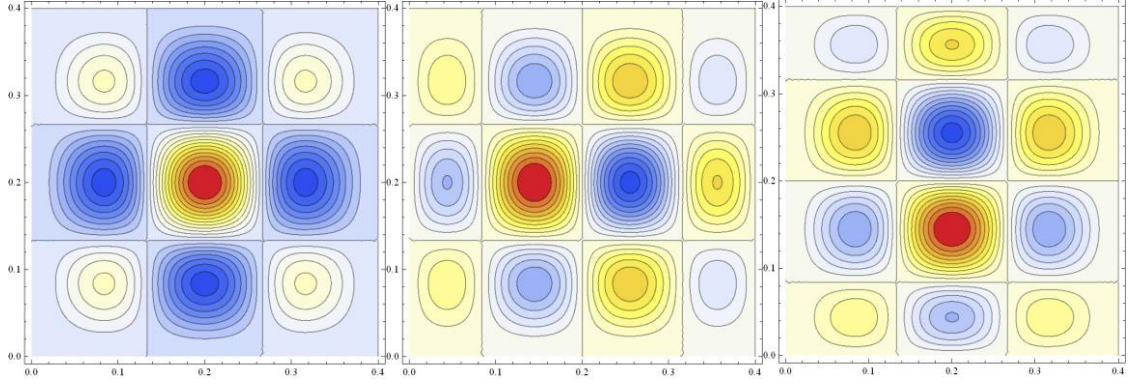


Şekil 6. 7 Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V)

Şekil 6. 8 ve Şekil 6. 9'da verilen dördüncü doğal frekans ve simetrik mod şekli 950 Hz olarak bulunmuştur ve ankastre plağın Mod (3,3)'dür. 950 Hz frekansında düşey yön olan W için W (3,3), enine yön olan U için U(4,3) ve diğer yatay yön olan V için ise V (3,4) modları elde edilmiştir.



Şekil 6. 8 Ankastre plak NASTRAN serbest titreşim 4.mod şekli (sırasıyla W,U,V)



Şekil 6. 9 Galerkin yaklaşım fonksiyonu MATHEMATICA sonuçları (sırasıyla W,U,V)

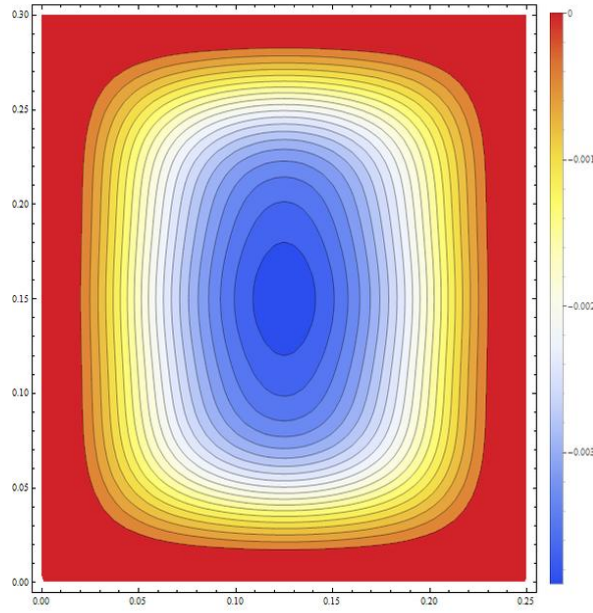
Gerçekleştirilen analizler neticesinde; NASTRAN doğal frekans mod şekilleri ile MATHEMATICA yazılımı kullanılarak elde edilen yaklaşım fonksiyonları sonuçlarının uyumlu olduğu yukarıdaki şekillerden anlaşılmaktadır. Bu durumda seçilen yaklaşım fonksiyonu şok basınç yüklemesi altında yapının deformasyonunu doğru bir şekilde temsil edebilecektir. Ayrıca; yaklaşım fonksiyonları geometrik sınır şartlarını da doğru bir şekilde sağlamaktadırlar.

6.1.1 3 Katmanlı Kompozit Plağın Galerkin ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Geometrik Doğrusal Olmayan Statik Analizi

Bu kısımda dikdörtgen kesitli kenarlarından ankastre mesnetli düzgün yayılı basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit bir plağın geometrik doğrusal olmayan statik analizleri, Tsai-Wu ve Tsai-Hill hasar teorileri ile hasar analizleri Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Galerkin yöntemi ile statik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için MATHEMATICA dilinde bir algoritma geliştirilmiştir. Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi ile geometrik doğrusal olmayan statik analizlerde 200 kPa düzgün yayılı basınç yükü ve plak üst yüzeyine uygulanmıştır. Analizler kullanılan katmanlı kompozit plak ($0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$) elyaf oryantasyonunda üç katmanlıdır. Kompozit malzemenin her bir katmanı karbon elyafıdır ve malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 6. 1'de verilen 3 numaralı malzemedir. Plağın boyutları $a = 0.25$ m, $b = 0.3$ m ve $h = 3$ mm'dir. Her bir katmanın kalınlığı 1 mm dir. Ayrıca hasar analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için plak malzemesine ait çekme, basma ve kayma mukavemet değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Analizler sırasında kullanılan karbon elyaf malzemenin x yönündeki çekme ve basma mukavemet değerleri sırasıyla

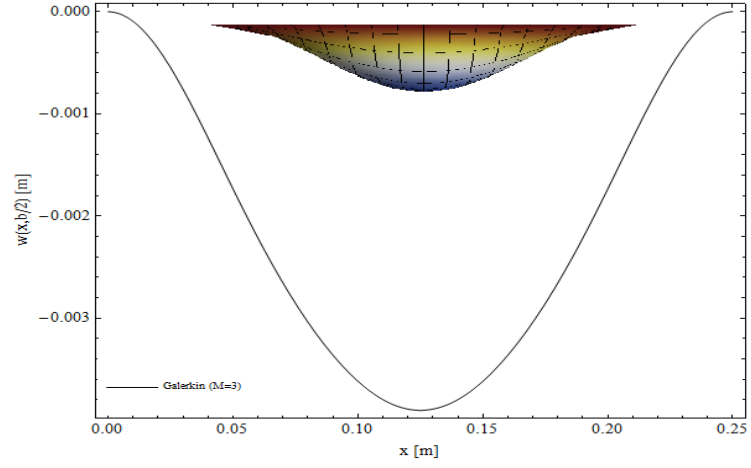
$X^T=1950$ MPa, $X^C=1480$ MPa, y yönündeki çekme ve basma mukavemet değerleri $Y^T=48$ MPa, $Y^C=200$ MPa, kayma mukavemet değerleri ise sırasıyla $S_{12}=79$ MPa, $S_{13}=79$ MPa, $S_{23}=79$ MPa olarak alınmıştır.

Galerkin yöntemi ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik analizler için MATHEMATICA yazılımı kullanılarak bir algoritma geliştirilmiştir. Galerkin yöntemi için 3 terimli yaklaşım fonksiyonları dikkate alınmıştır. Geometrik doğrusal olmayan statik analiz sonuçlarına göre plak orta noktasında maksimum yer değiştirme değeri 0,0039 m veya diğer bir ifade ile 3,90 mm olarak elde edilmiştir.



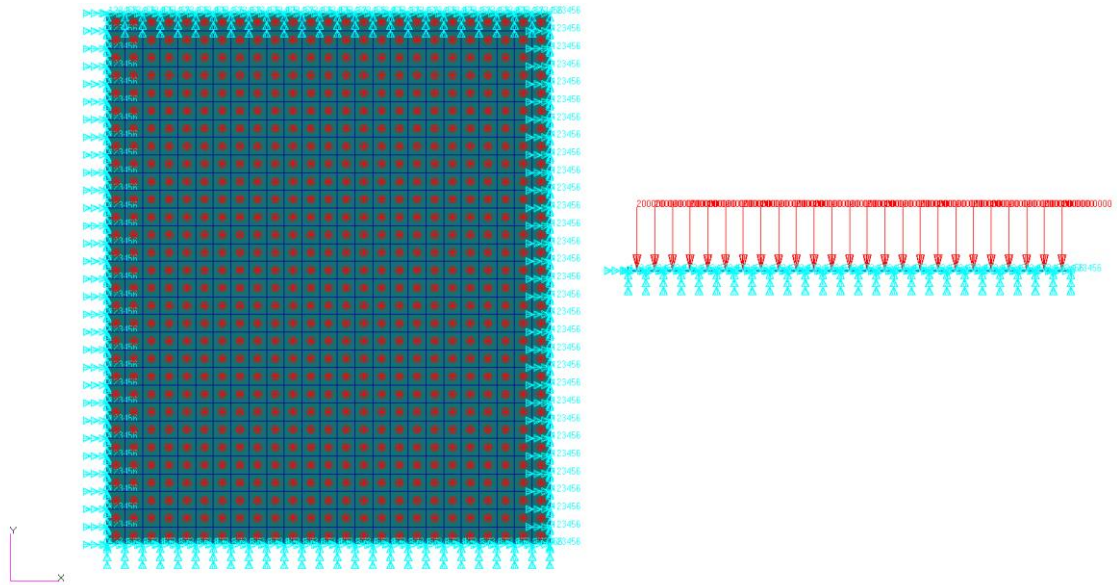
Şekil 6. 10 Galerkin yerdeğiştirme sonucu

Plağın üzerinde gerçekleşen yerdeğiştirmenin plak boyunca değişimi verilmiştir. Buna göre plak üzerinde mesnet bölgelerinde yerdeğiştirme 0 değerindedir. Maksimum yerdeğiştirme ise plak orta noktasında ve 0,00390 m'dir. Şekil 6. 10 ve Şekil 6. 11'de yerdeğiştirme dağılımı verilmiştir.



Şekil 6. 11 Plak üzerinde gerçekleşen yerdeğiştirme grafiği

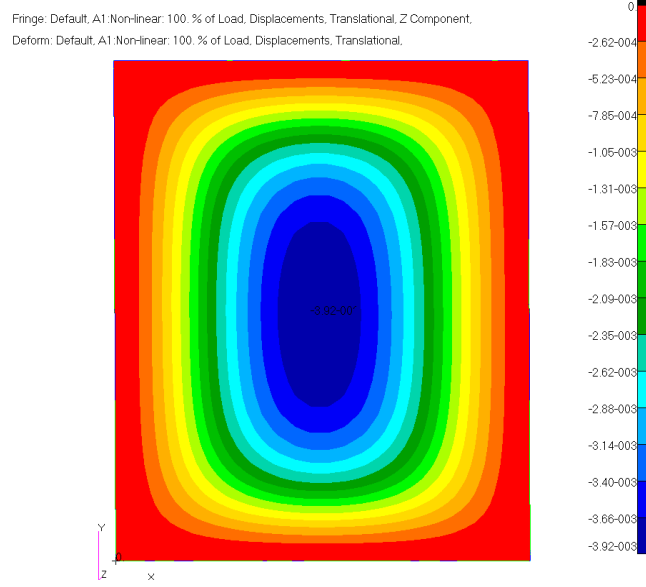
Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik analizler NASTRAN yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde eleman tipi 4 düğüm noktalı Quad 4 olarak ele alınmıştır. 0.25 m x 0.30 m boyutlarındaki dikdörtgen plak için eleman boyutu 0.01 m olarak seçilmiştir. Bu durumda plak geometrisi toplam 750 adet Quad 4 tipi eleman kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 6. 12 Sınır şartlarının gösterimi

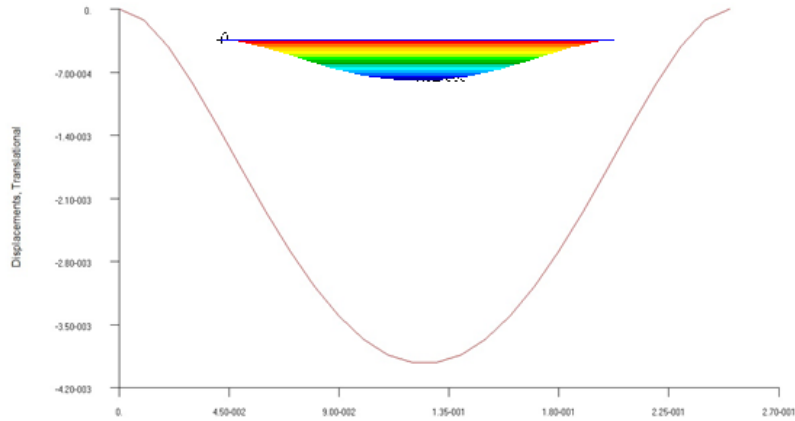
Plak yapısı dört kenarından tüm serbestlikleri kısıtlanarak ankastre sınır şartı sağlanmıştır. Şekil 6. 12’de kompozit plak için sınır şartları gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre plak orta noktasında maksimum yer değıştirme değeri 0,00392 m veya diğer bir ifade ile 3,92 mm olarak elde edilmiştir. Bu değeri Galerkin yöntemi ile elde edilen 0,00390 m veya 3,90 mm değeri ile uyumludur.



Şekil 6. 13 Sonlu elemanlar yerdeğıştirme sonucu

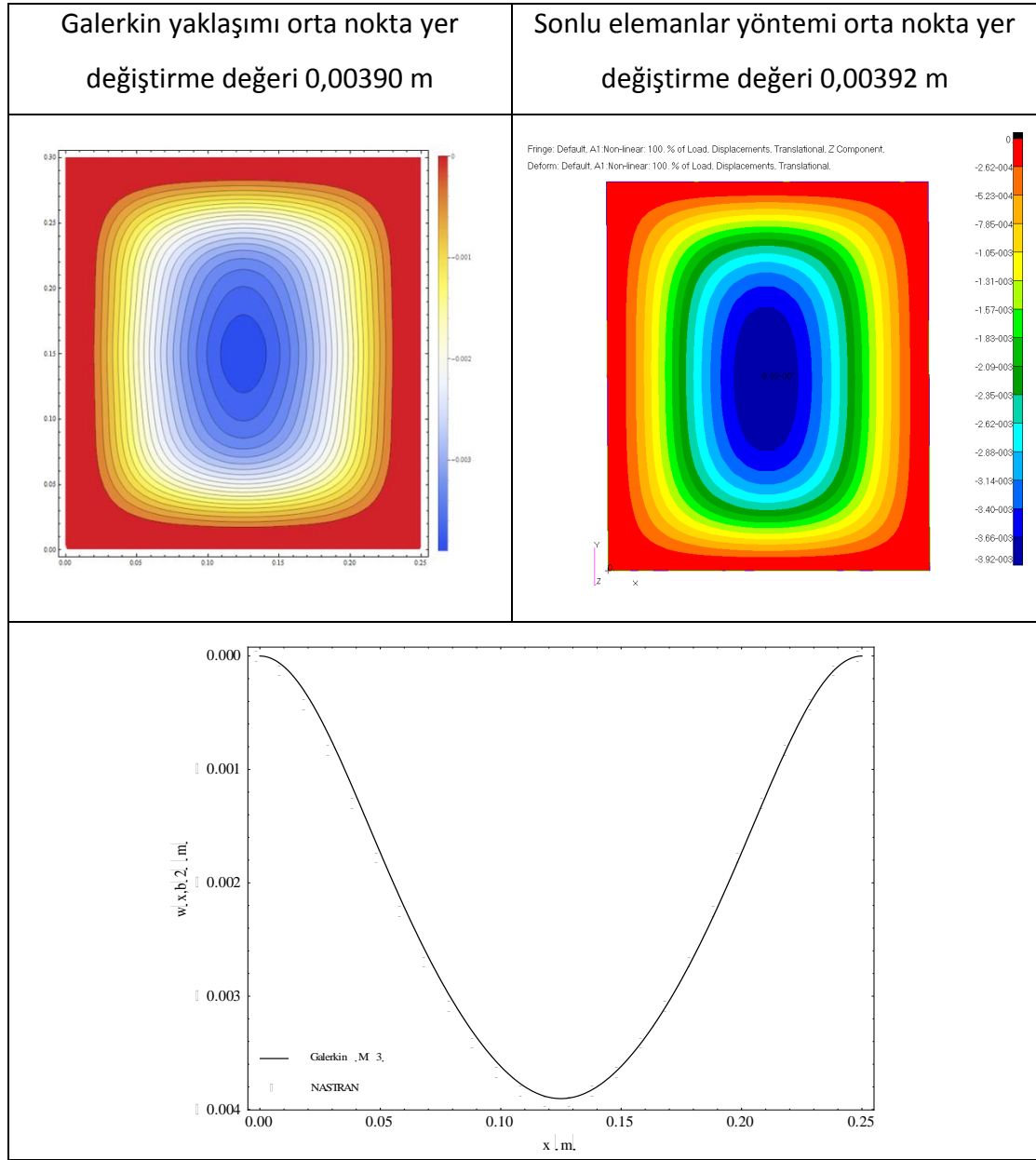
Plak üzerindeki yerdeğıştirmenin plak boyunca değışimi Şekil 6. 13 ve Şekil 6. 14’de görülmektedir. Maksimum yerdeğıştirme plak orta noktasındadır ve değeri 0,00392 m’dir.



Şekil 6. 14 Plak üzerinde gerçekleşen yerdeğıştirme grafiği

Dikdörtgen kesitli kenarlarından ankastre mesnetli düzgün yayılı basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın doğrusal olmayan statik analiz sonuçları ile Tsai-Wu ve Tsai-

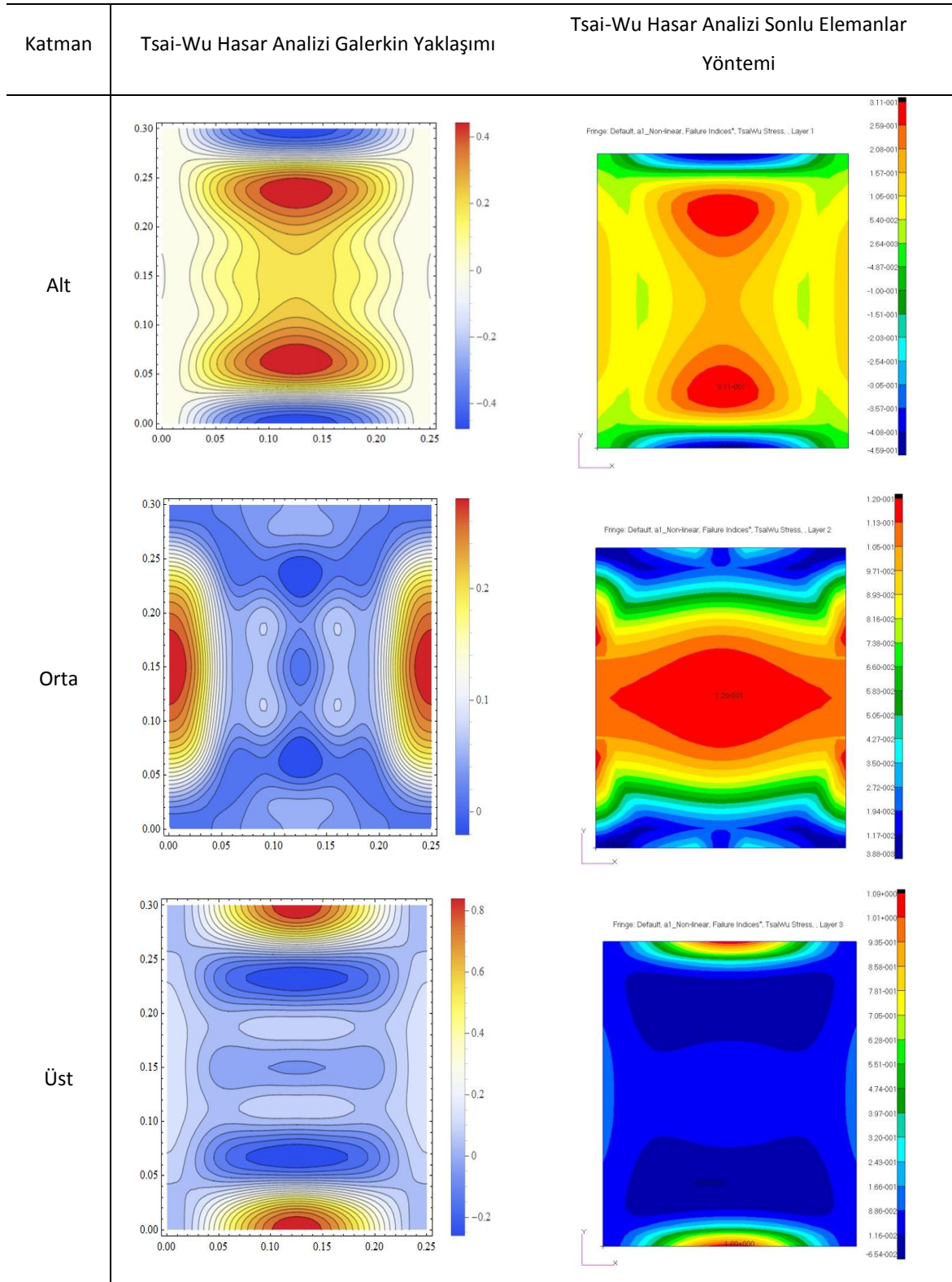
Hill hasar teorisi dikkate alınarak gerçekleştirilen hasar analizleri Galerkin ve Sonlu elemanlar çözümleri karşılaştırılmıştır.



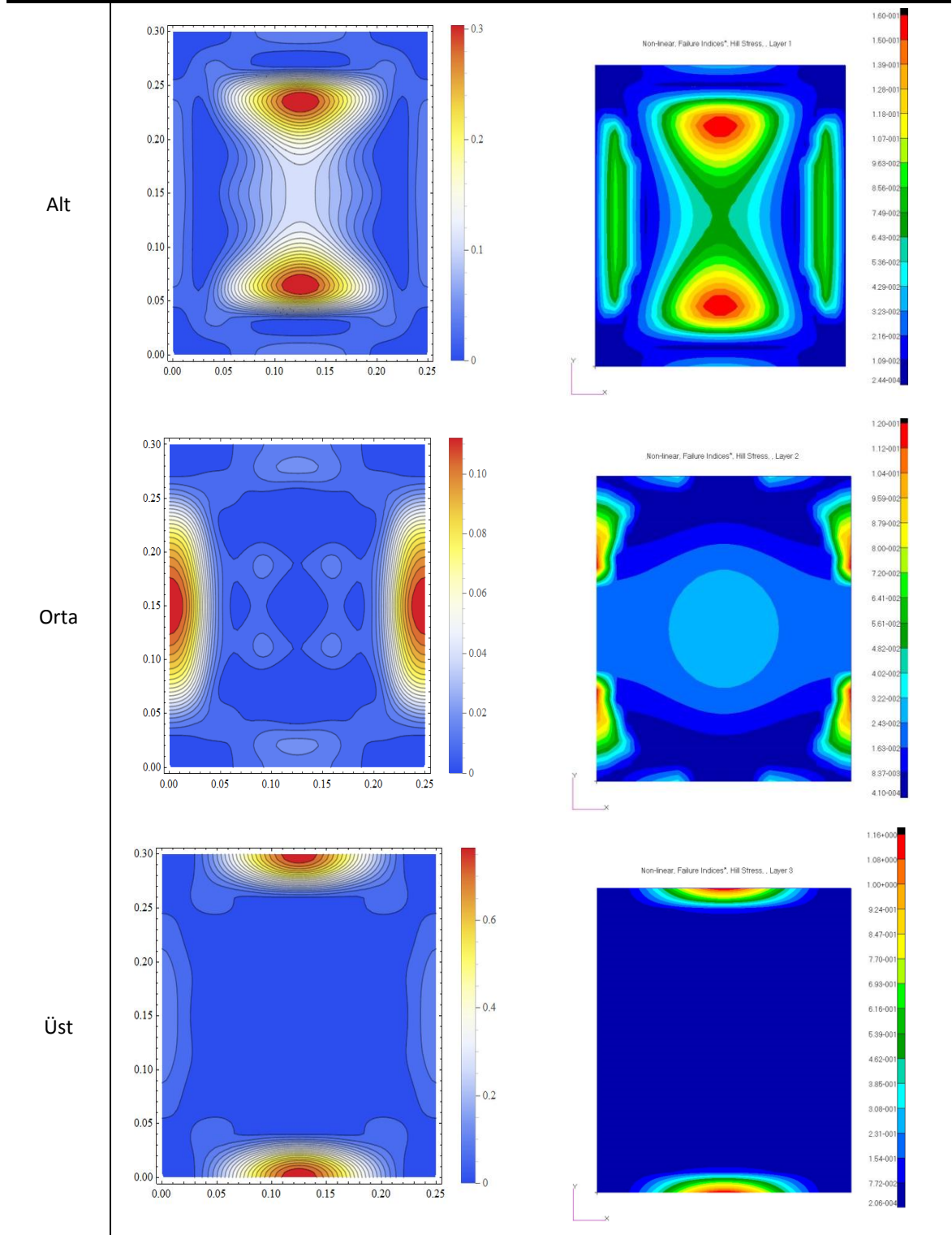
Şekil 6. 15 Plak yerdeğiştirme dağılımı

Şekil 6. 15’de Galerkin ve sonlu elemanlar analizleri için yerdeğiştirme dağılımları ve orta nokta yerdeğiştirme değerleri karşılaştırılarak verilmiştir. Plak orta noktası yerdeğiştirme değeri Galerkin yöntemi kullanıldığında 0,00390 m ve Sonlu elemanlar yöntemi kullanıldığında ise 0,00392 m olarak elde edilmiştir. Orta nokta yerdeğiştirmeleri her iki durum içinde birbirlerine yakındır.

3 katmanlı kompozit plağın 200 kPa yayılı basınç yüküne karşılık Tsai-Wu ve Tsai-Hill hasar indeksi analizleri için Galerkin ve Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. 16 Tsai-Wu hasar indeksleri ve dağılımı



Şekil 6. 17 Tsai-Hill hasar indeksleri ve dağılımı

Düzgün yayılı 200 kPa basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın Tsai-Wu ve Tsai-Hill hasar indeksi analizleri Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları

Şekil 6. 16 ve Şekil 6. 17’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her iki yöntem için hasar indeksleri alt, orta ve üst katmanda ayrı ayrı verilmiştir. Çizelge 6. 2’de verilen sonlu elemanlar ve Galerkin sonuçları birbirleri ile mertebe ve dağılım olarak uyumludurlar. Galerkin yönteminde yerdeğiştirme için seçilen yaklaşım fonksiyonları geometrik sınır şartlarını sağlamaktadır. Ancak, fonksiyonun bölge içindeki değişimini ifade etmemektedir. Dolayısıyla yerdeğiştirme değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile oldukça yakın olmakla birlikte, yerdeğiştirmenin türevi olan gerinimlerde farklılıklar oluşmaktadır. Gerinimlerin karşılaştırılabilmesi için deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi daha sağlıklı bir doğrulama yapılmasına imkan verecektir.

Çizelge 6. 2 Hasar indeksi karşılaştırmaları

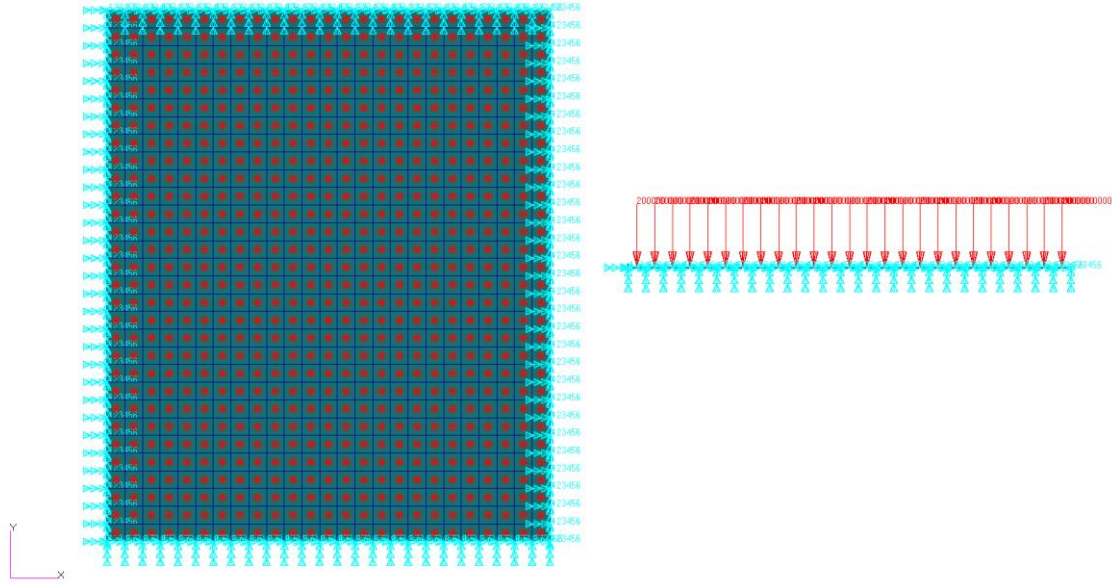
Katman	Tsai-Wu	Tsai-Wu	Tsai-Hill	Tsai-Hill
	Hasar	Hasar	Hasar	Hasar
	indeksi	indeksi	indeksi-	indeksi
	Galerkin	SEY	Galerkin	SEY
Alt	0.40	0.31	0.30	0.16
Orta	0.30	0.12	0.10	0.12
Üst	0.80	1.09	0.80	1.16

6.2 Kompozit Plağın Geometrik Doğrusal Olmayan Dinamik Analizleri

Bu bölümde ankastre mesnetli anlık basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın geometrik doğrusal olmayan dinamik analizi Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Su altı patlaması sonucu oluşan anlık basınç yükü için Cole yaklaşımına göre şok basıncının plak üzerine ilk geldiği pik değeri ve basıncın eksponansiyel azaldığı ikinci kısmı daha iyi bir şekilde ifade eden bir basınç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen basınç fonksiyonu MATHEMATICA ve ANSYS yazılımları kullanılarak kompozit plağa dinamik bir şekilde tatbik edilmiştir.

Bu bölümde öncelikle suyun sönüm etkisinin olmadığı durumda, şok yüklemesi için önerilen zamana bağlı basınç fonksiyonu kompozit plak yapısına uygulanarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sönümsüz durumda MATHEMATICA Galerkin yöntemi ile ANSYS sonlu eleman yazılımı sonuçları karşılaştırılarak bir doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde eleman tipi 4 düğüm noktalı Quad 4 olarak alınmıştır. 0.25 m x 0.30 m boyutlarındaki dikdörtgen plak, eleman boyutu 0.01 m olan 4 düğüm noktalı elemanlar ile modellenmiştir. Bu durumda plak geometrisi toplam 750 adet Quad 4 tipi elemana ayrılmıştır.



Şekil 6. 18 Sınır şartlarının gösterimi

Şekil 6. 18'deki plak yapısının dört kenarından tüm serbestlikleri kısıtlanarak ankastre sınır şartı sağlanmıştır. Seçilen katmanlı kompozit plak ($0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$) elyaf oryantasyonunda üç katmanlıdır. Analizlerde kullanılan kompozit malzemenin her bir katmanı karbon elyafıdır ve malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 6. 1'de verilen 3 numaralı malzemedir.

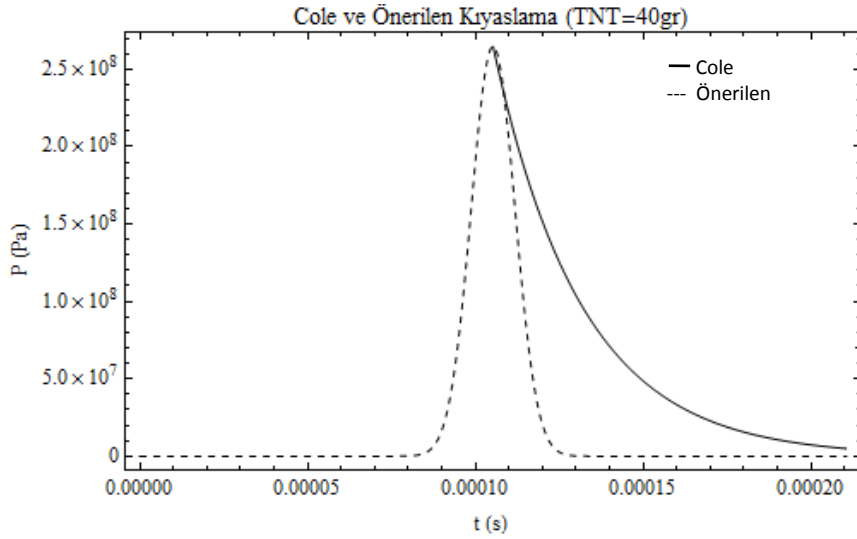
6.2.1 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 3 Katmanlı Kompozit Plağın Suyun Sönüm Etkisi Olmadığı Durumda Geometrik Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

Su altı patlaması sonucu oluşan anlık basınç yükü için Cole yaklaşımına ek olarak; şok basıncının plak üzerine ilk geldiği pik değeri ve basıncın eksponansiyel azaldığı ikinci kısmı daha iyi ifade eden bir basınç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen basınç fonksiyonu MATHEMATICA ve ANSYS yazılımları kullanılarak kompozit plağa dinamik bir şekilde tatbik edilmiştir ve orta nokta yer değiştirmeleri kıyaslanmıştır. Patlayıcı tipi olarak TNT alındığında sönümsüz halde plak üzerine etki eden basınç fonksiyonu Cole yaklaşımı ve önerilen durum için en genel halde Çizelge 6. 3'deki gibi yazılabilir;

Çizelge 6. 3 Cole yaklaşımı ve önerilen basınç fonksiyonu

Cole Yaklaşımı ile Basınç Fonk.	Önerilen Basınç Fonk.
$P = 2 \times 52.16 \times 10^6 \left(\frac{W_{TNT}}{R} \right)^{1.13} e^{-\frac{(t-t_d)}{\theta}}$	$P = 2 \times 52.16 \times 10^6 \left(\frac{W_{TNT}}{R} \right)^{1.13} e^{-\frac{(t-t_d)^2}{\theta^{2.2}}}$

Patlayıcının bulunduğu su derinliği 0,15 metre ve 40gr TNT kullanıldığı durumda Cole yaklaşımı ve önerilen basınç fonksiyonlarının karşılaştırılması MATHEMATICA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. 19 Basınç fonksiyonlarının karşılaştırılması

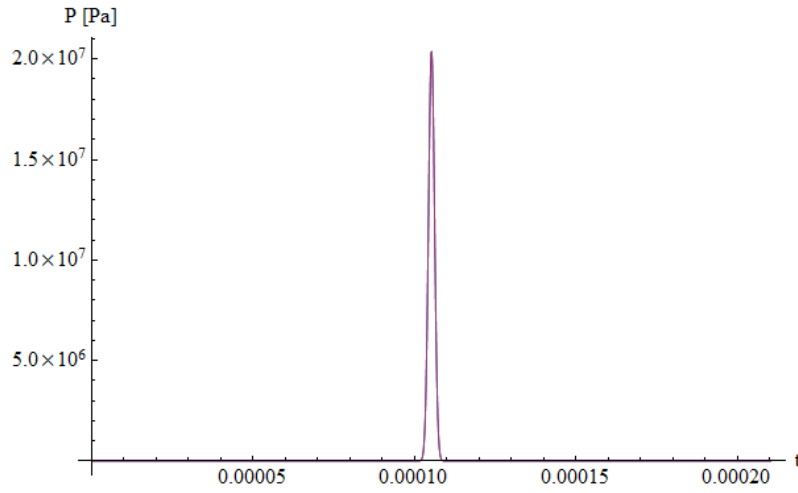
Şekil 6. 199’da Cole yaklaşımına ve önerilen fonksiyona göre basıncın zamanla değişimi görülmektedir. Basınç $t=t_d$ anında anlık olarak ortaya çıkmaktadır ve eksponansiyel biçimde önerilen basınç fonksiyonuna göre daha uzun bir sürede azalmaktadır. Ayrıca Cole yaklaşımına göre basınç $t=t_d$ öncesinde sonsuza gitmektedir. Önerilen basınç fonksiyonunda ise $t=t_d$ öncesi doğru olarak ifade edilebilmektedir ve $t=t_d$ anına gelindiğinde ise basınç hızlı bir şekilde maksimum değerine ulaşmaktadır. Önerilen basınç fonksiyonu ile basıncın azaldığı ikinci kısım daha kısa sürede sıfır değerine ulaşmaktadır.

Bu bölümde, suyun sönüm etkisinin ihmal edildiği durumda dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece; MATHEMATICA yazılımı kullanılarak geliştirilen dinamik analiz programının sonuçları, ANSYS sonlu eleman sonuçları ile mukayese edilmiştir.

ANSYS sonlu eleman yazılımı kullanılmasının nedeni, istenen basınç fonksiyonun dinamik bir şekilde program içerisinde tarif edilebilmesidir. Basınç fonksiyonu plağın boyutları x ve y bağlı olduğu için ANSYS yazılımı ile analiz edilebilmektedir.

Ancak sönümlü durumda basınç fonksiyonu plak boyutları olan x ve y ile plağın hızı olan w' bağlıdır. Bu durumda toplamda 3 değişken mevcuttur ve ANSYS yazılımı aynı anda 3 değişkenin tarif edilmesine izin vermemektedir. Bu nedenle sönümlü analizler için LS-Dyna yazılımı tercih edilmiştir.

Sönümsüz durum için gerçekleştirilen dinamik analizlerde, plak yapısına uygulanan basıncın zamanla değişimi Şekil 6. 20'deki gibidir.

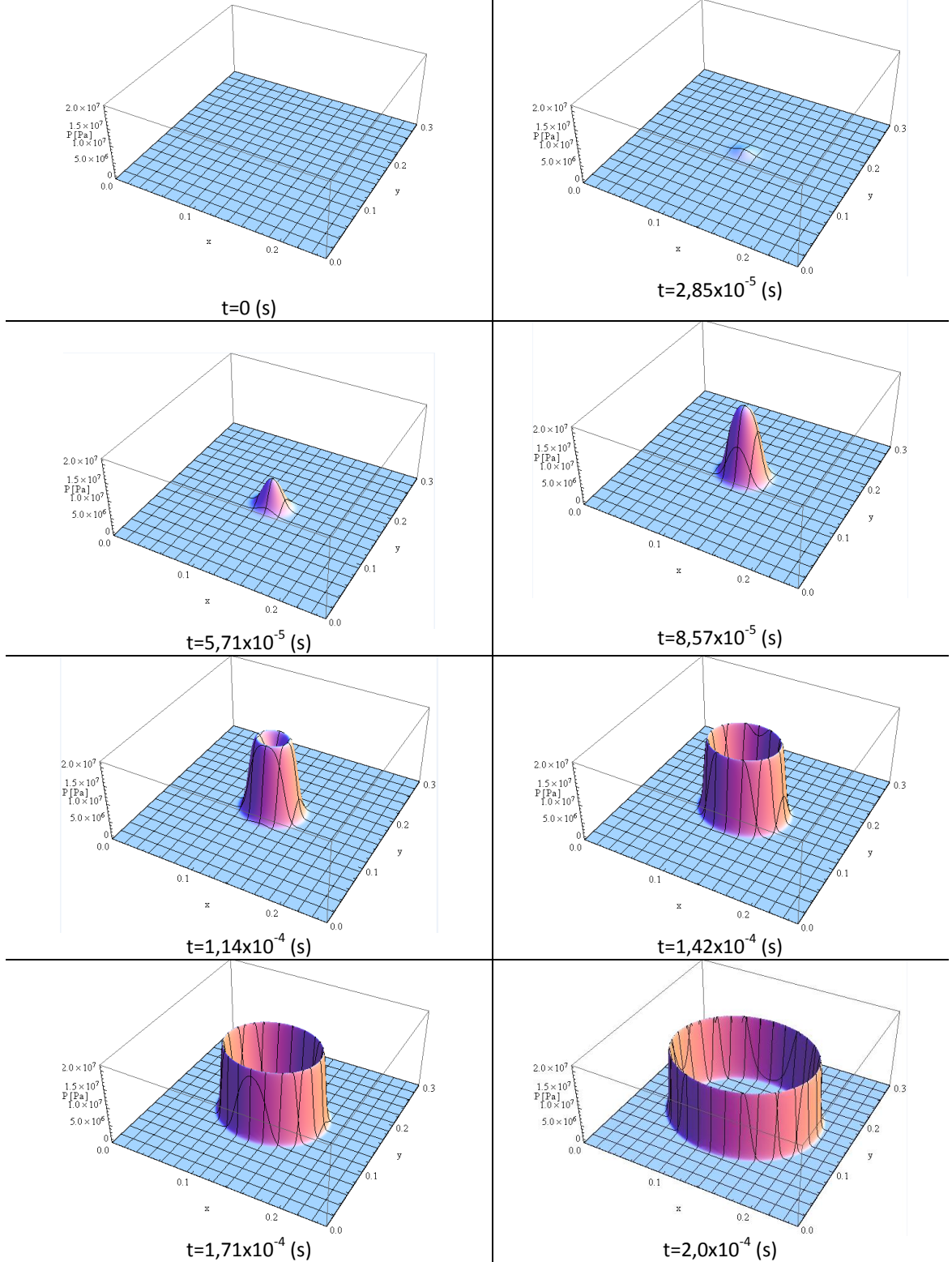


Şekil 6. 20 Anlık basınç yükü fonksiyonu

Sönümsüz durumda anlık olarak uygulanan basıncın zamanla plak yüzeyine yayılımı görülmektedir. Basınç öncelikle plağın orta noktasına etki ederek, kenarlara doğru açılmaktadır. Plak yapısına uygulanan basıncın zamanla değişimi için geliştirilen MATHEMATICA algoritmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Şekillerde değişik zaman adımları için basıncın değişimi gözlenmektedir.

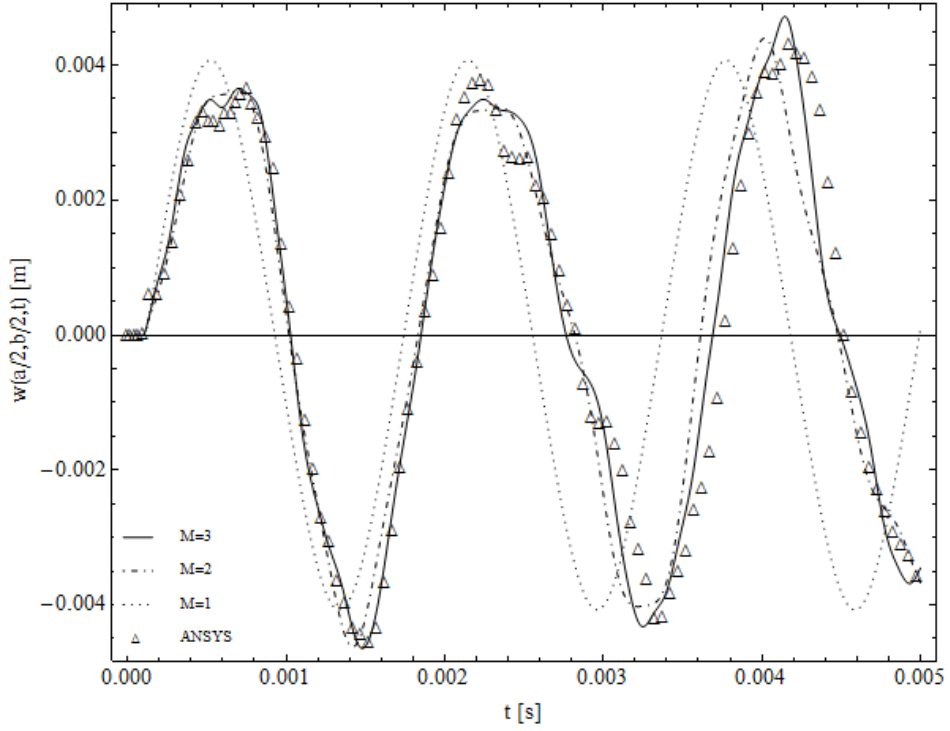
ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilirken eleman tipi 4 düğüm noktalı Quad 4 olarak tercih edilmiştir. 0.25 m x 0.30 m boyutlarındaki dikdörtgen plak, eleman boyutu 0.01 m olan 4 düğüm noktalı elemanlar ile modellenmiştir. Bu durumda plak geometrisi toplam 750 adet Quad 4 tipi elemana ayrılmıştır. Toplam analiz süresi 0.005 (s) olarak belirlenmiştir. Zaman adımı olarak ise toplam analiz süresi 1000 adıma bölünerek 5×10^{-6} (s) olarak alınmıştır. Seçilen zaman adımının yeter düzeyde olduğu

yapılan denemelerle doğrulanmıştır. Şekil 6. 21’de basıncın plak üzerindeki $t=0$ (s) ‘dan $t=2 \times 10^{-4}$ (s) anına kadar olan zamana bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 6. 21 Basıncın plak üzerinde zamana bağlı değişimi

MATHEMATICA yazılımı kullanılarak geliştirilen Galerkin programında yakınsama amacıyla yaklaşım fonksiyonu tek terim ($M=1$), iki terim ($M=2$) ve üç terimli ($M=3$) olarak ele alınmıştır. Bu durumda elde edilen sonuçlar birbirleri ile ve sonlu eleman yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Plak orta noktası yerdeğişmesinin zamana bağlı değişimi Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi için mukayese edilmiştir.



Şekil 6. 22 Plak orta noktası yerdeğişmesinin karşılaştırılması

Şekil 6. 22’de verilen sönümsüz halde gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına göre Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları birbirleri ile uyumludurlar. Özellikle Galerkin yönteminde yaklaşım fonksiyonunun iki ve üç terim alınması durumunda Sonlu eleman sonucuna oldukça yaklaşılmıştır.

6.2.2 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz Plakların Suyun Sönüm Etkisi Olduğu Durumda Dinamik Analizi

Bu bölümde, suyun sönüm etkisinin dikkate alındığı durum için dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Suyun sönüm etkisinin incelenebilmesi ve önerilen basınç fonksiyonun doğruluğunun test edilebilmesi için MATHEMATICA Galerkin yazılımı ve bir dinamik sonlu elemanlar çözücüsü olan LS-DYNA yazılımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Su

altı patlama yüklerine maruz 3 katmanlı kompozit plağın suyun sönüm etkisi olduğu durumda geometrik doğrusal olmayan dinamik analizleri için önerilen zamana bağlı basınç yükü fonksiyonu aşağıdaki gibidir. Buna göre patlayıcı tipi olarak TNT seçildiğinde basınç fonksiyonu en genel halde şu şekilde yazılabilir;

$$P = 2 \times 52.16 \times 10^6 \left(\frac{WW^{1/3}}{R} \right)^{1.13} e^{-\frac{(t-td)^2}{\theta^{2.2}}} - \frac{\rho w c \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M W[m,n][t] \psi}{R0/R} \quad (6.1)$$

Bu ifade Taylor plak teorisi ve suyun sönüm etkisi dikkate alınarak oluşturulmuştur. Sönümlü durumda basınç fonksiyonunun ikinci kısmı, plak boyutları olan t, x ve y ile plağın hızı olan w' değişkenlerine bağlıdır. Bu durumda basınç fonksiyonu 4 adet bağımsız değişkene sahiptir. ANSYS yazılımı ile aynı anda 4 değişkenin tarif edilmesi olanaksızdır. Bu nedenle sönümlü durumda su altı patlama analizlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için dinamik sonlu elemanlar çözücüsü olan LS-Dyna yazılımı tercih edilmiştir.

6.2.2.1 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz Çelik Plağın Suyun Sönüm Etkisi Olduğu Durumda Dinamik Analizi

Ramajeyathilagam vd [45] değişik patlayıcı ağırlığı ve şok faktörlerine sahip yükleme durumlarına karşılık çelik plaklar üzerindeki toplam basıncı ve plak orta noktalarındaki kalıcı deformasyonları deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada 0,30 x 0,25 x 0,002 (m) boyutlarındaki dört kenarından ankastre mesnetli çelik malzemeye sahip plaklar kullanılmıştır.

Çizelge 6. 4 Çelik malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Değer
Elastik Mododülü (E)	2.1x10 ⁵ MPa
Poisson Oranı (γ)	0.3
Yoğunluk (ρ)	7860 (kg/m ³)
Tanjant Modülü (E _t)	250 MPa
Statik Akma Muk. (σ)	400 MPa
Kopma Gerinimi (ε _r)	0.23

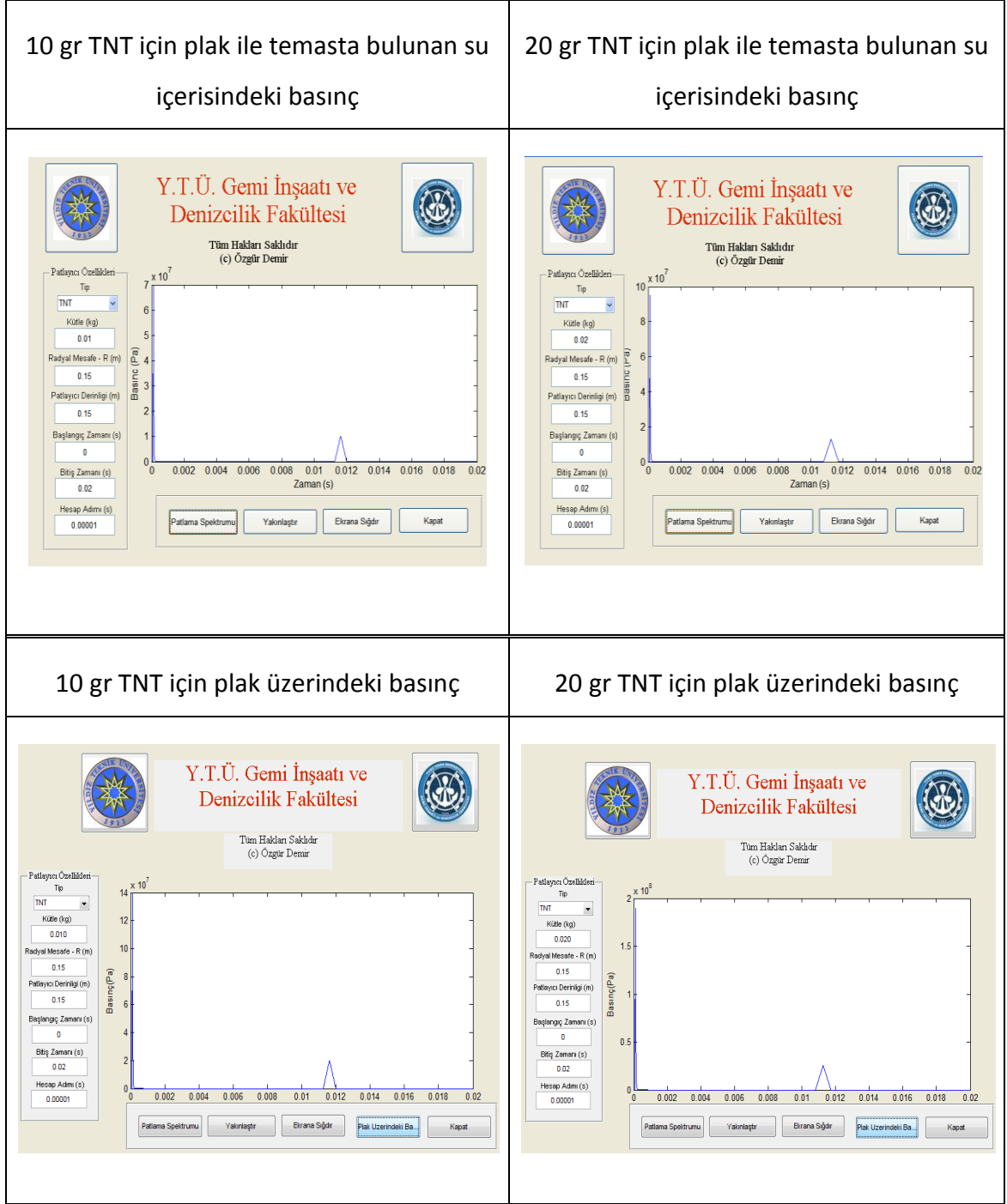
Bu bölümde, LS-Dyna sonlu eleman analiz sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Çelik plak malzeme özellikleri Çizelge 6. 4'de verilmiştir. Çizelge 6. 45'de ise, Ramajeyathilagam vd [45] tarafından 10 gr'dan başlayarak 10 gr artımlar ile 40 gr'a kadar olan TNT kütlesinin suyun 0,15 m altında deneysel olarak patlatılması sonucunda, plak üzerinde gözlenen maksimum basınç ve orta nokta kalıcı deformasyon değerleri yer almaktadır.

Çizelge 6. 5 Çelik plak için deneysel veriler [45]

Deney No	Patlayıcı Ağırlığı (gr)	Patlama Derinliği (m)	Şok Faktörü	Toplam Basınç (MPa)	Kalıcı Deformasyon (m)
TS1	10	0,15	0,300	165	0,0400
TS2	20	0,15	0,424	202	0,0578
TS3	30	0,15	0,520	240	0,0677
TS4	40	0,15	0,600	268	0,0864

Şekil 6. 233'de suyun 0,15 m altında, 10gr ve 20 gr TNT patlaması sonucu oluşan şok basıncının zamanla değişimi Cole yaklaşımı kullanılarak MATLAB programı ile elde edilmiştir. Ardından, MATLAB yazılımı ile elde edilen basınç değerleri deneysel olarak ortaya konulmuş olan değerler ile karşılaştırılmıştır.

Patlama olayı gerçekleştiğinde, ilk olarak şok basıncı gözlenirken, ikinci tepe değeri ise gaz kabarcığı etkisinden kaynaklanmaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarına göre suyun 0,15 m altında 10 gr TNT patlaması ile plak üzerinde 165 MPa basınç değeri ölçülmüştür. MATLAB programı ile elde edilen değer ise 140 MPa seviyesindedir. 20 gr TNT patlaması durumunda ölçülen değer 202 MPa'dır ve buna karşılık MATLAB ile hesaplanan değer ise 190 MPa'dır. Bu durumda sonuçlar birbirleri ile uyumludurlar.



Şekil 6. 23 10 gr ve 20 gr TNT için hedef noktanın hemen altında sudaki basıncın değişimi

6.2.2.1.1 Suyun 0,15 m Altında 20 gr TNT Patlaması Senaryosu İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Sualtı Patlama Analizi

Ramajeyathilagam vd [45] deneysel olarak ortaya koyduğu verilerin kıyaslanması amacıyla LS-Dyna yazılımı ile sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Sonlu elemanlar analizleri 20 gr ve 40 gr patlayıcının 0,15 m su altında patlaması durumları için gerçekleştirilmiştir. Böylece deneysel veriler ile sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırılmıştır. Patlama yüklerine maruz plak çelik malzemeye sahiptir ve kalıcı deformasyonların elde edilebilmesi için elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır.

Durum Denklemleri (Equation Of State (EOS)):

Su altı patlaması için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri ön işlem aşamasında, malzemelerin iç enerjileri, basınç, yoğunluk ve hacimleri vb. gibi durum değişkenleri arasındaki ilişkileri tanımlayan durum (hal) denklem modelinin ve parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Durum denklemi, fizik ve termodinamik alanındaki tanımı ile durum değişkenleri arasındaki ilişkidir. Ayrıca; belirli fiziksel koşullar altında bir maddenin halini belirten termodinamik bir denklemdir. Maddenin sıcaklık, basınç, hacim ve iç enerjisiyle ilgili iki veya daha fazla durum fonksiyonu arasında bağ kuran bir ifadedir. Durum denklemleri, sıvı veya gazların sıcaklık ve basınç ile yoğunlukları arasındaki ilişkiyi ortaya koyarlar. En basit ve kolay durum denklemi ifadesi ortalama bir sıcaklık ve düşük basınç altındaki ideal gazlar için yazılabilir. Bununla birlikte; basınç arttıkça ve sıcaklık düştükçe bu ifadeler karmaşık bir hal alırlar. 1962 yılında İrlandalı Robert Boyle bir seri deneysel çalışmaların sonucunda ilk kez bir durum denklemi önermiştir [102]. Ardından günümüze kadar geçen sürede gazlar ve sıvılar için birçok durum denklemi türetilmiştir.

Su altı patlama sonlu eleman analizleri sırasında hava, su ve patlayıcı malzemesi birer durum denklemi ile birlikte analiz edilmelidirler. Analiz modelinde hava ortamı, ideal gaz olarak ele alınmıştır. Hava malzemesi MAT_NULL ve durum denklem (EOS) modeli lineer polinom (EOS_LINEAR_POLYNOMIAL) olarak kullanılmıştır. Buna göre basınç ifadesi;

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (6.2)$$

Bu ifadede bulunan μ ;

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (6.3)$$

şeklinde yazılabilir. Lineer polinom durum denkleminde $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ ve $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ alındığında ideal gaz davranışını modellemek mümkündür. İfadede yer alan γ özgül ısı oranıdır. Bu durumda basınç yazılırsa,

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (6.4)$$

olarak ifade edilir [53, 103]. Su altı patlama analizlerinde basınç, hacim ve yoğunluk nonlinear olarak değişmektedir. Bu nedenle suyun modellenmesinde lineer bir durum denklem modeli kullanmak doğru bir yaklaşım değildir. Bu nedenle su hacminin modellenmesinde Gruneisen (EOS_GRUNEISEN) tipi durum denklemi kullanılmıştır. Su içerisindeki karmaşık dalga yayılımı ve kavitasyon etkisini ancak bir nonlinear durum denklemi ile çözmek mümkündür. Kübik şok hızı- partikül hızı tipindeki Gruneisen durum denklemi ile sıkışabilir malzemelerin basınç ifadesi şu şekilde yazılabilir;

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (6.5)$$

Burada E birim hacimdeki iç enerjiyi, C u_s - u_p eğrisinin kesişimini, S_1, S_2 ve S_3 ise u_s - u_p eğrisinin eğim katsayılarını, γ Gruniesen gaması, a hacim düzeltme faktörünü ifade etmektedir.

Birim hacimde sıkışabilirlik;

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (6.6)$$

olarak ifade edilir. Genleşebilen malzemeler için basınç ifadesi şu şekilde yazılabilir;

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (6.7)$$

Patlayıcı maddelerin modellenmesinde Jones-Wilkins-Lee (EOS_JWL) tipi durum denklemi kullanılır. Buna göre basınç ifadesi şöyle yazılabilir;

$$P = A\left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{w}{V}E \quad (6.8)$$

burada E birim hacimdeki iç enerjiyi, V birim hacmi ifade etmektedir. Jones-Wilkins-Lee tipi durum denklemi patlayıcı malzeme tarifi ile birlikte kullanılmalıdır. Çizelge 6. 6'da su ve hava için durum denklemi parametreleri ile Çizelge 6. 7'de TNT durum denklemi parametreleri verilmiştir.

Çizelge 6. 6 Su ve Hava için EOS parametreleri

Özellikler	Su	Hava
Yoğunluk (g/mm ³)	1	0.001
C ₀ (MPa)	0	0
C ₁ (MPa)	2002	0
C ₂ (MPa)	8436	0
C ₃ (MPa)	8010	0
C ₄	0.4394	0.4
C ₅	1.3937	0.4
C ₆	0	0
E ₀	0.2086	0.25
V ₀	1	1

Çizelge 6. 7 TNT EOS özellikleri

Özellikler	TNT
Yoğunluk (g/mm ³)	1630
Detonasyon Hızı	6930
Chapman-Jouget Basıncı	2.1E+4
A	3.37E+5
B	3231
R ₁	4.15
R ₂	0.95
OMEGA	0.3
E ₀	7000
V ₀	1

Malzeme Modeli:

Malzeme modeli durum denklemleri ile birlikte kullanılan önemli bir tariftir. Su ve havanın modellenmesinde Null (MAT_NULL) tipi malzeme modeli kullanılmıştır. Bu modele göre dinamik viskozite tarifi verilebilmektedir. Ayrıca su içerisindeki gerilmeler hesaplanabilmektedir. Su içerisindeki viskoz gerilme şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_{dij} = 2\mu\dot{\varepsilon}'_{ij} \quad (6.9)$$

bu ifadede μ sıfırdan farklı bir değerdir. $\dot{\varepsilon}'_{ij}$ ise birim şekil değiştirme hızının deviatoric bileşenidir.

Null malzeme Gruneisen tipi durum denklemi ile birlikte kullanıldığında, malzeme içerisindeki gerilme şu şekildedir;

$$\sigma_{ij} = -P_{EOS}I_d + \sigma_{dij} \quad (6.10)$$

TNT modellenmesinde patlayıcı madde için (MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN) tarifi kullanılmıştır. JWL durum denklemi ile birlikte kullanılan patlayıcı madde tarifi aynı zamanda yanmayı da modellemektedir.

$$F_1 = \frac{\rho V^2}{P_{cj}} \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad (6.11)$$

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (6.12)$$

$$F_2 = (t - t_b)V \frac{2}{3\Delta x} \quad (6.13)$$

ifade de yer alan t_b yanma zamanını, Δx eleman boyunu, V patlayıcı elemanın başlangıç hacmini, P_{cj} Chapman-Jouguet basıncını temsil etmektedir. Buna göre patlayıcı maddenin oluşturacağı toplam basınç;

$$P = F.P_{JWL} \quad (6.14)$$

Şeklinde yazılabilir. Bunun yanı sıra üzerinde patlama analizleri gerçekleştirilen çelik plak için plastik malzeme modeli (MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) kullanılmıştır. Bu malzeme modeli ile Cowper-Symonds birim şekil değiştirme hız modeli kullanılabilmektedir. Böylece malzemelerin yüksek hız ve frekanstaki davranışlarını da

modellemek mümkün olmaktadır. Cowper-Symonds modelinde statik akma gerilmesi değeri yerine, hesaplanan dinamik akma gerilmesi değeri dikkate alınarak kalıcı deformasyon değerleri hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{dy} = \sigma_y \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{n}}\right) \quad (6.15)$$

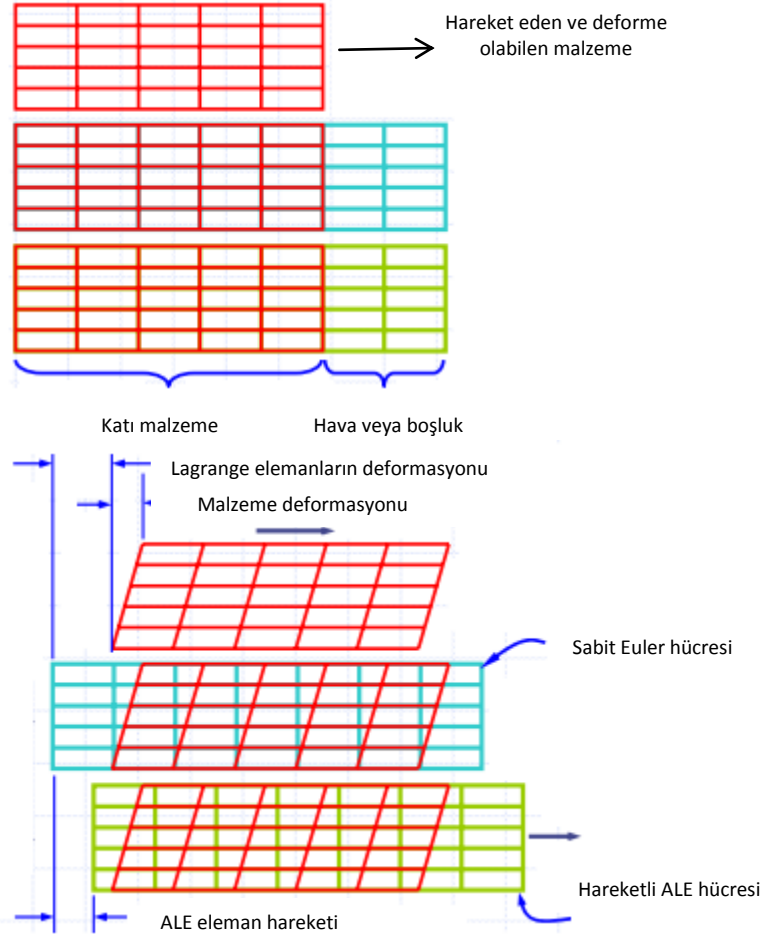
burada σ_y statik akma gerilme değeri, D ve n malzeme parametreleri olarak tanımlanmıştır. Tez çalışmasında kullanılan çelik malzeme için bu değerler D=40/s ve n=5 olarak alınmıştır [45].

Sınır Şartları ve Yapı Sıvı Etkileşimi:

Su altı patlama analizlerinde plak yapısı dört kenarından ankastre şekilde modellenmiştir. Bunun yanı sıra su ve hava hacimlerinin dış yüzeyleri ise yansıma olmaması için simetri (Non-Reflecting) sınır şartları ile modellenmiştir.

Analizler sırasında yapı-sıvı etkileşimi için Arbitrary Lagrangian/Eulerian (ALE) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım ile sıvı içerisinde dinamik hesaplar gerçekleştirilerek, yapısal deformasyonlar bulunabilmektedir. Sonlu elemanlar ve akışkanlar mekaniği hesaplamalarında kullanılan genel halde 2 tip eleman formülasyonu mevcuttur. Bunlardan ilki akışkanlar mekaniğinde kullanılan ve deforme olmayan Euler ve diğeri ise yapısal analizlerde kullanılan ve deforme olabilen Lagrange tipi eleman formülasyonlarıdır. Bunlara ek olarak patlama ve yapı-sıvı etkileşim analizlerinde kullanılan bir diğere özel eleman formülasyonu ise Arbitrary Lagrangian/Eulerian (ALE) formülasyonudur. ALE formülasyonuna sahip elemanlar Euler ve Lagrange tipinde davranabilmektedirler.

Bir su altı patlamasında farklı malzemelerin hareketlerini izleyebilmek oldukça önemlidir. Patlamanın olduğu su hacminde patlama gerçekleşmeden önce iki farklı malzeme tipi mevcuttur. Bunlar su ve patlayıcı malzemeleridir. Patlama gerçekleştikten sonra ise 3 değişik malzeme ortamda mevcuttur. Bunlar patlayıcının patlamadan kalan kısmı, yanmış artık gaz ürünleri ve sudur. Bu sebepten dolayı LS-Dyna malzemeleri yoğunluklarına göre takip eder ve bu işlem için ALE formülasyonunu kullanır.



Şekil 6. 24 ALE eleman formülasyonu gösterimi [104]

Euler eleman formülasyonuna sahip hacimde elemanlar uzayda sabittirler ve malzemeye atanmış olan sanal elemanlar hareket ederek bir akış meydana getirirler. Şekil 6. 24'de verilen ALE formülasyonuna sahip olan hacimde ise 2 adet üst üste bindirilmiş eleman mevcuttur ve bunlar uzayda hareketlidirler [104].

Su altı patlamasında farklı malzemelerin hareketlerini izleyebilmek oldukça önemlidir. Patlama olayında ortamda birden fazla malzeme olduğundan dolayı çoklu malzeme ALE (multi-material ALE) formülasyonu kullanılır. Bu formülasyon daha önce verilen ALE formülasyonu ile aynıdır. Farklı olarak her bir eleman üzerinde, tüm malzemeler için ayrı ayrı hesap yapılır. i malzeme grubu, ε_i birim şekil değiştirme hızı, E_i iç enerji, τ_i deviatorik veya kayma gerilmesi, P_i durum denkleminde gelen basınç olduğuna göre gerilme ifadesi şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_i = -P_i + \tau_i \quad (6.16)$$

düğüm noktası kuvveti ise;

$$F = \alpha_i \int_V B^T \sigma_i \quad (6.17)$$

α_i her bir elemandaki hacim karışım oranıdır ve şu şekildedir;

$$\sum_{i=1}^{N_{grup}} \alpha_i = 1 \quad (6.18)$$

N_{grup} bir eleman içindeki farklı malzemeleri ifade etmektedir. Bu durumda basınç ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$P_1 - K_1 \frac{\partial V_1}{V_1} = P_2 - K_2 \frac{\partial V_2}{V_2} \quad (6.19)$$

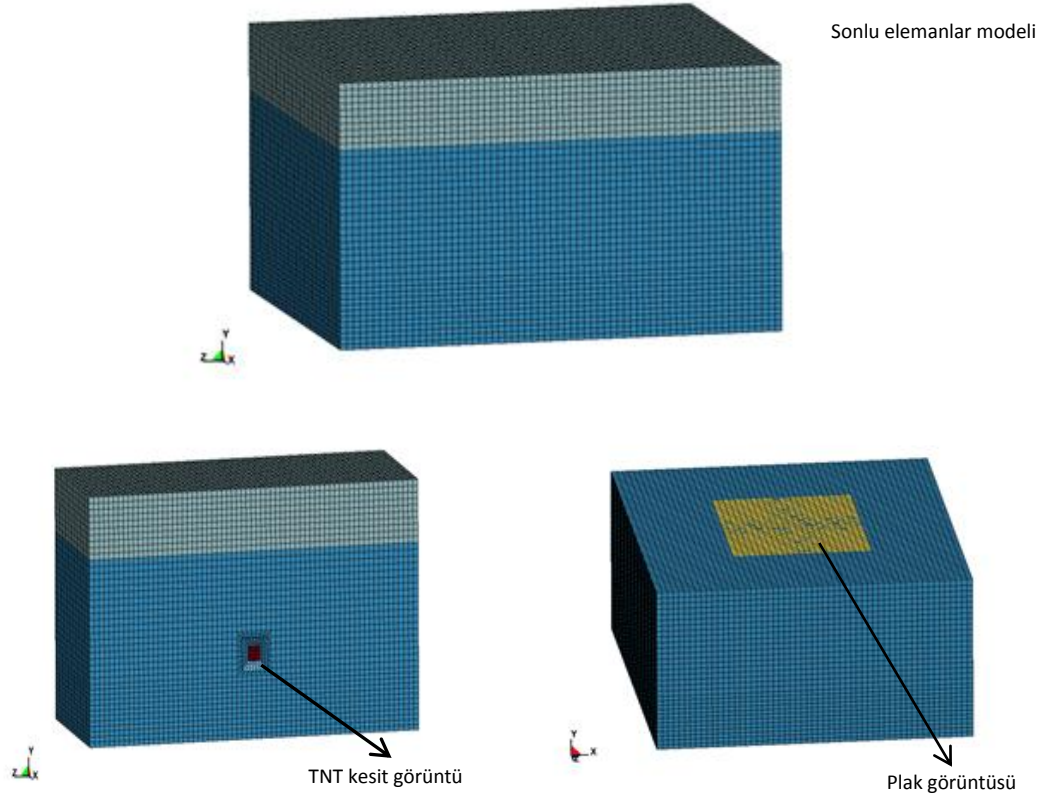
$$\delta V_1 + \delta V_2 = \delta V \quad (6.20)$$

δV lagrange hesaplaması sonrasında bir eleman içerisindeki malzeme miktarıdır [53].

6.2.2.1.2 Suyun 0,15 m Altında 20 gr TNT Patlaması Senaryosu İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Su Altı Patlama Analizi

20 gr TNT'nin 0,15 m su altında patlama senaryosunda ilk olarak sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken önemli husus; eleman boyutunun ve tipinin seçimidir. Uygun eleman boyutunun seçilmesi analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyen en önemli parametredir. Bu çalışmada aynı zamanda bir eleman yakınsaması analizi de gerçekleştirilerek uygun eleman boyutu belirlenmiştir.

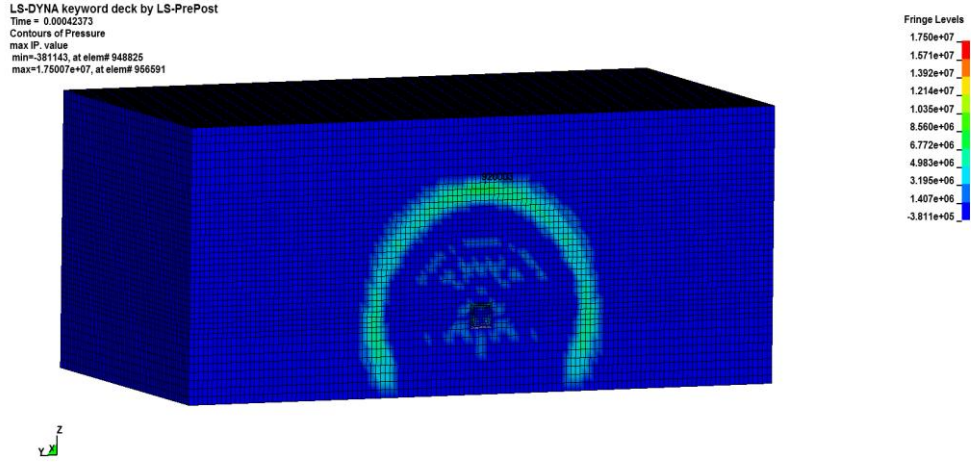
Hazırlanan sonlu elemanlar ağ modelinde su olarak modellenen hacim yaklaşık 97.300 hex eleman, hava olarak modellenen hacim 32.450 hex eleman, plak yapısı ise yaklaşık 600 adet quad eleman ve TNT olarak modellenen hacim ise 27 adet hex elemandan oluşmaktadır. Plak yapısı için kullanılan eleman boyutu 0,01 (m), su hacmi kademeli olarak artan 0,004 ile 0,01 (m) eleman boyutu ve hava hacmi ise 0,01 (m) eleman boyutu kullanılarak modellenmiştir. TNT yapısı kademeli olarak artacak şekilde ve 0,007 ile 0,01 (m) arasında değişen eleman boyutu ile modellenmiştir. Şekil 6. 25'de su altı patlaması LS-Dyna sonlu eleman ağı görülmektedir. Kırmızı renk ile modellenen hacim TNT, açık mavi olan hacim hava, koyu mavi olan hacim su ve sarı renkli olan yapı ise plağı temsil etmektedir.



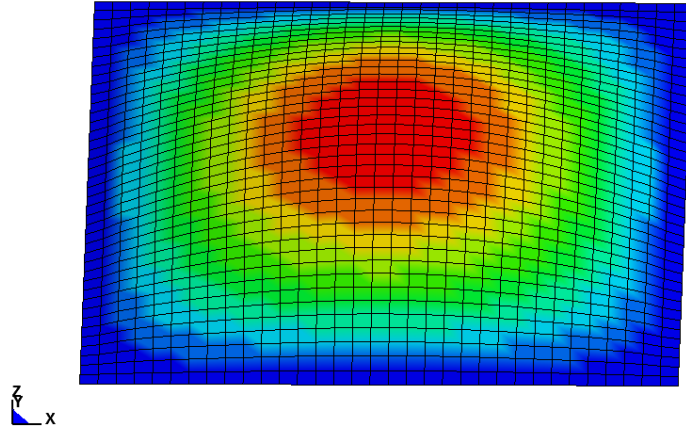
Şekil 6. 25 Su altı patlama LS-Dyna sonlu eleman modeli

İkinci olarak hazırlanan sonlu elemanlar ağında ise su olarak modellenen hacim yaklaşık 120.000 hex eleman, hava olarak modellenen hacim 40.000 hex eleman, plak yapısı ise yaklaşık 750 adet quad eleman ve TNT olarak modellenen hacim ise 350 adet hex elemandan oluşmaktadır. Plak yapısı için kullanılan eleman boyutu 0,009 (m), su hacmi kademeli olarak artan 0,004 ile 0,009 (m) eleman boyutu ve hava hacmi ise 0,009 (m) eleman boyutu kullanılarak modellenmiştir. TNT yapısı kademeli olarak artacak şekilde ve 0,004 ile 0,001 (m) arasında değişen eleman boyutu ile modellenmiştir.

Şekil 6. 26 ve Şekil 6. 27’de 20 gr patlayıcının 0,15 m su altında patlaması sonucunda oluşan şok dalgasının su hacmi içerisindeki ilerlemesi ile plak üzerine etki eden basınç ile birlikte oluşan yerdeğiştirme dağılımı verilmiştir. Patlama sonucunda ortaya çıkan şok basıncı küresel bir şekilde patlama merkezinden dışarıya doğru hareket etmektedir.

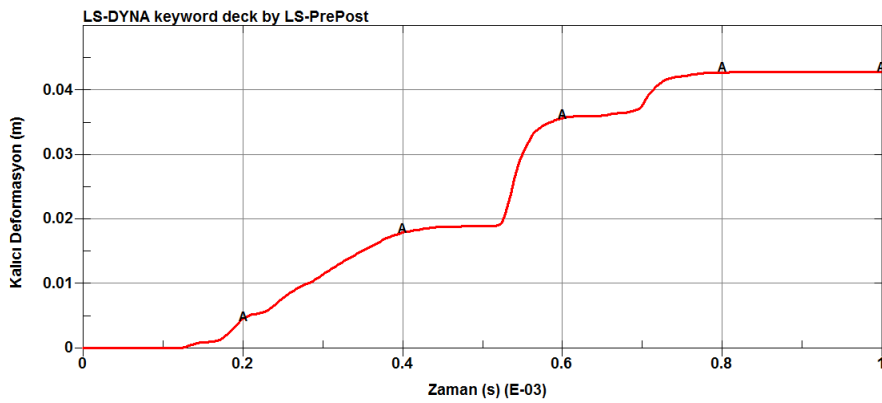


Şekil 6. 26 Şok basıncının ilerlemesi



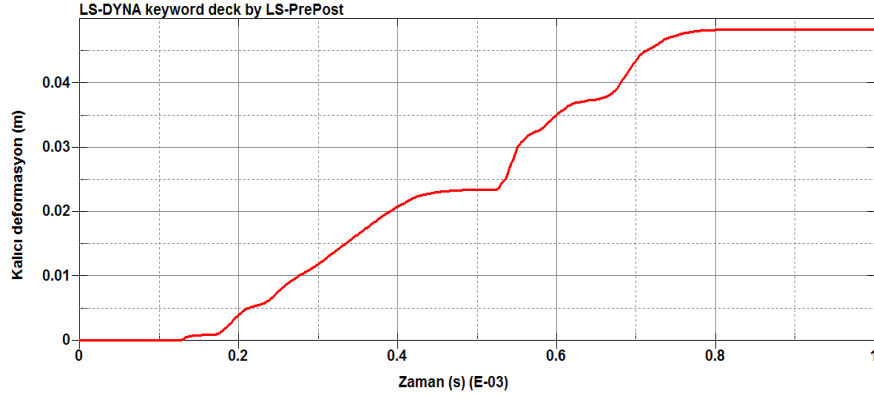
Şekil 6. 27 Patlama analizi çelik plak yerdeğıştirmesi

Şekil 6. 28'de verilen 20 gr patlayıcının 0,15 m su altında patlaması sonucunda 2mm kalınlığa sahip elasto-plastik çelik plak üzerinde orta noktada gözlenen kalıcı deformasyon değeri kaba olarak modellenen ağ için 0,043 m seviyesindedir.



Şekil 6. 28 Kaba ağ ile elde edilen orta nokta kalıcı deformasyonu

Daha küçük eleman boyutu seçilerek modellenen durumda ise orta nokta kalıcı deformasyon değeri 0,049 m seviyesinde elde edilmiştir.



Şekil 6. 29 İnce ağ ile elde edilen orta nokta kalıcı deformasyonu

Şekil 6. 29'da verilen 20 gr TNT için sonlu eleman ağ yakınsaması amaçlı yapılan analizlerde ince ağ yapısı ile modellenen durumda analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile daha uyumlu olduğu gözlenmiştir.

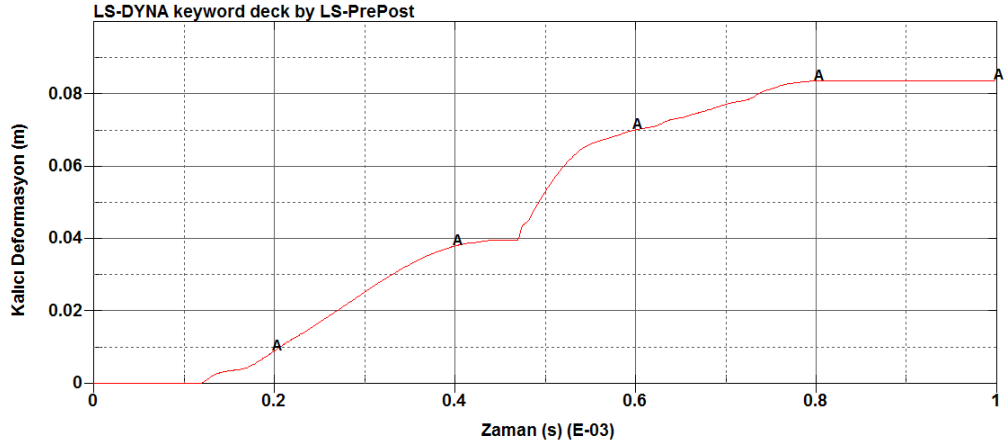
Çizelge 6. 8 Analiz ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Hesap Yöntemi	Patlayıcı Ağırlığı (gr)	Patlama Derinliği (m)	Kalıcı Deformasyon (m)
Deneysel	20	0,15	0,057
SEY (Kaba Ağ)	20	0,15	0,043
SEY (İnce Ağ)	20	0,15	0,049

6.2.2.1.3 Suyun 0,15 m Altında 40 gr TNT Patlaması Senaryosu İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Su Altı Patlama Analizi

Bu bölümde suyun 0,15 m altında 40 gr TNT patlaması senaryosu sonlu elemanlar yöntemi ile LS-Dyna yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. LS-Dyna ile yapılan analizlerde elasto-plastik malzeme tarifi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen plak orta nokta kalıcı deformasyonları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler ile 40 gr patlayıcının 0,15 m su altında patlaması sonucunda 2mm kalınlığa sahip elasto-plastik çelik plak üzerinde orta noktada gözlenen kalıcı deformasyon değeri 0,0839 m seviyesindedir (Şekil 6. 30).



Şekil 6. 30 Orta nokta kalıcı deformasyonu

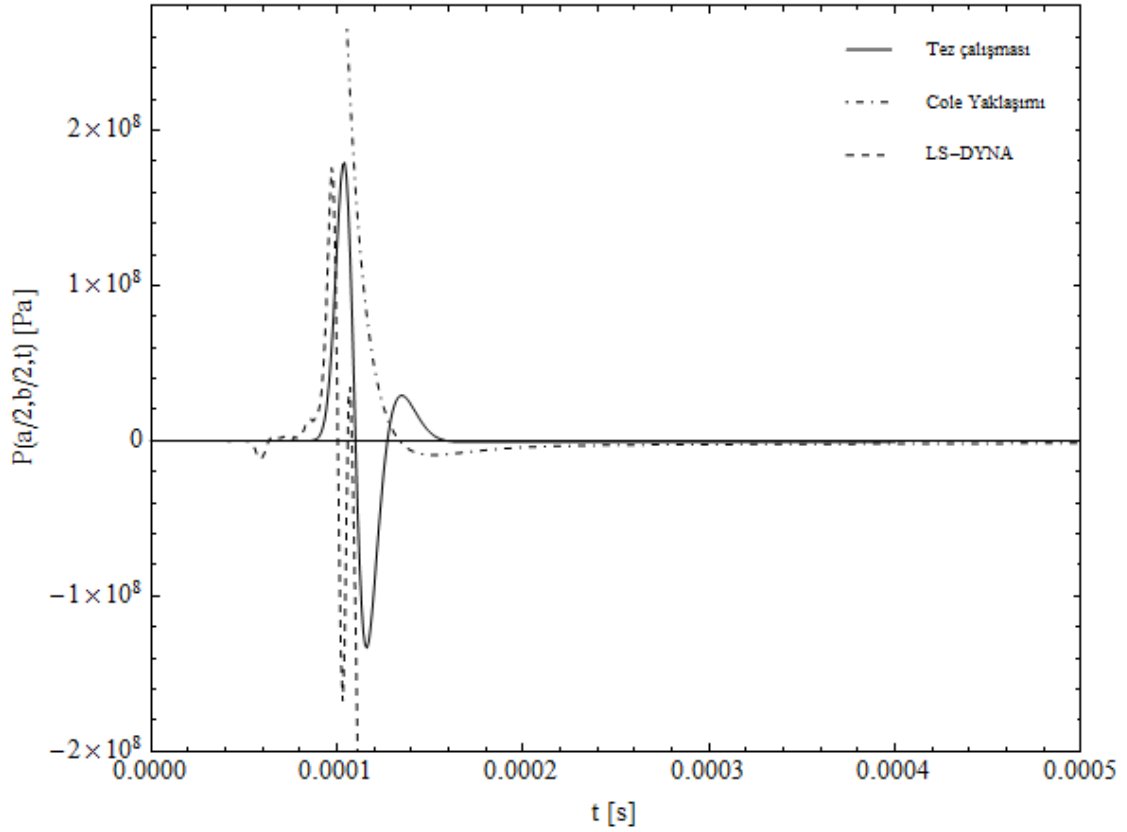
Çizelge 6. 9 Deneysel ve sonlu eleman sonuçlarının kıyaslaması

Hesap Yöntemi	Patlayıcı Ağırlığı (gr)	Patlama Derinliği (m)	Kalıcı Deformasyon (m)
Deneysel	40	0,15	0,0864
SEY (LS-Dyna)	40	0,15	0,0839

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sonucunda orta nokta kalıcı deformasyonu 0,0839 (m) olarak elde edilmiştir. Deneysel olarak ise bu değer 0,0864 olarak verilmiştir. Bu durumda; 40 gr patlayıcının 0,15 m su altında patlaması sonucunda 2mm kalınlığa sahip elasto-plastik çelik plak üzerinde orta nokta kalıcı deformasyon değerleri birbirleri ile uyumludur.

Sonlu elemanlar yöntemi ile model hazırlama ve çözüm aşaması oldukça uzun süre almaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemini kullanarak optimizasyon çalışmasının yapılması zordur. Özellikle çok sayıda çözümün uygunluğunun test edilmesi neredeyse imkansız bir hal almaktadır. Tez çalışmasında; optimizasyon çalışmalarının yapılabilmesi için MATHEMATICA yazılımı kullanılarak Galerkin yöntemi ile katmanlı kompozitlerin dinamik analizini gerçekleştirebilen bir algoritma

hazırlanmıştır. Bu algoritmanın uygunluğunun test edilebilmesi amacıyla çelik plak üzerinde bir doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla; 40 gr patlayıcının 0,15 m su altında patlaması senaryosu için LS-Dyna ve Galerkin çözücüsü ile çelik plak üzerinde orta nokta basınçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. 31 Plak orta noktası basıncının karşılaştırılması

Galerkin ve sonlu elemanlar analizleri ile aynı zamanda tez çalışmasında önerilen basınç fonksiyonu doğrulanmaktadır. Yapı sıvı etkileşimi olduğu durumda plak üzerinde orta noktada oluşan basıncın zamanla değişimi Şekil 6. 311'de verilmiştir. Bunun yanı sıra, Şekil 6. 311'de önerilen basınç fonksiyonu ve Cole basınç yaklaşımı ile gerçekleştirilen Galerkin çözümü sonucunda plak orta noktasından ölçülen basıncın zamanla değişimleri ile LS-Dyna çözümü ile elde edilen plak orta nokta basıncı kıyaslanmıştır.

Buna göre; LS-Dyna sonuçları ve tez çalışmasında önerilen basınç fonksiyonu ile gerçekleştirilen Galerkin sonuçları birbirleri ile son derece uyumludurlar. Özellikle basıncın geldiği ilk anda ve basıncın azalarak negatif basınca indiği bölümde LS-Dyna ve

Galerkin sonuçları birbirleri ile uyumludur. Cole yaklaşımı ile basıncın negatif olduğu kısım görülememektedir. İlerleyen zaman adımında suyun sönüm etkisi ile birlikte plak üzerindeki basınç sönümlenmektedir.

SU ALTI PATLAMA YÜKLERİNE MARUZ KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN BASTIRILAMAYAN SIRALAMALI GENETİK ALGORİTMA (NSGA-II) OPTİMİZASYONU

Bu bölümde su altı patlama yüklerine maruz katmanlı kompozit plakların çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; çok amaçlı genetik algoritma yaklaşımlarından olan Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır. Katmanlı kompozitlerin su altı patlama yüklerine karşılık dinamik çözümlerini yapan Galerkin programına optimizasyon algoritması eklenerek optimum kütle ve hasar indeksine (Tsai-Wu teorisine göre) sahip plak yapıları ve bunların dizilim açıları belirlenmiştir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde öncelikle, birbirleriyle çelişen en az iki amaç fonksiyonunun doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada; kütle ve kompozit hasar indeksi birbirleri ile çelişen iki amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Suyun 0,15 metre altında 20 gr TNT patlamasına maruz 3, 5, 7 ve 9 katmanlı kompozit plakların su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık çok amaçlı (NSGA-II) optimizasyonları gerçekleştirilmiş ve elde edilen optimum çözümler için kütle değerleri ile hasar indeksleri hesaplanmıştır.

7.1 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz Katmanlı Kompozit Plakların Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu

Bu bölümde MATHEMATICA yazılımı kullanılarak Galerkin yöntemi ile katmanlı kompozit plakların su altı patlama yüklerine karşılık Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 7. 1'de gösterilen 0,15 metre suyun altında 20 gr TNT patlamasına maruz 3, 5, 7 ve 9 katmanlı kompozit

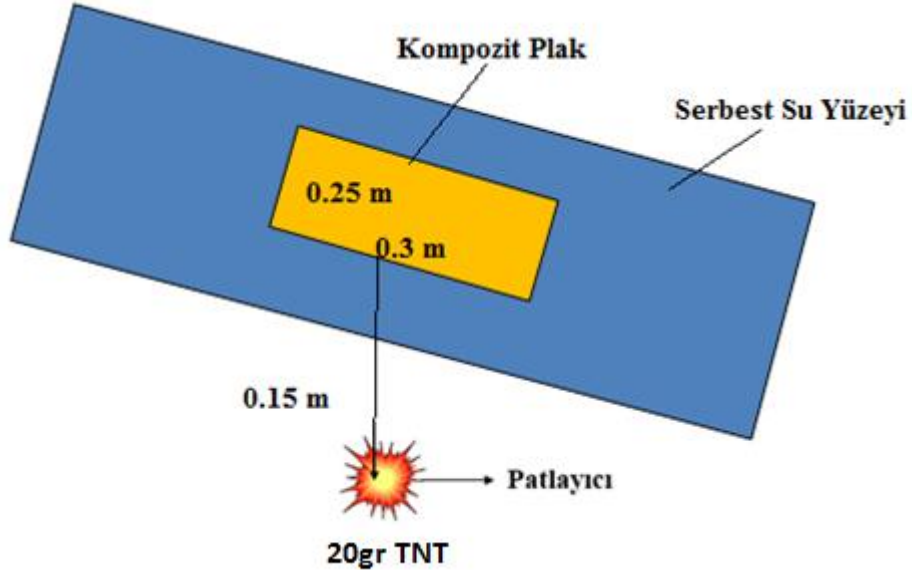
plakların su altı patlama kaynaklı şok yüklerine karşılık çok amaçlı optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Katmanlı kompozit plağın hasar indeksi (Tsai-Wu teorisine göre) ve kütlesi minimize edilmek istenmiştir ve sonuç olarak optimum noktada bir çözüm kümesi için bu amaç sağlanmıştır.

$$\begin{aligned} \min_x &= FI \\ \min_x &= m \end{aligned} \quad (7.1)$$

buna karşılık parametreler;

$$\begin{aligned} ns_i^a &\leq ns_i \leq ns_i^u, \\ hk_i^a &\leq hk_i \leq hk_i^u, \\ \theta a_i^a &\leq \theta a_i \leq \theta a_i^u, \\ mn_i^a &\leq mn_i \leq mn_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (7.2)$$

burada, x karar parametreleri vektörüdür, m plak kütlesi, FI kompozit plak hasar indeksi, ns_i^a ve ns_i^u katman sayısı alt ve üst parametre limiti, hk_i^a ve hk_i^u katman kalınlığı alt ve üst parametre limiti, θa_i^a ve θa_i^u katman açısı alt ve üst parametre limiti, mn_i^a ve mn_i^u malzeme numarası alt ve üst parametre limiti olarak tanımlanır.



Şekil 7. 1 Katmanlı kompozit plak optimizasyonu

Sınırlayıcı parametreler olarak kompozit plağın katman sayısı, katman kalınlığı, katman açısı ve malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Kompozit plakların imalat aşamaları ve

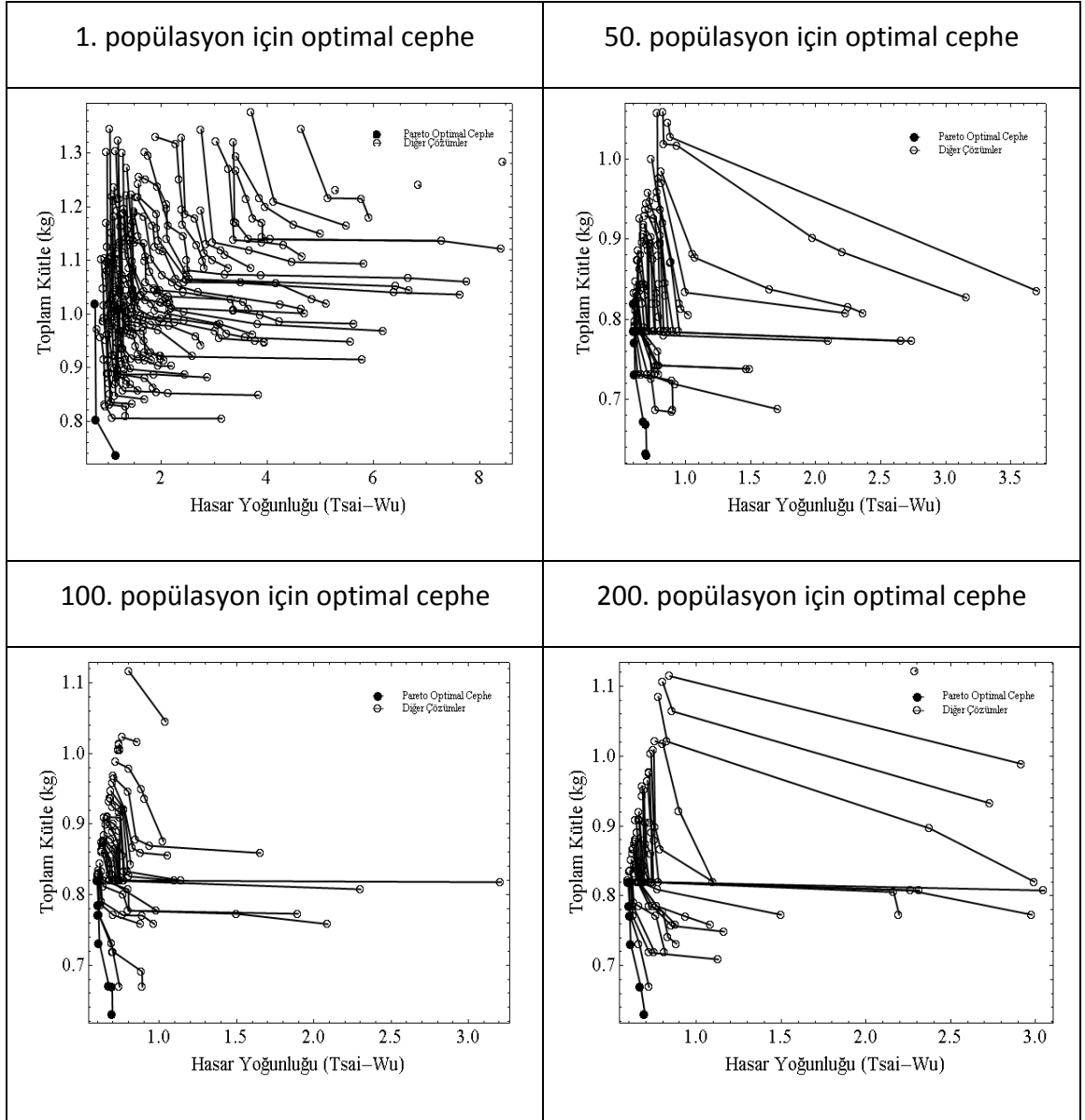
ilgili standartlar düşünülerek minimum plak kalınlığı 6 mm değerin altına inmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır. Problemin çözümlü için gerekli olan malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 6. 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada; katmanlı kompozit plakların optimizasyonu için kullanılan genetik parametreler; gerçek değır kodlaması, jenerasyon sayısı $j=200$, popülasyon sayısı $p=200$, çaprazlama olasılığı $P_c = 1$, mutasyon olasılığı $P_m = 1/(3 * Katman Sayısı)$ olarak ele alınmıştır. Seçme mekanizması ise Rulet çarkı seçim yöntemidir.

7.1.1 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 3 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu

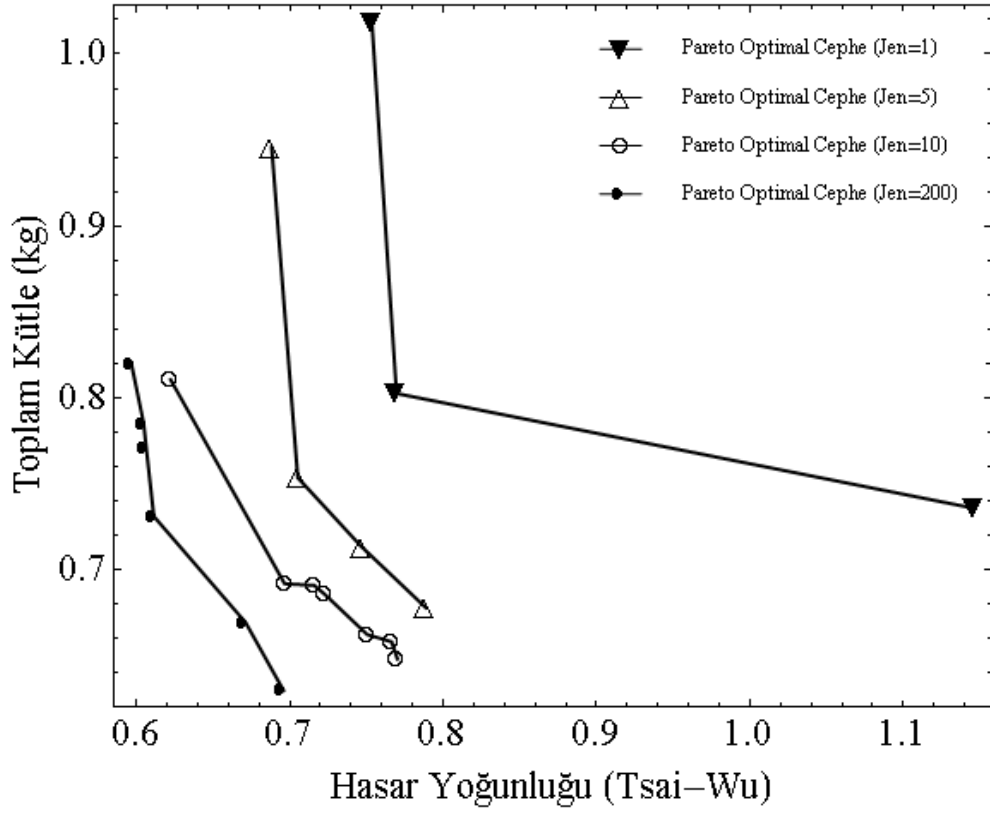
Suyun 0,15 m altında 20 gr TNT patlaması sonucu oluşan şok yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın su altı patlama yüklerine karşılık Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı genetik algoritma optimizasyonunda toplam jenerasyon ve popülasyon sayısı 200'dür. Dolayısıyla optimizasyon işlemi sırasında 200x200 adet birey arasından optimum olan bireyler belirlenmiştir. Katmanlı kompozit plağın hasar indeksi ve kütlesi minimize edilmek istenmiştir. Ayrıca, sınırlayıcı parametreler olarak kompozit plağın katman sayısı, katman kalınlığı, katman açısı ve malzeme özellikleri optimizasyon hesaplamalarına dahil edilmiştir.

3 katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sırasında elde edilen 1, 50, 100 ve 200. jenerasyon için tüm çözümler şekil 7. 2'de verilmiştir. şekillerde plağın kütlesine karşılık hasar indeksleri görölmektedir. İlk oluşturulan jenerasyonda sonuçlar ham olmakla birlikte çok fazla sayıda bireyden oluşmaktadır. Optimizasyon işlemine devam edildikçe 50. ve 100. jenerasyonlarda çözümlerin yakınsadığı görölmektedir. Son olarak oluşturulan 200.jenerasyon ise optimum çözümlerden oluşmaktadır. Herbir şekilde, pareto optimal çözümler ile birlikte elde edilen diğer çözümler bir arada verilmiştir.



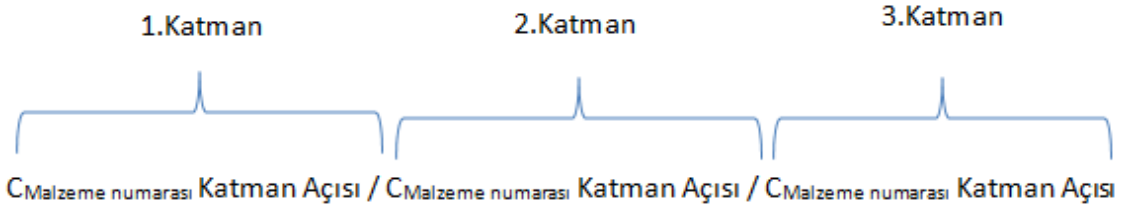
Şekil 7. 2 Pareto optimal çözümler

Şekil 7. 3'de pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi görülmektedir. Buna göre 1. jenerasyonda sonuçlar henüz yakınsamamıştır. 200.jenerasyona gelindiğinde elde edilen pareto optimal cephe tümüyle optimal çözümlerden oluşmaktadır ve bu çözümler 6 adettir.



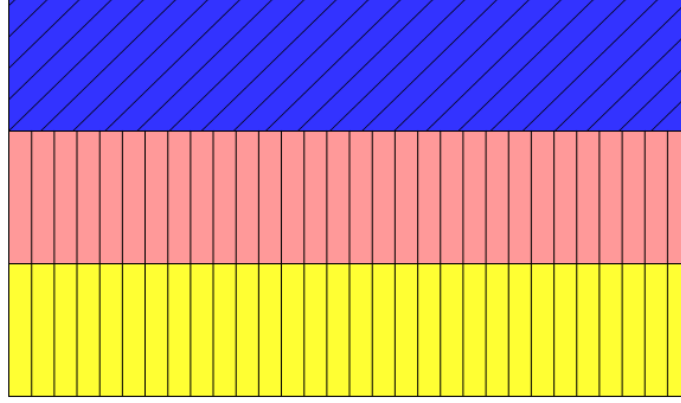
Şekil 7. 3 Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi

Elde edilen jenerasyon için katman dizilim açısı, malzeme seçimi ve plak ağırlığı aşağıdaki gibidir. 3 katmanlı kompozit plak için sonuçların gösterilmesinde;



şeklinde bir gösterim kullanılmıştır. Alt katman 1, orta katman 2 ve üst katman 3 olarak numaralandırılmıştır. Ayrıca Çizelge 8’de malzemelere numaralar verilerek, herbiri için ayrı renkler atanmıştır. Örneğin; Şekil 7. 4’te 3 katmanlı kompozit plağın optimizasyon sonuçları verilmiştir.

$$(c_690/c_590/c_745) f_1=0.666, f_2=0.820\text{kg}$$



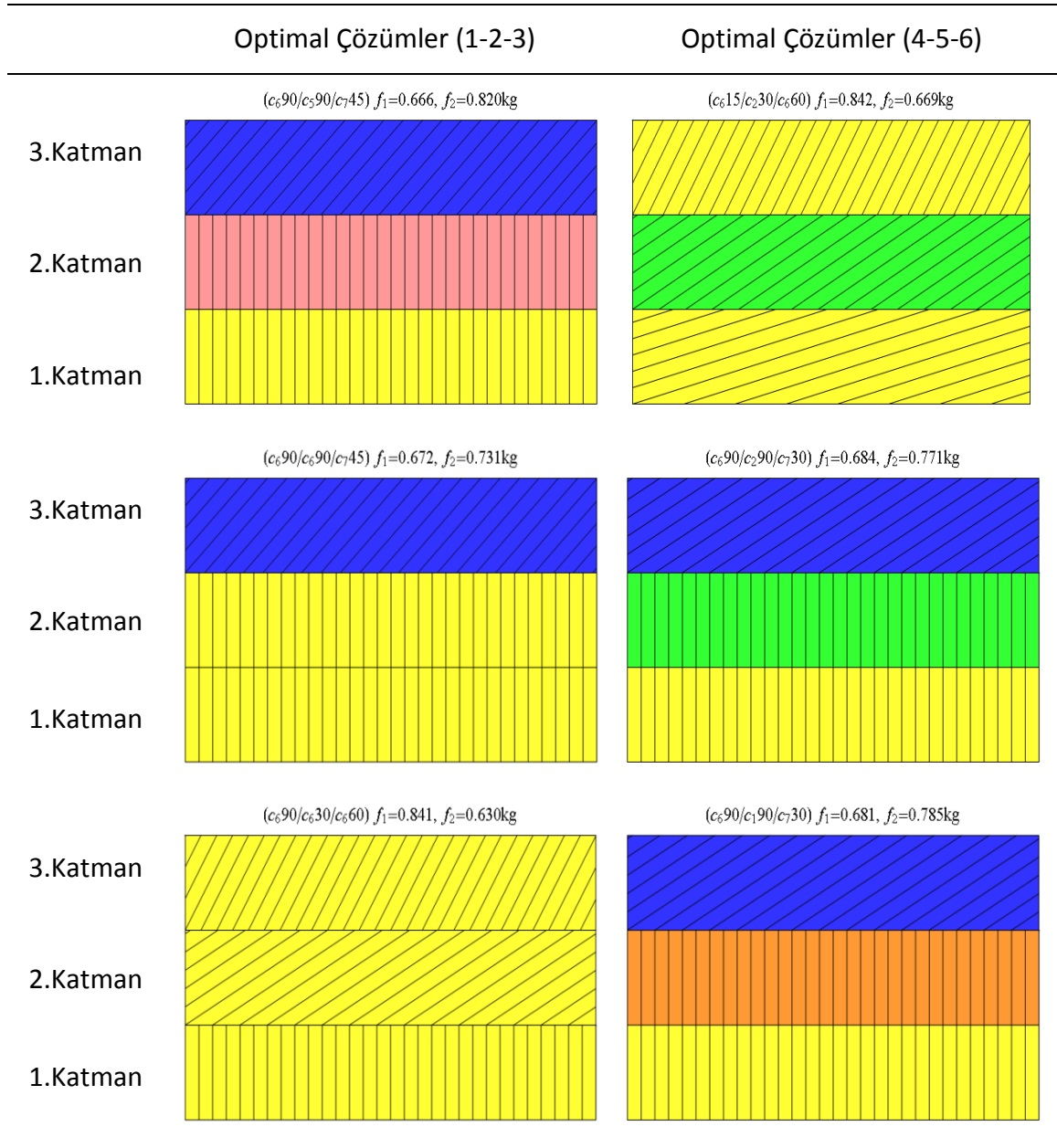
Şekil 7. 4 Optimizasyon sonuçlarının gösterimi

Katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sonucunda elde edilen katman açısı ve malzeme seçimi ile hasar indeksi ve plak kütle değerleri Çizelge 7. 1'de verilmiştir. Buna göre en alt katman (1. katman) için malzeme kodu 6 ve dizilim açısı 90 derecedir. 2. Katman için 5 numaralı malzeme 90 derece dizilim açısı ile ve üst katman ise 7 numaralı malzeme ve 45 derece dizilim açısı ile kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre hasar indeksi $f_1=0,666$ ve plak ağırlığı $f_2=0,820$ kg'dır.

Çizelge 7. 1 Katman sayısı 3 olan kompozit plak için optimal çözümler

	1. Katman			2. Katman			3. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1. Opt. Çöz	6	90	1/500	5	90	1/500	7	45	1/500
2. Opt. Çöz	6	90	1/500	6	30	1/500	6	60	1/500
3. Opt. Çöz	6	90	1/500	6	90	1/500	7	90	1/500
4. Opt. Çöz	6	15	1/500	2	30	1/500	6	60	1/500
5. Opt. Çöz	6	90	1/500	2	90	1/500	7	30	1/500
6. Opt. Çöz	6	90	1/500	1	90	1/500	7	30	1/500

Optimizasyon sonuçları son üretilen ve optimum bireyleri barındıran 200 numaralı jenerasyon için verilmiştir. Buna göre 3 katmanlı kompozit plağın optimizasyonunda optimum bireylerden oluşan çözüm kümesi 6 adet çözümü barındırmaktadır. Bu çözümler sırasıyla Şekil 7. 5'te görülmektedir.

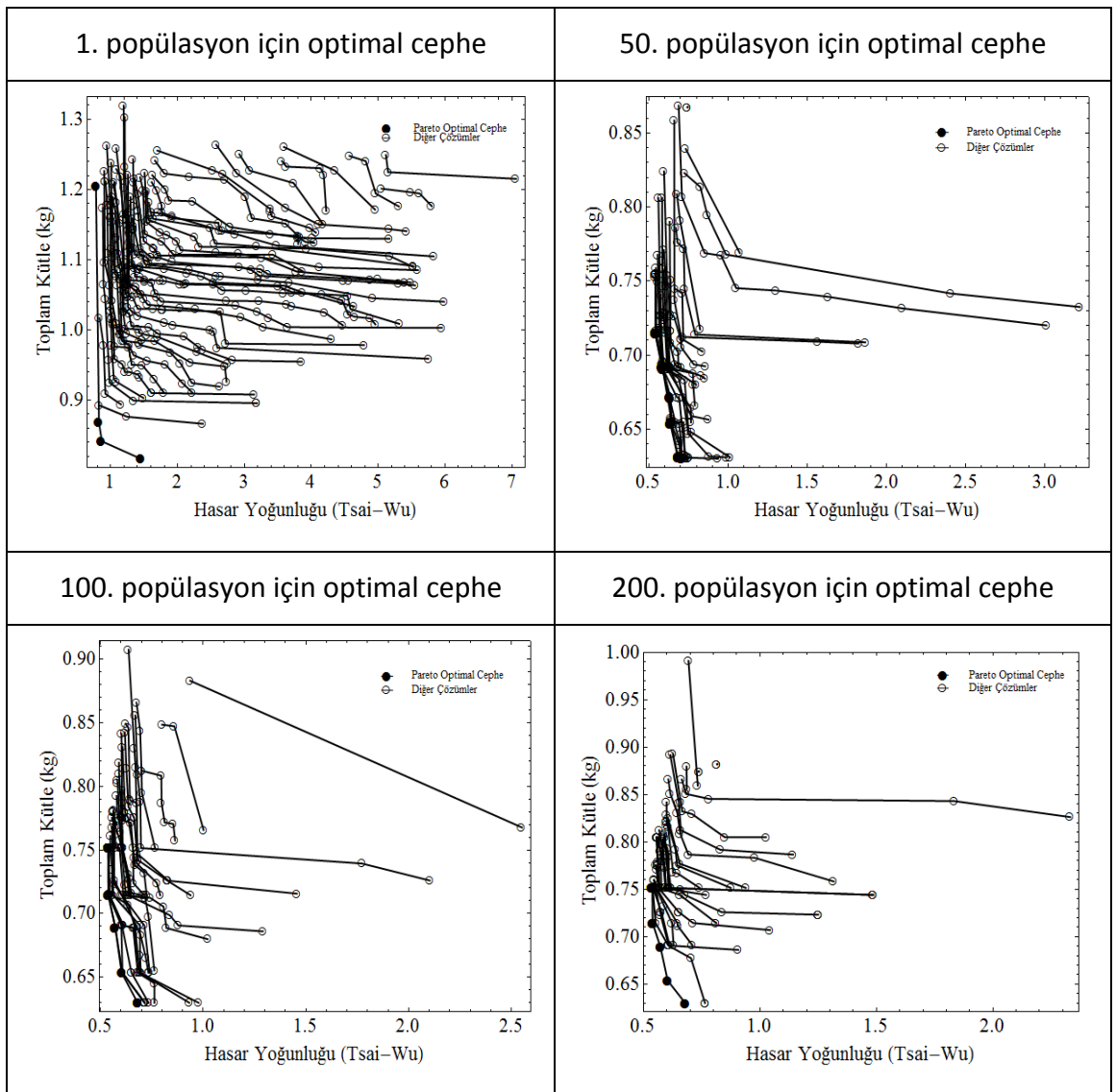


Şekil 7. 5 200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler

7.1.2 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 5 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu

Suyun 0,15 altında 20 gr TNT patlaması sonucu oluşan şok yüküne maruz 5 katmanlı kompozit plağın su altı patlama yüklerine karşılık Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

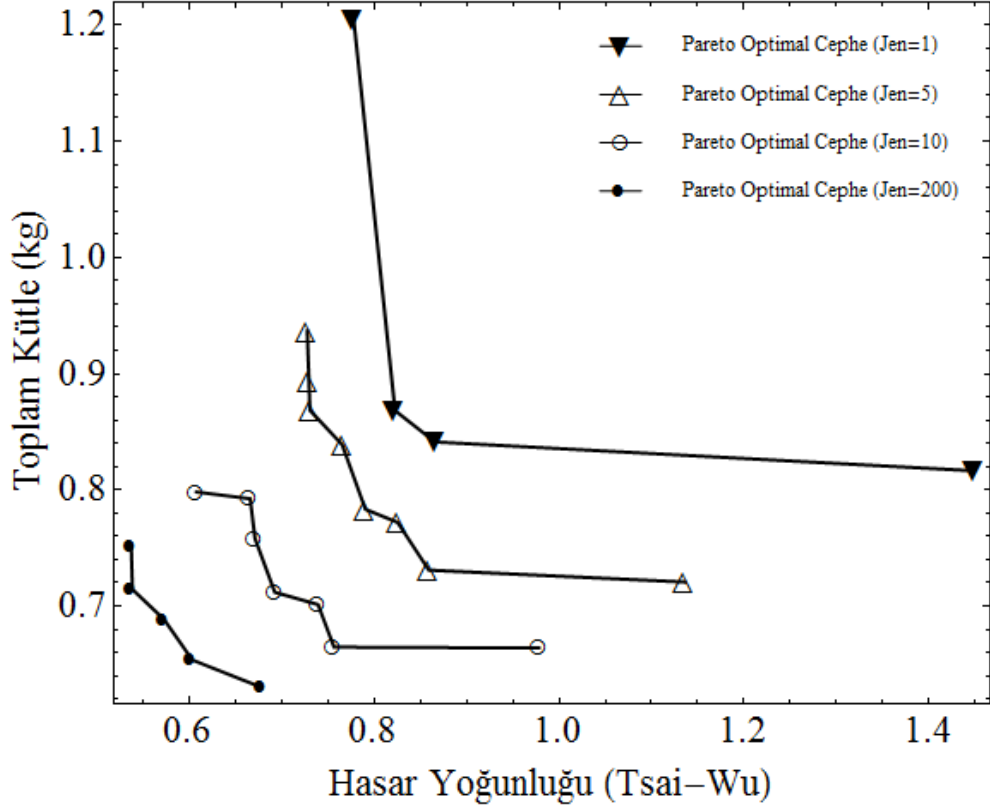
Katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sırasında elde edilen 1, 50, 100 ve 200. jenerasyon için tüm çözümler Şekil 7. 6'da verilmiştir. Şekillerde plağın kütlesine karşılık hasar indeksleri görülmektedir.



Şekil 7. 6 Pareto optimal çözümler

İlk oluşturulan jenerasyonda sonuçlar ham olmakla birlikte çok fazla sayıda bireyden oluşmaktadır. Optimizasyon işlemine devam edildikçe 50. ve 100. jenerasyonlarda

çözümlerin yakınsadığı görülmektedir. Son olarak oluşturulan 200.jenerasyon ise optimum çözümlerden oluşmaktadır. Herbir şekilde, pareto optimal çözümler ile birlikte elde edilen diğer çözümlerde verilmiştir.



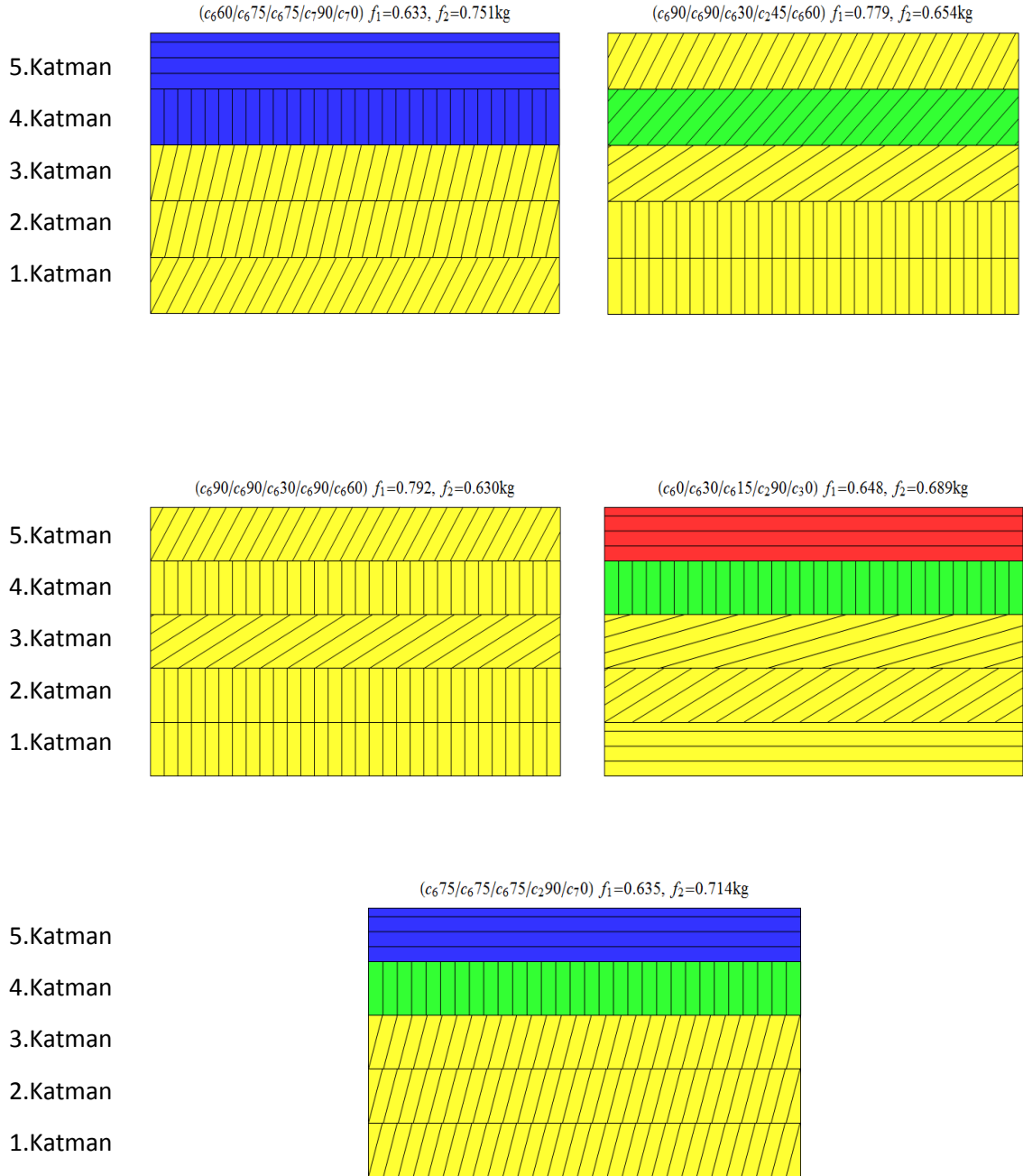
Şekil 7. 7 Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi

Şekil 7. 7'de pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi görülmektedir. Buna göre 1. jenerasyonda sonuçlar henüz yakınsamamıştır. 200. jenerasyona gelindiğinde elde edilen pareto optimal cephe tümüyle optimum çözümlerden oluşmaktadır ve bu çözümler 5 adettir.

Katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sonucunda elde edilen katman açısı ve malzeme seçimi ile hasar indeksi ve plak kütle değerleri Şekil 7. 8 ve Çizelge 7. 13'de verilmiştir. Buna göre en alt katman (1. katman) için malzeme kodu 6 ve dizilim açısı 90 derecedir. 2. Katman için 5 numaralı malzeme 90 derece dizilim açısı ile ve üst katman ise 7 numaralı malzeme ve 45 derece dizilim açısı ile kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre hasar indeksi $f_1=0,666$ ve plak ağırlığı $f_2=0,820$ kg'dır.

Optimal Çözümler

Optimal Çözümler



Şekil 7. 8 200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler

Çizelge 7. 2 Katman sayısı 5 olan kompozit plak için optimal çözümler

	1. Katman			2. Katman			3. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt. Çöz.	6	60	3/2500	6	75	3/2500	6	75	3/2500
2.Opt. Çöz.	6	90	3/2500	6	90	3/2500	6	30	3/2500
3.Opt. Çöz.	6	90	3/2500	6	90	3/2500	6	30	3/2500
4.Opt. Çöz.	6	0	3/2500	6	30	3/2500	6	15	3/2500
5.Opt. Çöz.	6	75	3/2500	6	75	3/2500	6	75	3/2500

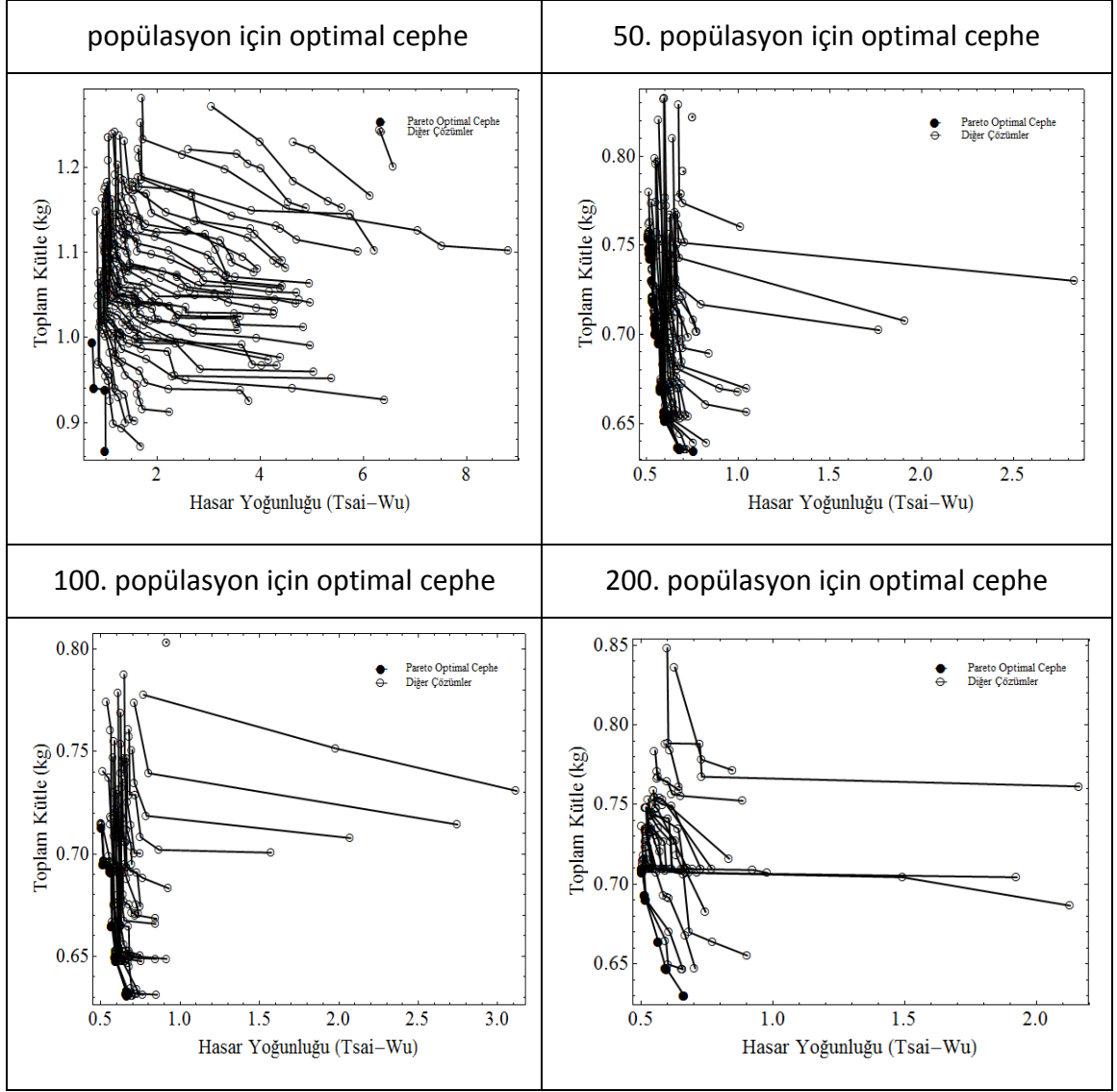
	4. Katman			5. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt. Çöz.	7	90	3/2500	7	0	3/2500
2.Opt. Çöz.	6	90	3/2500	6	60	3/2500
3.Opt. Çöz.	2	45	3/2500	6	60	3/2500
4.Opt. Çöz.	2	90	3/2500	3	0	3/2500
5.Opt. Çöz.	2	90	3/2500	7	0	3/2500

Optimizasyon sonuçları son üretilen ve optimum bireyleri barındıran 200 numaralı jenerasyon için verilmiştir. Buna göre 5 katmanlı kompozit plağın optimizasyonunda optimum bireylerden oluşan çözüm kümesi 5 adet çözümü barındırmaktadır.

7.1.3 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 7 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu

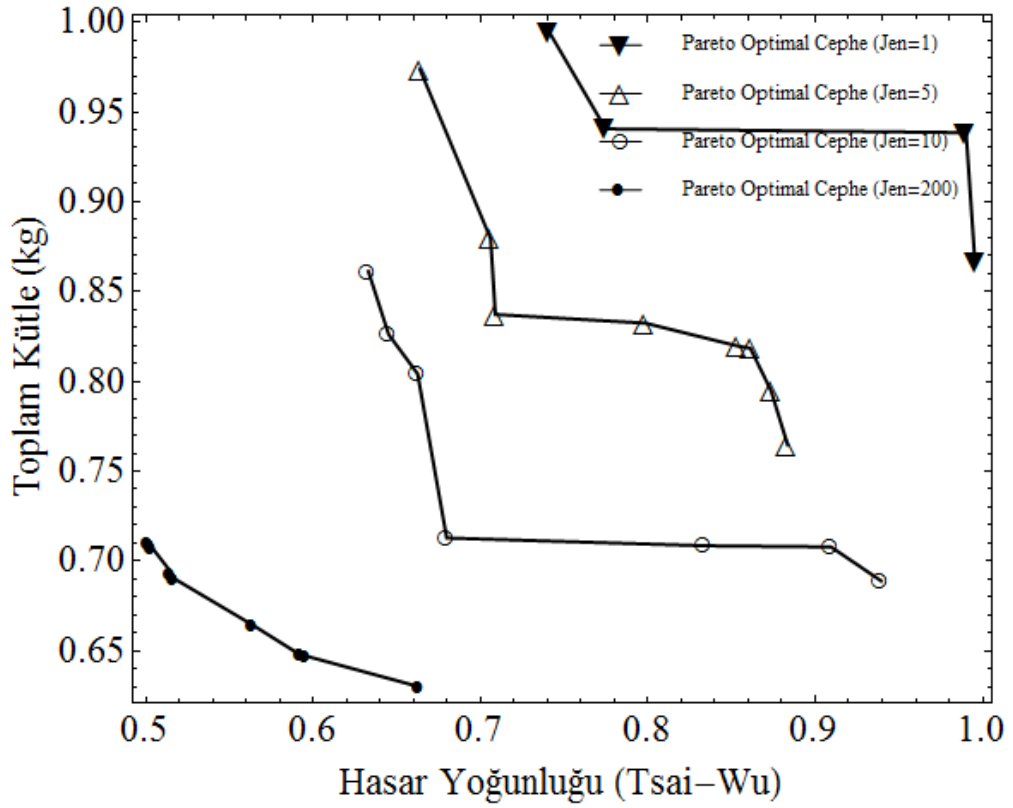
Suyun 0,15 altında 20 gr TNT patlaması sonucu oluşan şok yüküne maruz 7 katmanlı kompozit plağın su altı patlama yüklerine karşılık Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sırasında elde edilen 1, 50, 100 ve 200. jenerasyon için tüm çözümler Şekil 7. 9'da verilmiştir. Şekillerde plağın kütlesine karşılık hasar indeksleri görülmektedir.



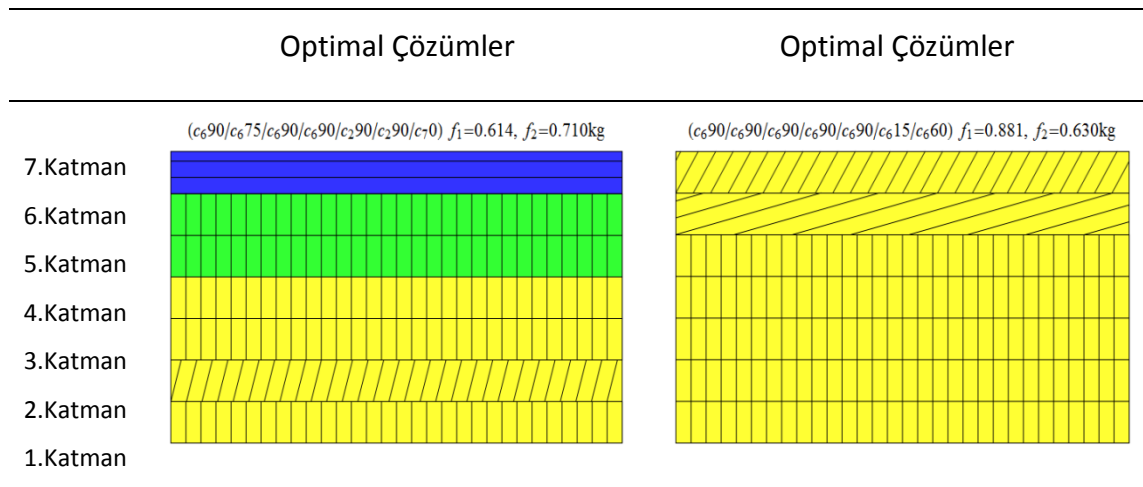
Şekil 7. 9 Pareto optimal çözümler

İlk oluşturulan jenerasyonda sonuçlar ham olmakla birlikte çok fazla sayıda bireyden oluşmaktadır. Optimizasyon işlemine devam edildikçe 50. ve 100. jenerasyonlarda çözümlerin yakınsadığı görülmektedir. Son olarak oluşturulan 200.jenerasyon ise optimum çözümlerden oluşmaktadır. Herbir şekilde, pareto optimal çözümler ile birlikte elde edilen diğer çözümlerde verilmiştir.

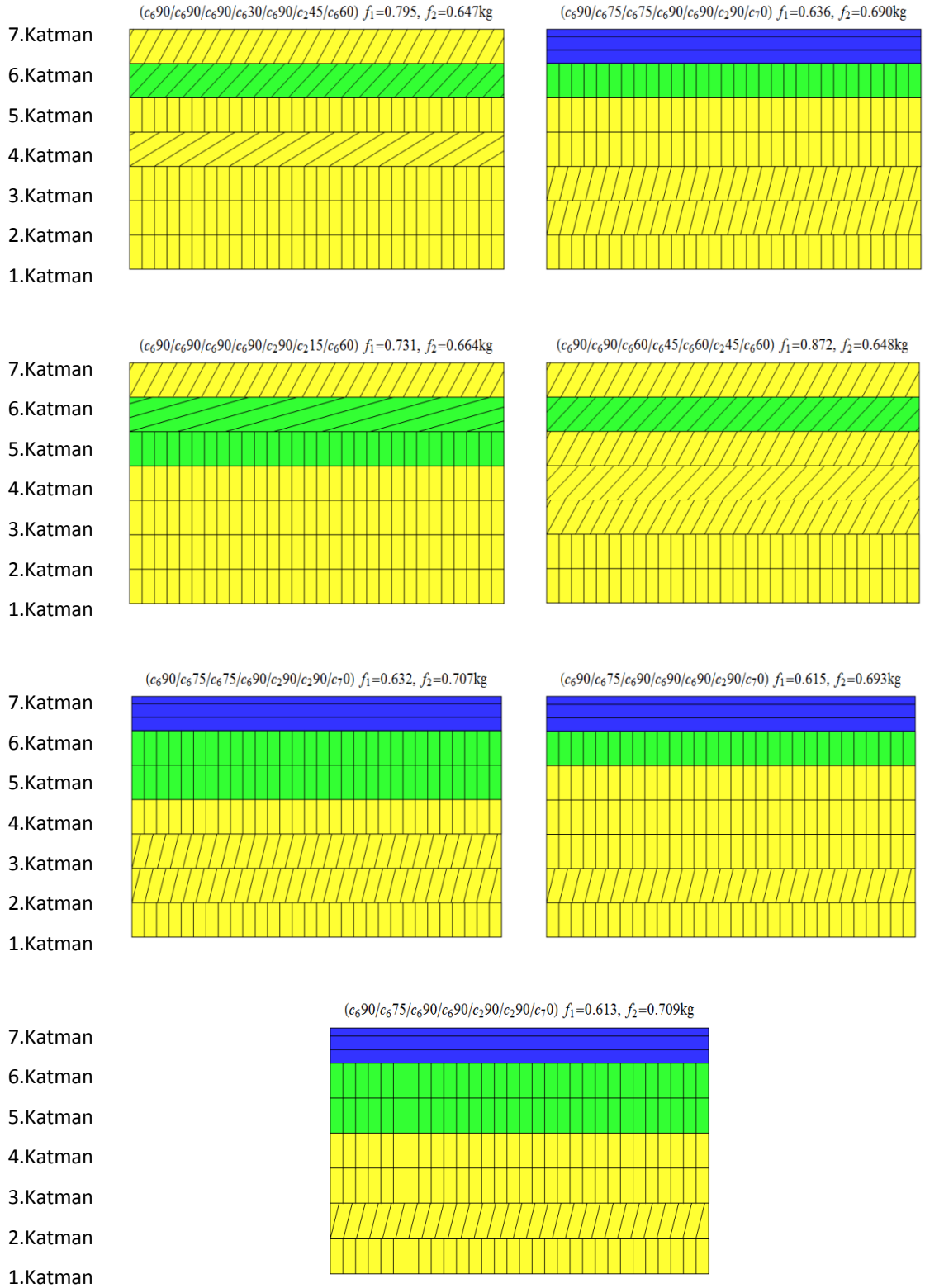


Şekil 7. 10 Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi

Şekil 7. 10'da pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi görülmektedir. Buna göre 1. jenerasyonda sonuçlar henüz yakınsamamıştır. 200. jenerasyona gelindiğinde elde edilen pareto optimal cephe tümüyle optimal çözümlerden oluşmaktadır ve bu çözümler 9 adettir. Son olarak; elde edilen jenerasyon için katman dizilim açısı, malzeme seçimi ve plak ağırlığı Şekil 7. 11 ve Çizelge 7. 3'deki gibidir.



Şekil 7. 11 200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler



Şekil 7.11 200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler (devamı...)

Çizelge 7. 3 Katman sayısı 7 olan kompozit plak için optimal çözümler

	1. Katman			2. Katman			3. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	75	3/3500	6	90	3/3500
2.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	90	3/3500	6	90	3/3500
3.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	90	3/3500	6	90	3/3500
4.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	75	3/3500	6	75	3/3500
5.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	90	3/3500	6	90	3/3500
6.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	90	3/3500	6	60	3/3500
7.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	75	3/3500	6	75	3/3500
8.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	75	3/3500	6	90	3/3500
9.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	75	3/3500	6	90	3/3500

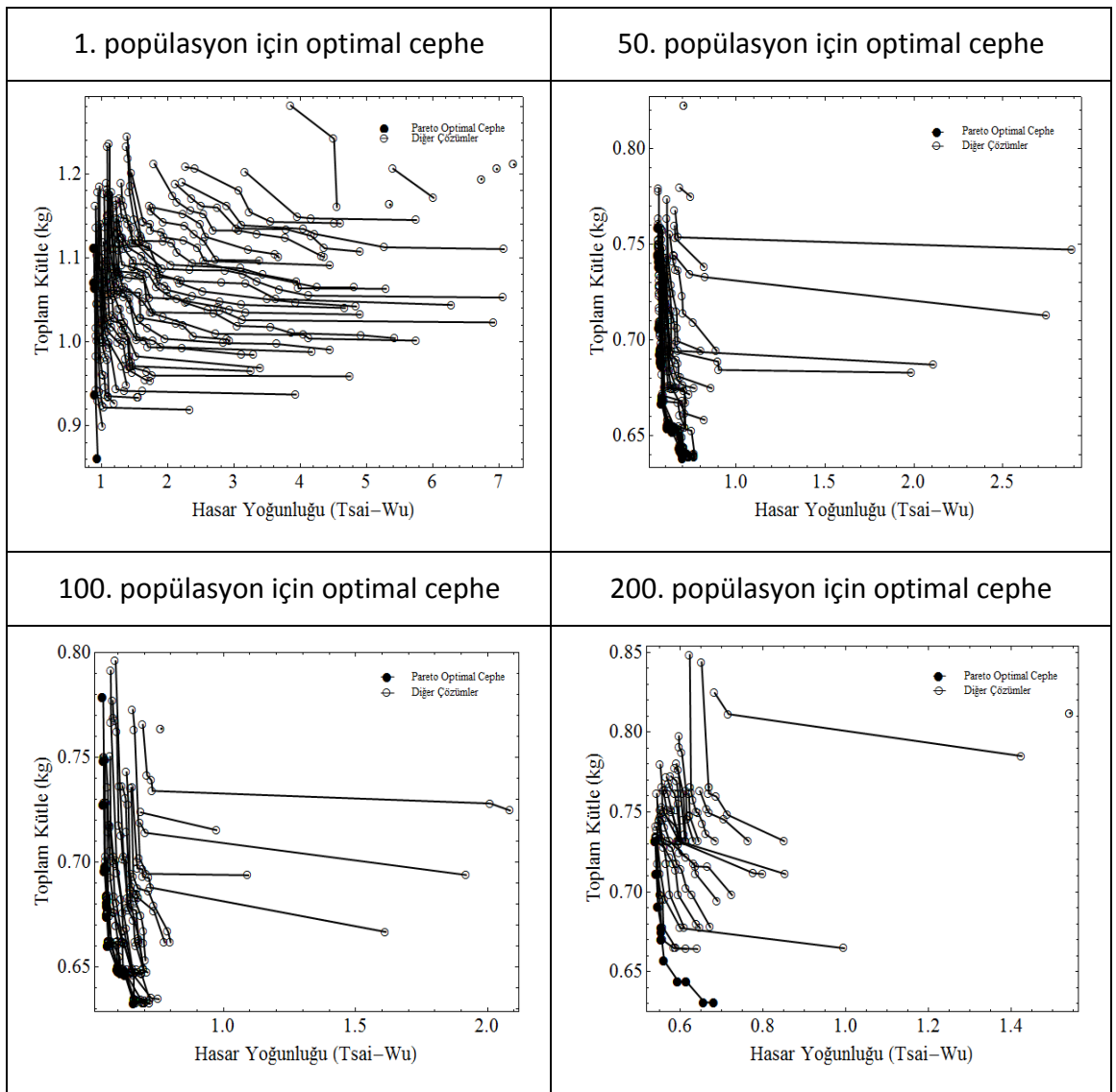
	4. Katman			5. Katman			6. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	2	90	3/3500	2	90	3/3500
2.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	90	3/3500	6	15	3/3500
3.Opt.Çöz.	6	30	3/3500	6	90	3/3500	2	45	3/3500
4.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	90	3/3500	2	90	3/3500
5.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	2	90	3/3500	2	15	3/3500
6.Opt.Çöz.	6	45	299/346500	6	60	3/3500	2	45	3/3500
7.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	2	90	3/3500	2	90	3/3500
8.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	6	90	3/3500	2	90	3/3500
9.Opt.Çöz.	6	90	3/3500	2	90	3/3500	2	90	3/3500

	7. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt.Çöz.	7	0	101/115500
2.Opt.Çöz.	6	60	3/3500
3.Opt.Çöz.	6	60	3/3500
4.Opt.Çöz.	7	0	3/3500
5.Opt.Çöz.	6	60	3/3500
6.Opt.Çöz.	6	60	3/3500
7.Opt.Çöz.	7	0	3/3500
8.Opt.Çöz.	7	0	101/115500
9.Opt.Çöz.	7	0	43/49500

7.1.4 Sualtı Patlama Yüklerine Maruz 9 Katmanlı Kompozit Plağın NSGA-II Optimizasyonu

Suyun 0,15 altında 20 gr TNT patlaması sonucu oluşan şok yüküne maruz 9 katmanlı kompozit plağın su altı patlama yüklerine karşılık Bastırılmayan Sıralamalı Genetik Algoritma (NSGA-II) Optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

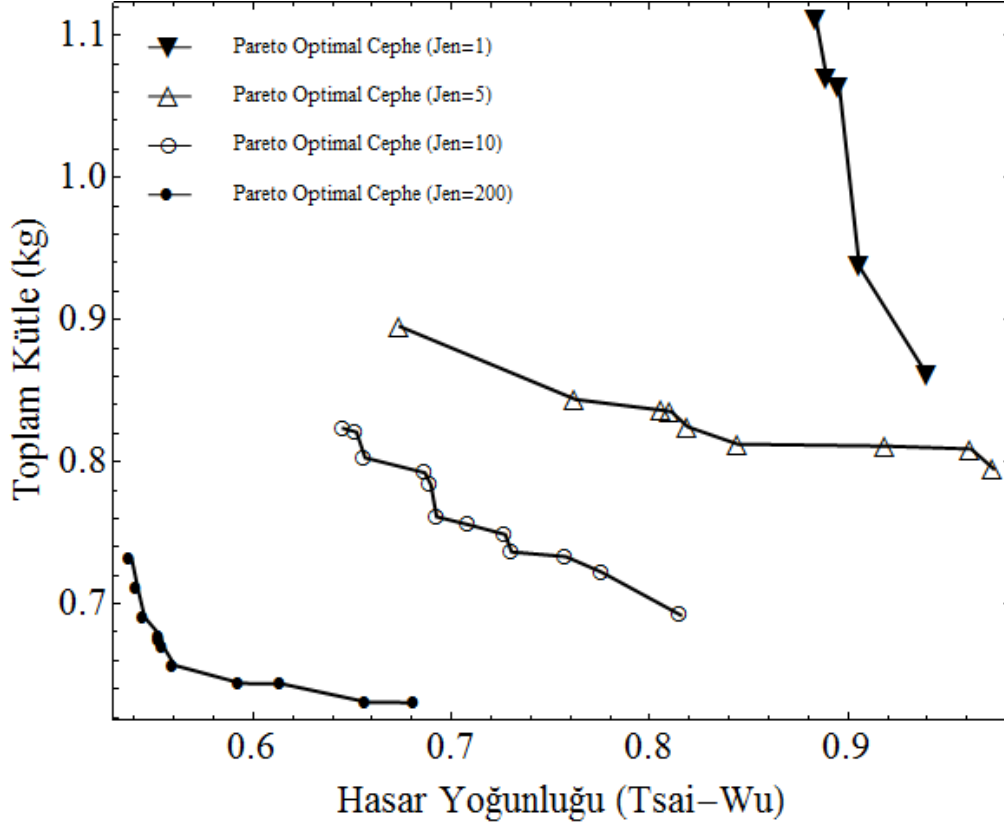
Katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sırasında elde edilen 1, 50, 100 ve 200. jenerasyon için tüm çözümler Şekil 7. 12’de verilmiştir. Plağın kütlesine karşılık hasar indeksleri görülmektedir.



Şekil 7. 12 Pareto optimal çözümler

İlk oluşturulan jenerasyonda sonuçlar ham olmakla birlikte çok fazla sayıda bireyden oluşmaktadır. Optimizasyon işlemine devam edildikçe 50. ve 100. jenerasyonlarda

çözümlerin yakınsadığı görülmektedir. Son olarak oluşturulan 200.jenerasyon ise optimum çözümlerden oluşmaktadır. Herbir şekilde, pareto optimal çözümler ile birlikte elde edilen diğer çözümlerde verilmiştir.

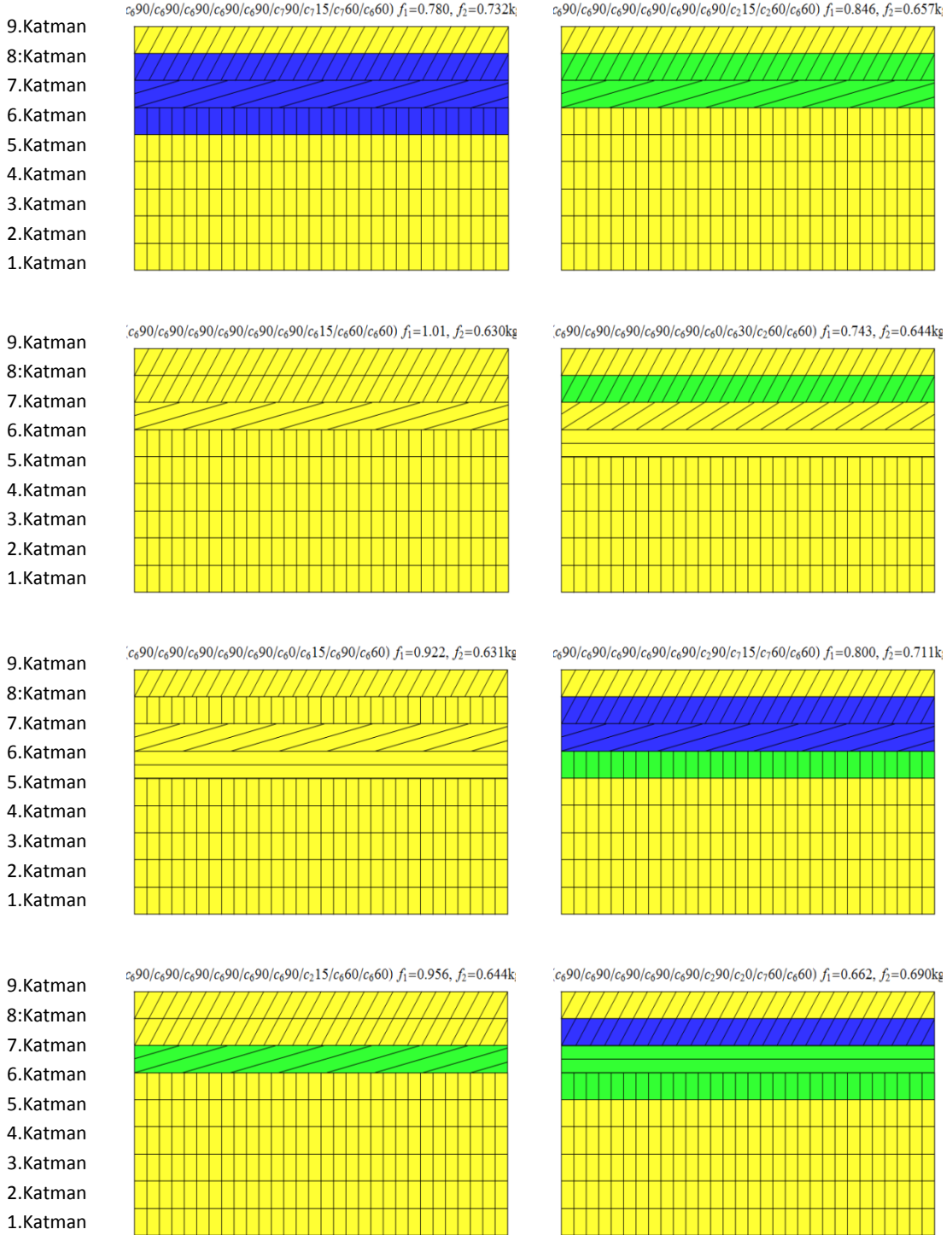


Şekil 7. 13 Pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi

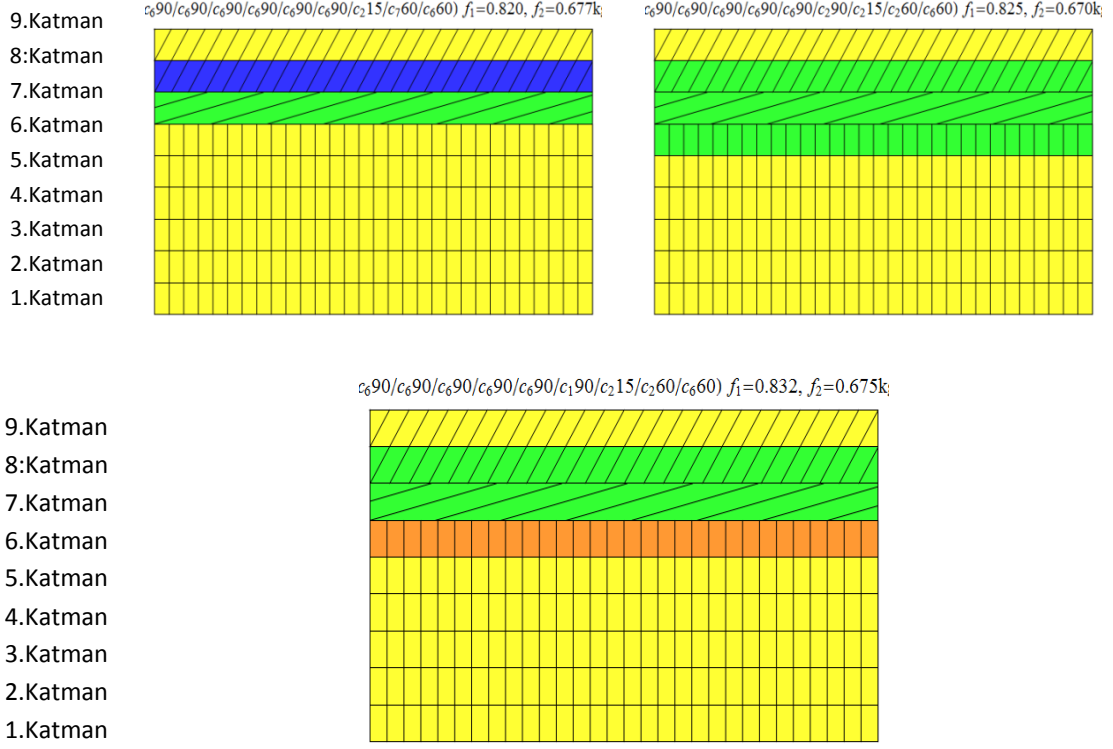
Şekil 7. 13’de pareto optimal cephenin jenerasyon sayısı ile değişimi görülmektedir. Buna göre 1. jenerasyonda sonuçlar henüz yakınsamamıştır. 200. jenerasyona gelindiğinde elde edilen pareto optimal cephe tümüyle optimal çözümlerden oluşmaktadır ve bu çözümler 11 adettir. Son olarak; elde edilen jenerasyon için katman dizilim açısı, malzeme seçimi ve plak ağırlığı Şekil 7.14 ve Çizelge 7. 4’deki gibidir.

Optimal Çözümler

Optimal Çözümler



Şekil 7. 14 200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler



Şekil 7. 14 200 numaralı jenerasyon için pareto optimal çözümler (devamı...)

Su altı patlama yüklerine karşılık 9 katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sonuçlarına göre optimum değerler plağın en düşük kalınlıkta olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Standartlar ve klas kuruluşlarının kuralları dikkate alındığında plak kalınlığı 6 mm ile sınırlandırılmıştır ve bu durumda en ince plak 6 mm kalınlığa sahiptir. Bu nedenle optimum plaklar 6 mm kalınlığa sahiptir.

Çizelge 7. 4 Katman sayısı 9 olan kompozit plak için optimal çözümler

	1. Katman			2. Katman			3. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
2.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
3.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
4.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
5.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
6.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
7.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
8.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
9.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
10.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500
11.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	299/445500	6	90	1/1500

	4. Katman			5. Katman			6. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	7	90	1/1500
2.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	6	90	1/1500
3.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	6	0	1/1500
4.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	6	90	1/1500
5.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	6	90	1/1500
6.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	6	0	1/1500
7.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	2	90	1/1500
8.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	2	90	1/1500
9.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	6	90	1/1500
10.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	2	90	1/1500
11.Opt.Çöz.	6	90	1/1500	6	90	1/1500	1	90	1/1500

	7. Katman			8. Katman			9. Katman		
	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık	Malzeme	Açı	Kalınlık
1.Opt.Çöz.	7	15	1/1500	7	60	1/1500	6	60	1/1500
2.Opt.Çöz.	6	15	1/1500	6	60	1/1500	6	60	1/1500
3.Opt.Çöz.	6	15	299/445500	6	90	1/1500	6	60	1/1500
4.Opt.Çöz.	2	15	1/1500	6	60	1/1500	6	60	1/1500
5.Opt.Çöz.	2	15	1/1500	2	60	1/1500	6	60	1/1500
6.Opt.Çöz.	6	30	299/445500	2	60	1/1500	6	60	1/1500
7.Opt.Çöz.	7	15	1/1500	7	60	1/1500	6	60	1/1500
8.Opt.Çöz.	2	0	1/1500	7	60	1/1500	6	60	1/1500
9.Opt.Çöz.	2	15	1/1500	7	60	1/1500	6	60	1/1500
10.Opt.Çöz.	2	15	1/1500	2	60	1/1500	6	60	1/1500
11.Opt.Çöz.	2	15	1/1500	2	60	1/1500	6	60	1/1500

SONUÇ VE ÖNERİLER

Doktora tezinde, anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit bir plağın lineer olmayan dinamik denklemleri virtüel iş ilkesi kullanılarak elde edilmiştir. Geometrik nonlineerlik etkileri ince plaklar için von Kármán büyük yer değiştirmeler teorisi kullanılarak hesaba katılmıştır. Yer uzayı için yaklaşık bir çözüm kabul edilmiştir. Zaman uzayında lineer olmayan diferansiyel denklemleri elde etmek için Galerkin yöntemi kullanılmıştır. Bağlı ve lineer olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü için MATHEMATICA yazılımı kullanılmıştır.

Tez çalışmasında öncelikle, 3 katmanlı kompozit plağın düzgün yayılı statik basınç yükü altındaki mukavemet ve hasar analizleri Tsai-Wu ve Tsai-Hill yaklaşımları ile Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen plak orta noktası deformasyonları ile Tsai-Wu ve Tsai-Hill hasar indekslerinin birbirleri ile uyumlu oldukları gözlenmiştir. Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki fark, Galerkin yönteminde kayma gerilmelerinin düşey bileşeninin hesaplamalara dahil edilmemesinden ve Galerkin yönteminin uygulanmasında seçilen yaklaşım fonksiyonunun gerinimleri net olarak ifade edememesinden kaynaklanmaktadır.

Suyun sönüm etkisinin olduğu sönümlü ve suyun sönüm etkisinin olmadığı sönümsüz halde dikdörtgen kesitli kenarlarından ankastre mesnetli anlık basınç yüküne maruz 3 katmanlı kompozit plağın geometrik doğrusal olmayan dinamik analizi Galerkin ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Su altı patlaması sonucu oluşan anlık basınç yükü için Cole yaklaşımına oranla, şok basıncının plak üzerine ilk geldiği pik değeri ve basıncın eksponansiyel azaldığı ikinci kısmı daha iyi bir şekilde

ifade eden basınç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen basınç fonksiyonu MATHEMATICA ve ANSYS yazılımları kullanılarak kompozit plağa dinamik bir şekilde tatbik edilmiştir.

Suyun sönüm etkisinin dikkate alındığı dinamik analizlerde, önerilen basınç fonksiyonun doğruluğunun test edilebilmesi için MATHEMATICA yazılımı kullanılarak geliştirilen algoritma ile bir dinamik sonlu elemanlar çözücüsü olan LS-DYNA yazılımı sonuçları karşılaştırılmıştır. 40 gr TNT tipi patlayıcının suyun 0,15 m altında patlaması senaryosu analiz edilerek çelik plak üzerine etkileyen basıncın zamana bağlı değişimleri mukayese edilmişlerdir. Sonuç olarak; tez çalışmasında önerilen basınç fonksiyonu ile LS-DYNA analizleri sonucunda elde edilen basınç değişiminin son derece uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ayrıca tez çalışmasında çelik plak üzerinde patlama analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu durumda elde edilen orta nokta kalıcı deformasyon değerleri ile Ramajeyathilagam vd. [45] de verdiği deneysel sonuçlar birbirleri ile uyum içerisinde olduklarıdır.

Doktora tez çalışmasının son bölümünde su altı patlama yüklerine maruz katmanlı kompozit plakların çok amaçlı genetik algoritma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Su altı patlama yüklerine karşılık 3, 5, 7 ve 9 katmanlı kompozit plağın optimizasyonu sonuçlarına göre optimum değerler plağın en düşük kalınlıkta olması durumları için ortaya çıkmaktadır. Standartlar ve klas kuruluşlarının kuralları dikkate alındığında plak kalınlığı 6mm ile sınırlandırılmıştır ve bu durumda en ince plak 6 mm kalınlığa sahiptir. Bu nedenle optimum plaklar genel olarak 6 mm civarındaki kalınlıklara sahiptirler.

Taylor [64] su altı patlama yüklerine maruz bir plağın yüzeyine yapı-sıvı etkileşimi ile birlikte aktarılan basınç yükünün, plağın kütlesi azaldıkça düşeceğini ileri sürmektedir. Plak kütlesi azaldıkça plağa ait hız artacaktır ve dolayısıyla yüzeyine etki eden basınç azalacaktır. Hafif plakların kendine özgü bu özelliği patlama yüklerine maruz sandviç yapı tasarımında sıkça kullanılmaktadır [105-112].

Optimizasyon işlemleri gerçekleştirilirken ağırlığı etkileyen tek parametre yoğunluktur. Malzeme yoğunlukları ise seçilen malzemeler ile çok fazla değişmediği için sürekli bir Pareto-Optimal cephe elde edilememektedir. Bu durumda sınırlı sayıda çözüm ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca katman sayısı arttıkça Pareto Optimal cephedeki çözüm sayısı artmaktadır. Bunun sebebi ise, katman sayısının artmasıyla birlikte seçenek sayısının ve çeşitliliğin artmasıdır.

Tez çalışmasında, su altı patlaması sonucunda ortaya çıkan basıncın zamanla değişimi için önerilen basınç fonksiyonu, şok basıncının plak üzerine ilk geldiği ve basıncın eksponansiyel azaldığı ikinci kısmı Cole yaklaşımına göre daha iyi bir şekilde ifade etmektedir ve su altı patlama analizlerinde kullanılması uygundur. Ayrıca; su altı patlama yüklerine maruz bir plağın yüzeyine yapı-sıvı etkileşimi ile birlikte aktarılan basınç yükünün, plağın kütlesi azaldıkça düştüğü ve dolayısıyla plağa etki eden basıncın azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçla birlikte, ince ve hafif plakların, kalın ve ağır plaklara göre şok yüklerine karşı kullanılmasının, yapıya gelen yükün azaltılmasında uygun bir çözüm olacağı sonucuna varılmıştır. Ancak bununla birlikte, gemi panelinin kalınlığı belirlenirken, sadece şok yüklerini değil, yapıya etki edecek statik ve dinamik tüm yük durumlarını karşılayacak bir tasarım gerçekleştirilmelidir.

Sonlu elemanlar ve Galerkin yöntemi sonuçları hasar indeksinin hesaplanmasında birbirleri ile mertebe ve dağılım olarak uyumludurlar. Galerkin yönteminde yerdeğiştirme için seçilen yaklaşım fonksiyonları geometrik sınır şartlarını sağlamaktadır. Ancak, fonksiyonun bölge içindeki değişimini ifade etmemektedir. Dolayısıyla yerdeğiştirme değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile oldukça yakın olmakla birlikte, yerdeğiştirmenin türevi olan gerinimlerde farklılıklar oluşmaktadır. Gerinimlerin karşılaştırılabilmesi için deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi daha sağlıklı bir doğrulama yapılmasına imkan verecektir. Ancak, Galerkin yöntemi, hızlı bir şekilde çözüm elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, bir yapının ön tasarımına yön verecek, hasar indeksinin hesaplanmasında Galerkin yönteminden yararlanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Deb K., (2001). "Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms". First Edition, Wiley, 149-160.
- [2] Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P. ve Challis K., (2001). "Review of Advanced Composite Structures For Naval Ships and Submarines", Composite Structures, 53: 21-41.
- [3] Reissner E, (1948). "Finite Deflections of Sandwich Plates", Journal of Aerospace Science, 15: 435-440.
- [4] Libove C. ve Batdorf S.B., (1948). "A General Small-Deflection Theory For Flat Sandwich Plates", ABD.
- [5] Szilard, R., (1974). "Theory and Analysis of Plates: Classical and Numerical Methods", Prentice-Hall, New-Jersey.
- [6] Ventsel E. ve Krauthammer T., (2001). "Thin Plates and Shells, Theory, Analysis and Applications", Marcel Dekker Inc, New York.
- [7] Lekhnitskii S.G., (1963). "Theory of Elasticity of An Anisotropic Elastic Body", Holden-Day, San Francisco.
- [8] Reissner E., (1975). "On Transverse Bending of Plates, Including The Effect of Transverse Shear Deformation" International Journal of Solid Structures, 11.
- [9] Lo K.H., Cristensen R.M. ve Wu E.M., (1977). "A Higher Order Theory of Plate Deformation, Part 1: Homogeneous Plates". Journal of Applied Mechanics. 44.
- [10] Şemsettin T. ve Özel A., (1999). " Tabakalı Kompozit Plaklarda Sonlu Eleman Yöntemiyle Elastik Gerilme Analizi", Makine-İmalat Teknolojileri Sempozyumu, 68:81, Konya.
- [11] Murty M. V. V., (1981). "An Improved Transverse Shear Deformation Theory For Laminated Anisotropic Plates" , NASA Technical Paper, ABD.
- [12] Reddy, J.N., (1984). "A Simple Higher Order Theory For Laminated Composite Plates" , Journal of Applied Mechanics, 51.
- [13] Whitney J.M., (1971) "Fourier Analysis of Clamped Anisotropic Plates", Journal of Applied Mechanics, 38 (2): 530-532.

- [14] Burton W.S. ve Noor A.K., (1997). "Assessment of Continuum Models For Sandwich Panel Honeycomb Cores", *Computer Methods in Applied Mechanics And Engineering*, 145: 341-360.
- [15] Mohan D. ve K.H.B., (1971). "Free Vibrations of Generally Orthotropic Plates". *Journal of Acoustic Soc.*, 266.
- [16] Cheung Y.K. ve Zhou D., (2001). "Vibration analysis of symmetrically laminated rectangular plates with intermediate line supports". *Computers and Structures*. 79: 33-41.
- [17] Leissa A.W., (1973). "The Free Vibration of Rectangular Plates", *Journal of Sound and Vibration*, 31: 257-293.
- [18] Leissa A.W. ve McGee O.G., (1990). "Three dimensional free vibrations of thick skewed cantilevered plates", *Journal of Sound and Vibration*, 144: p. 305-322.
- [19] Vinson J.R. ve Chou T.W., (1975). "Composite Materials and Their Use in Structures ", *Applied Science Publisher*, 104: 285-300.
- [20] Chen W.C. ve Liu W.H., (1990). "Deflections and free vibrations of laminated plates—Levy-type solutions" *International Journal of Mechanical Sciences*, 32: 779-793.
- [21] Xiang Y. ve Reddy J.N., (2003). "Natural Vibration of Rectangular Plates With An Internal Line Hinge Using The First Order Shear Deformation Plate Theory" *Journal of Sound and Vibration*, 263: 285-297.
- [22] Chen A.T. ve Yang T.Y., (1988). "A 36 DOF Symmetrically Laminated Triangular Element With Shear Deformation and Rotary Inertia", *Journal of Composite Materials*, 22: 341-359.
- [23] Hadian J. ve Nayfeh A.H., (1993). "Free Vibration and Buckling Of Shear Deformable Cross-Ply Laminated Plates Using The State-Space Concept", *Computers and Structures*, 48: 677-693.
- [24] Matsunaga H, (2000). "Vibration and Stability of Cross-Ply Laminated Composite Plates According to A Global Higher-Order Plate Theory", *Composite Structures*, 48: 231-244.
- [25] Matsunaga H., (2001). "Vibration and Stability of Angle-Ply Laminated Composite Plates Subjected to In-Plane Stresses", *International Journal of Mechanical Sciences*, 43: 1925-1944.
- [26] Whitney J.M. ve Pagano N.J., (1970). "Shear Deformation In Hetrogeneous Anisotropic Plate", *Journal of Applied Mechanics*, 37: 1031-1036.
- [27] Reddy, J.N., (1982). "On The Solutions To Forced Motions of Rectangular Composite Plates", *Journal of Applied Mechanics*, 49: 403-408.
- [28] Reddy, J.N., (1983). "Geometrically Nonlinear Transient Analysis of Laminated Composite Plates", *AIAA Journal*, 21: 621-629.
- [29] Khdeir A.A. ve Reddy J.N., (1988). "Dynamic Response of Antisymmetric Angle-Ply Laminated Plates Subjected to Arbitrary Loading", *Journal of Sound and Vibration*, 126: 437-445.

- [30] Kurshin L.M., (1959). "Large Deflection Of Sandwich Cylindrical Shells", Research of Aeronautical Structures-Sandwich Plates and Shells in Russia, 39-50.
- [31] Grigoliuk E.I, (1958). "Large Deflection of Sandwich Shells with Strong Core". Izv. Akad Nauk SSSR OTN. 1: 26-34.
- [32] Putcha N.S. ve Reddy J.N., (1986). "Stability and Natural Vibration Analysis of Laminated Plates by Using A Mixed Element Based on A Refined Plate Theory". Journal of Sound and Vibration. 104: 285-300.
- [33] Ferreira A.J., B.J.T., De Sa J.C. ve Marques A.T., (1998). "Geometric Non-Linear Analysis of Sandwich Structures". Sandwich Construction 4. 1: 327-338.
- [34] Ferreira A.J., B.J.T., Marques A.T. ve De Sa J.C., (2000). "Non-Linear Analysis of Sandwich Shells: The Effect of Core Plasticity", Computers & Structures, 76: 337-346.
- [35] Hause T. ve Librescu L., (2005). "Dynamic Response of Anisotropic Sandwich Flat Panels to Explosive Pressure Pulses.", International Journal of Impact Engineering, 31: 607-628.
- [36] Hause T. ve Librescu L., (2007). "Dynamic Response of Doubly-Curved Anisotropic Sandwich Panels Impacted by Blast Loadings", International Journal of Solids and Structures, 44: 6678-6700.
- [37] Sriram, R., Vaidya, U. K. ve Kim, J. E., (2006). "Blast Impact Response of Aluminum Foam Sandwich Composites", Journal of Materials Science, 41: 4023-4039.
- [38] Turkmen, H.S. ve Mecitoğlu Z., (1999). "Dynamic Response of a Stiffened Laminated Composite Plate Subjected to Blast Load", Journal of Sound and Vibration, 221: 371-389.
- [39] Turkmen, H.S. ve Mecitoğlu Z., (1999). "Nonlinear Structural Response of Laminated Composite Plates Subjected to Blast Loading", AIAA Journal, 37: 1639-1647.
- [40] Kazancı Z. ve Mecitoğlu Z., (2006). "Nonlinear Damped Vibrations of a Laminated Composite Plate Subjected to Blast Load", AIAA Journal, 44:2002-2008.
- [41] Rajendran R. ve Lee J.M., (2006). "Blast Loaded Plates", Marine Structures, 22: 99-127.
- [42] Pan Y. ve Louca L.A., (1999). "Experimental and Numerical Studies on The Response of Stiffened Plates Subjected to Gas Explosion", Journal of Construction Steel Research, 52: 171-193.
- [43] Veldman R.L, A.G.J., Clum C., DeYong A. ve Folkert J., (2005). "Effects of Pre-pressurization on Blast Response of Clamped Aluminium Plates", International Journal of Impact Engineering, 32: 1678-1695.

- [44] Jen C. ve Tai Y., (2009). "Deformation behaviour of a stiffened panel subjected to underwater shock loading using the non-linear finite element method", *Materials and Design*, 31: 325-335.
- [45] Ramajeyathilagam K. ve Vendhan C., (2004). "Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock", *International Journal of Impact Engineering*, 30: 699-719.
- [46] Shin Y.S., (2004). "Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion", *Computers & Structures*, 82(23-26): 2211-2219.
- [47] Liang C.C. ve Tai Y.S., (2005). "Shock responses of a surface ship subjected to non-contact underwater explosions". *Ocean Engineering*. 33: 748-772.
- [48] Qiankun J., Gangyi D., (2011). "A Finite Element Analysis of Ship Sections Subjected to Underwater Explosion", *International Journal of Impact Engineering*, 38: 558-566.
- [49] Zamyshlyayev B.V. ve Yakovlev Y.S., (1973). "Dynamic Loads in Underwater Explosion", *Naval Intelligence Support Center, Washington*.
- [50] Yücel A., (2010). *Propellantların İçindeki 2-Nitro Difenil Amin'in Kromatografik Yöntemlerle Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [51] Bulson P.S, (2002). "Explosive Loading of Engineering Structures", *Taylor & Francis*, 1-272.
- [52] Cole, R.H., (1948). "Underwater Explosions", *Princeton University Press, ABD*.
- [53] Webster K.G., (2007). "Investigation of Close Proximity Underwater Explosion Effects on Ship-Like Structure Using the Multi Material Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method", *Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, ABD*.
- [54] Misovec A.P., (1976). "Explosion Phenomena", *David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, Maryland*.
- [55] Reid W., (1996). "The Response of Surface Ships to Underwater Explosions", *Department of Defence, ABD*.
- [56] Wood S.L., (1998) "Cavitation Effects on a Ship-Like Box Structure Subjected to an Underwater Explosion", Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, Monterey, ABD.
- [57] Makinen K, (1998) "Cavitation models for structures excited by a plane shock wave", *Journal of Fluids and Structures*, 12(1): 85-101.
- [58] Keil A.H., (1961). "The response of ships to underwater explosions". *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 69: 366-410.
- [59] Szilard, R., (1974). "Theory and Analysis of Plates: Classical and Numerical Methods", *Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*.
- [60] Reddy, J.N., (1997). "Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis", *Second Edition, CRC Press, ABD*.

- [61] Timoshenko, S.A. ve Woinowsky K., (1959). "Theory of Plates and Shells", MacGraw Hill Inc, New York.
- [62] Shin Y.S. (2004). "Ship shock modeling and simulation for far field explosion ", Computers and Structures, 82(23-26):2211-9.
- [63] Cole, R.H., (1948). "Underwater Explosions", Princeton University Press, ABD.
- [64] Taylor, G.I., (1950). "The pressure and impulse of submarine explosion waves on plates". Compendium Underwater Explosion Res ONR. 1: 1155-1174.
- [65] Makinen K. (1999). "The transverse response of sandwich panels to an underwater shock wave". Journal of Fluids and Structures. 13(5): 631-646.
- [66] Liang C.C. ve Tai Y., (2006). "Shock response of a surface ship subjected to non-contact underwater explosions", Ocean Engineering, 33(5-6): 748-772.
- [67] Gong SW, L.K. ve Lu C., (2000). "Structural analysis of submarine pipeline subjected to underwater shock", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 77(7): 417-423.
- [68] Keil A.H, (1956). "Introduction to underwater explosion research", Virginia: Norfolk Naval Shipyard.
- [69] Kennard A.H., (1944). "The effect of pressure wave on a plate diaphragm". 3: p. 11-64.
- [70] Deshpande V.S. ve Fleck N., (2005). "One dimensional response of sandwich plates to underwater shock loading". Journal of Mechanics and Physics of Solids. 53(11): 2347-2383.
- [71] Tolga D., (2006). Cıvata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [72] Jenkins C.F., (1865). "Reports on Materials of Constructions Used in Aircraft and Aircraft Engines", University of California Libraries, California.
- [73] Holland, J., (1975). "Adaptation in Natural and Artificial Systems": University of Michigan Press, Ann Arbor, ABD.
- [74] Engin O., (2001). Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma İle Çözüm Performansının Arttırılmasında Parametre Optimizasyonu, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [75] Ghedjati F., (1999). "Genetic Algorithms For The Job-Stop Scheduling Problem With Unrelated Parallel Constraints: Heuristic Mixing Method Machines and Precedence ", Computers and Industrial Engineering,37:39-42.
- [76] Kırıcı S.. (2007). Genetik Algoritma Kullanarak Tel Anten Tasarımı, Vol. 22-29: Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [77] Gürsu B., (2002). Genetik Algoritmalar İle DC-AC Çeviricilerde Harmonik Eliminasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [78] Coşkun A., (2006). Genetik Algoritma Kullanılarak Kimyasal Maddelerin Deriden Geçiş Katsayılarının Ve Molekül Yapılarının Bulunması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [79] Düzgün S., (2006). Tornalama İşlem Parametrelerinin Optimizasyonunda Genetik Algoritma Çalışmaları ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [80] Bridges C.L ve Goldberg D.E., (1987) "An Analysis of Reproduction and Crossover in A Binary Coded Genetic Algorithm", Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms, 9-13.
- [81] Davis L., (1991). "Handbook of Genetic Algorithms", Van Nostrand Reinhold, NY. 385-392.
- [82] Schaffer, J.D., Caruana, R.A, Eshelman, L.J ve Das, R, (1989). "A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithms for Function Optimization", Morgan Kaufmann Pub Inc. San Mateo.
- [83] Mitchell, M., (1996). "An Introduction to Genetic Algorithms". Vol. 205-213: MIT Press, Massachusetts.
- [84] Tosun E., (2006). Frezeleme İşlemlerinde Genetik Algoritma Yaklaşımı İle Kesme Koşullarının Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [85] Gülcan O., (2010). Genetik Algoritma Kullanarak Patlayıcı Yardımı İle Form Vermede Parametre Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- [86] Yaman M., (2007). Genetik Algoritma İle Kardan Mili Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- [87] Serkan D., (2011). Bir Uçağın Yatay Dengeleyicisinin Genetik Algoritma Yöntemi İle Yapısal Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [88] Çunkaş M., "Genetik Algoritmalar ve Uygulamaları Ders Notları", Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Konya.
- [89] Ergül E.U, (2010). "Çok Amaçlı Genetik Algoritmalar: Temelleri ve Uygulamaları" Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [90] Zeyveli M., (2005). Genetik Algoritma İle Hız Kutusu Dişli Tasarımı, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [91] Karaboğa D., (2004). "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları": Atlas Yayın, İstanbul, 1-199.
- [92] Kaya T., (2006). "Genetik Algoritma İle Sayısal Filtre Tasarımı": Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [93] Keleşoğlu Ö., (2003). "Çok Amaçlı Bulanık Optimizasyon Tekniği İçin Bir Algoritma ". Vol. 7(3). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

- [94] Dursun K., (2012). Çok Amaçlı Genetik Algoritma İle Kategorik Verilerin Sınıflandırılması, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [95] Pareto V., (1971). "Manuale di Economica Polittica": Societa Editric Libraia, Translated into English by A.S. Schwier.
- [96] Fonseca M., Fleming P., (1993). "Genetic Algorithm For Multiobjective Optimization, Formulation and Generalization in Genetic Algorithms" Proceeding of Fifth International Conference.
- [97] Goldberg D.E., (1989). "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Weley, Reading, 432.
- [98] Kalyanmoy Deb., A.A., Agarwal S., ve Meyarivan T., (2002). "A Fast Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II". IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2):182-197.
- [99] Tahir S., Çunkaş M., (2009). "Çok Amaçlı Genetik Algoritmalar İçin Bir Çevrimdışı Performans Değerlendirmesi", in 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
- [100] Soden P.D., Hinton M.J. ve Kaddour A.S., (1998) "Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates", Composites Science and Technology, 58(7): 1011.
- [101] Groenwold A., H.R., (2006). "Optimization With Non-Homogeneous Failure Criteria Like Tsai-Wu For Composite Laminates". Structural Multidisc Optimization, 32: 183-190.
- [102] Wikipedia, Equation of State, http://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_state, 18.Ekim.2013.
- [103] Dacko A., T.J., (2010). "Structural Response Of Blast Loaded Fuselage". Journal of KONES Powertrain and Transport. 17(1).
- [104] Ian D. ve Day J. (2005). "Overview of ALE Method In LS-DYNA", LSTC Corp., ABD.
- [105] Xue Z. ve H.J.W., (2003). "Preliminary Assessment of Sandwich Plates Subject to Blast Loads", International Journal of Mechanical Sciences, 45(4): 687-705.
- [106] Fleck, N. ve Deshpande, V., (2004). "The Resistance of Clamped Sandwich Beams to Shock Loading", Trans. ASME, J. Appl. Mech., 71(3): 386-401.
- [107] Xue, Z. ve Hutchinson, J. W., (2004) "A Comparative Study of Impulse-Resistant Metal Sandwich Plates", International Journal of Impact Engineering, 30(10) 1283-1305.
- [108] Hutchinson, J.W. ve Xue, Z, (2005) "Metal Sandwich Plates Optimized for Pressure Impulses". International Journal of Mechanical Sciences. 47(4-5): 545-569.
- [109] Deshpande, V. ve Fleck, N., (2005) "One-Dimensional Response of Sandwich Plates to Underwater Shock Loading". Journal of. Mech. Phys. Solids, . 53 (11): 2347-2383.

- [110] Rabczuk, T., Kim, J. Y., Samaniego, E., ve Belytschko, B. T., (2004). "Homogenization of Sandwich Structures", *International Journal of Numerical Methods Engineering*, 61(7): 1009-1027.
- [111] Liang, Y., Spuskanyuk, A. V., Flores, S. E., Hayhurst, D. R., Hutchinson, J. W., McMeeking, R. M. ve Evans, A. G, (2007) "The Response of Metallic Sandwich Panels to Water Blast", *Journal of Applied Mechanics*, 74(1): 81-99.
- [112] Kambouchev N., R.R. ve Ludovic N., (2007). "Fluid–Structure Interaction Effects in the Dynamic Response of Free-Standing Plates to Uniform Shock Loading", *Journal of Applied Mechanics*. 74(5).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özgür DEMİR
Doğum Tarihi ve Yeri : 24.05.1982 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozgurd@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y.Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2006
Lise	Fen Bilimleri	Orhan Cemal Fersoy Lisesi	2000

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2006-2013	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. **DEMİR O.**, CETIN S., KESKIN I., (2012) "Modeling and Control of a Nonlinear Half-Vehicle Suspension System: A Hybrid Fuzzy Logic Approach" Nonlinear Dynamics, Vol.67, Issue 3, 2139-2151.

Bildiri

1. **DEMİR O.**, SAHIN A., YILMAZ T., (2012). "Investigation of Charge Weight and Shock Factor Effect on Non-linear Transient Structural Response of Rectangular Plates Subjected to Underwater Explosion (UNDEX) Shock Loading", Vol. 1479, 2352-2355, ICNAAM 2012, Kos, Yunanistan.

2. INCE S.T., **DEMİR O.**, BAYRAKTAR S., YILMAZ T., (2010) " A Bulk Carrier Hatch Block Analysis With Finite Element Method", TEHNONAV 2010, Constanta, Romanya.

3. **DEMİR O.**, BAYRAKTAR S., OZDEMİR Y.H., ALPAY O., YILMAZ T "Two-Dimensional Large Eddy Simulation (LES) of Exhaust Smoke Dispersion Around A Commercial Ship", TEHNONAV 2008, Constanta, Romanya.

4. ALPAY O., **DEMİR O.**, OZDEMİR Y.H., BAYRAKTAR S., YILMAZ T., "Fluid-Structure Interaction (FSI) of Three-Bladed Marine Propeller", TEHNONAV 2008, Constanta, Romanya.

5. CETIN S., **DEMİR O.**, "Fuzzy PID Controller With Coupled Rules For A Nonlinear Quarter Car Model", Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, WASET 2008, Prag, Çek Cumhuriyeti.

6. **DEMİR O.**, KARAKURT D., ALARCIN F., "Fuzzy and Internal Model Control of An Active System For A 2-DOF Vehicle Model", ICNAAM 2007, Corfu, Yunanistan.