

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PATLAMA YÜKÜ ALTINDAKİ ÇELİK PLAKALARIN PATLAMA
PARAMETRELERİNE BAĞLI DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Songül KÖSE

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Dinamiği, Titreşim, Akustik Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PATLAMA YÜKÜ ALTINDAKİ ÇELİK PLAKALARIN PATLAMA
PARAMETRELERİNE BAĞLI DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Songül KÖSE
(503161409)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Dinamiği, Titreşim, Akustik Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Haluk EROL

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503161409 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Songül KÖSE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “PATLAMA YÜKÜ ALTINDAKİ ÇELİK PLAKALARIN PATLAMA PARAMETRELERİNE BAĞLI DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Haluk EROL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri :Prof. Dr. Vahit MERMERTAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem UZUNSOY
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 03.05.2019
Savunma Tarihi : 11.06.2019





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek öğrenimim süresince ve bitirme tezi çalışmalarında her konuda yardımcı olan ve deneyimlerini paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Haluk EROL'a sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bugünlere gelmemde büyük emeği olan aileme ve tez yazım sürecinde bana sağladıkları motivasyon ve destek için arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mayıs 2019

Songül Köse (Analiz Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. TEORİ.....	5
2.1 Patlayıcılar.....	5
2.2 Ölçeklendirme Kanunu	7
2.3 Patlama Tipleri	8
2.4 Patlama Basıncı.....	9
2.5 Açık ve Kapalı Çözüm Metodu.....	14
2.5.1 Merkezi farklar yöntemi.....	15
2.6 Patlama Çözüm Yöntemleri	16
2.6.1 ALE yöntemi.....	16
2.6.2 CONWEP yöntemi.....	18
3. SAYISAL MODELİN OLUŞTURULMASI VE DOĞRULANMASI	21
3.1 Modelleme ve Sınır Şartları	21
3.2 TNT Kütlesi Deplasman İlişkisi.....	22
3.3 Patlama Mesafesi ve Deplasman İlişkisi.....	25
3.4 Sayısal Modelin Doğrulanması	27
4. PARAMETRİK ANALİZLER VE TASARIM GELİŞTİRME	
ÇALIŞMALARI.....	37
4.1 Uygun Geometrik Formun Belirlenmesi.....	38
4.2 Takviye Boyutlarının Deplasman Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	46
4.3 Değişik Konfigürasyonların Deplasman Üzerindeki Etkisi.....	49
4.4 Seçilen Tasarım.....	52
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	55
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

ALE	: Arbitrary Lagrangian Eulerian
ARS	: Abrasive Resistant Steel
CJ	: Chapman Jouguet
CONWEP	: Conventional Weapons
DIC	: Digital Image Correlation
EOS	: Equation of State
HHA	: High Hardness Armor
HMX	: High Melting Explosive
JC	: Johnson Cook
JWL	: Jones-Wilkins-Lee
RDX	: Royal Demolition Explosive
RHA	: Rolled Homogeneous Armour
TNT	: Trinitrotoluen

SEMBOLLER

H	: Patlama ısısı
W	: Patlayıcı kütlesi
t	: Zaman
R	: Patlayıcı merkezinden hedef yüzeye olan mesafe
E	: Enerji
λ	: Ölçeklendirme faktörü
Z	: Ölçeklendirilmiş mesafe
α	: Şok dalgasının geliş açısı
P_r	: Yansıma basıncı
P_s	: İlk patlama basıncı
P₀	: Atmosferik basınç
Δt_{cr}	: Kritik zaman adımı
L	: Eleman uzunluğu
C_a	: Malzemedeki ses hızı
ω	: Doğal frekans
i	: Darbe, itki
ρ	: Yoğunluk



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1: Patlayıcıların özgül patlama enerjileri	6
Çizelge 2.2: TNT'ye ait hal denklem parametreleri.....	17
Çizelge 3.1: Analiz matrisi.....	23
Çizelge 3.2: Analiz matrisi.....	26
Çizelge 3.3: RHA plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [28].....	30
Çizelge 3.4: ARS plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [28]	31
Çizelge 3.5: HHA plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [28].....	31
Çizelge 3.6: AX370T plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [29].....	34
Çizelge 3.7: Normalize edilen test değerleri	34
Çizelge 4.1: Kalınlığa bağlı deplasman ve ağırlık değerleri	46
Çizelge 4.2: Seçilen modele ait analiz sonuçları.....	53

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Ölçeklendirilen parametreler [13].....	8
Şekil 2.2: Patlama tipleri	9
Şekil 2.3: Patlama dalgasının basınç profili	10
Şekil 2.4: İlk basınç ve yansıma basıncı [11].....	11
Şekil 2.5: Geliş açısına bağlı yansıma basıncı grafiği [16].....	12
Şekil 2.6: Patlama basınç eğrilerinin karşılaştırılması [12].....	14
Şekil 2.7: Patlama dalgasının geliş açısı	18
Şekil 3.1: Plakanın kabuk eleman modeli	21
Şekil 3.2: Analiz modeli.....	22
Şekil 3.3: LOAD_BLAST_ENHANCED kart parametreleri	23
Şekil 3.4: Analiz sonucu verileri	24
Şekil 3.5: Kütle oranlarına bağlı deplasman oranı grafiği	24
Şekil 3.6: Analiz modeli.....	25
Şekil 3.7: Patlama mesafesine bağlı deplasman düşüşü.....	26
Şekil 3.8: Deneysel düzeneği [28]	28
Şekil 3.9: Testle uyumlu analiz modeli	29
Şekil 3.10: Kart parametreleri (40 gr PE4)	29
Şekil 3.11: RHA plaka ile yapılan analiz ve literatür test sonuçları	30
Şekil 3.12: Elde edilen eğrinin literatür testleri ile doğrulanması.....	32
Şekil 3.13: Patlayıcı disk modeli.....	33
Şekil 3.14: Sarkaç düzeneğin iç görüntüsü	33
Şekil 3.15: Analiz trend eğrilerinin literatür test sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.1: Model_01 ve sınır şartları	37
Şekil 4.2: Farklı formdaki takviye modelleri	38
Şekil 4.3: Model_02'ye ait geometrik özellikler.....	39
Şekil 4.4: Model_03'e ait geometrik özellikler.....	39
Şekil 4.5: Model_04'e ait geometrik özellikler.....	40
Şekil 4.6: Model_05'e ait geometrik özellikler.....	40
Şekil 4.7: Model_06'ya ait geometrik özellikler.....	41
Şekil 4.8: Model_01 gerilme dağılımı.....	42
Şekil 4.9: Model_02 gerilme dağılımı.....	42
Şekil 4.10: Model_03 gerilme dağılımı.....	42
Şekil 4.11: Model_04 gerilme dağılımı.....	43
Şekil 4.12: Model_05 gerilme dağılımı.....	43
Şekil 4.13: Model_06 gerilme dağılımı.....	43
Şekil 4.14: Modellerin deplasman düşüşüne etkileri	44
Şekil 4.15: Modellerin ivme düşüşüne etkileri.....	44
Şekil 4.16: Modellerin ivme düşüşüne etkileri [0-250 μ s].....	45
Şekil 4.17: Modellerin deplasman ve frekans değerlendirmesi	45
Şekil 4.18: Seçilen takviye formu	46
Şekil 4.19: Kalınlığa bağlı verim değişimi.....	47
Şekil 4.20: a/b oranına bağlı sonuçlar	48
Şekil 4.21: a/ b oranına bağlı deplasman düşüşü	48

Şekil 4.22: Kalınlığın verim oranına etkisi	49
Şekil 4.23: Boyutlandırılan takviye modelinin deplasman düşüşüne etkisi.....	49
Şekil 4.24: Takviyeli plakaların konfigürasyonları.....	50
Şekil 4.25: Modellerin deplasman sonuçları	50
Şekil 4.26: Modellerin ivme sonuçları	51
Şekil 4.27: Modellerin deplasman ve ağırlık oranları	51
Şekil 4.28: Seçilen nihai takviye plakası modeli	52
Şekil 4.29: Takviyeli ve takviyesiz plakanın frekans değerleri	52
Şekil 5.1: Kütle oranına bağlı deplasman oranı	55
Şekil 5.2: Patlama mesafesine bağlı plaka deplasmanı trendi.....	56
Şekil 5.3: Seçilen takviye modeli.....	57
Şekil 5.4: Takviyeli ve takviyesiz plakanın gerilme değerlerinin kıyaslanması.....	57





PATLAMA YÜKÜ ALTINDAKİ ÇELİK PLAKALARIN PATLAMA PARAMETRELERİNE BAĞLI DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Mayın patlaması sırasında ortaya çıkan yüksek basınç araç gövdesinde yüksek deformasyon ve ivmelenmeye yol açarak mürettebat için risk oluşturmaktadır. Araç için kritik bölgelerin önceden tespitinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılması büyük önem taşımaktadır.

Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan çalışmada, patlama mesafesi ve patlayıcı kütlesi gibi parametreler ile plaka deplasman ilişkisinin saha testleri öncesinde ön görülmesi hedeflenmiştir. Bunun yanısıra takviyeli plakaların deplasman üzerindeki sönüm etkileri incelenerek tasarımcı için yol göstermesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması, belirlenen bu amaçlar doğrultusunda iki kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında patlayıcı kütlesi ve patlama mesafesi olmak üzere iki önemli patlama parametresinin plaka deplasmanı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Patlama mesafesi sabit tutularak patlayıcı kütlesi oranlarına bağlı deplasman oranları elde edilmiş ve trend bir eğri oluşturulmuştur. Bunun yanısıra 1 kg ile 10 kg patlayıcı kütle aralığı için patlama mesafesine bağlı deplasman değişimi incelenmiştir. Patlama mesafesinin artmasına bağlı olarak plakanın merkez deplasmanındaki düşüş yüzdeleri bulunmuş ve her bir patlayıcı kütlesi için aynı grafikte gösterilmiştir. Literatürde yapılan plaka test değerleri alınarak bulunan eğriler ile kıyaslandığında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmı patlama yüklerinin değişik formdaki takviye plakaları üzerindeki sönüm etkisinin incelenmesine yöneliktir. Değişik formdaki takviyeler ağırlığı aynı olacak şekilde boyutlandırılarak patlama analizleri gerçekleştirilmiştir. Takviyelerin plakanın deplasman ve ivme değerlerini düşürmesi, doğal frekansını ise artırması yönündeki etkileri değerlendirilmiş ve en efektif form seçilmiştir. Seçilen takviye formunun kalınlıkları değiştirilerek deplasman etkileri incelenmiş ve optimum bir kalınlık belirlenmiştir. Seçilen takviye formu ve boyutları ile farklı konfigürasyonlar denenerek maksimum deplasman düşüşünü sağlayan model seçilmiştir. Nihai karar verilen modelde deplasman düşüşünün yanı sıra ağırlık artışı, doğal frekans, mod şekilleri ve gerilme değerleri de incelenmiştir.

Bu çalışmadaki patlama analizleri LS DYNA sonlu elemanlar kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plaka ve takviye modellerinin hazırlanmasında ise Hypermesh programı kullanılmıştır. LS DYNA yazılımı ile gerçekleştirilen patlama analizlerinde CONWEP (Conventional Weapons) patlama yöntemi kullanılmıştır. Patlama tipi, açık havada küresel yayılı patlama tipi şeklinde tanımlanmıştır. Mayın patlamalarında yüksek gerinim hızlarındaki malzeme davranışının benzetimi için plaka malzemesi olarak Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır.



NUMERICAL INVESTIGATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF STEEL PLATES UNDER BLAST LOADING ACCORDING TO BLAST PARAMETERS

SUMMARY

High pressure during the mine blasts causes high deformation and acceleration for the vehicle body and poses a risk for the crew. It is very important to use the finite element method in order to predetermine the critical regions of the vehicle.

Within the scope of master thesis, it is aimed to predict the displacement relationship of the steel plate with blast parameters such as explosive mass and standoff distance for the free air blast tests. Besides, it is aimed to guide the designer by examining the damping effects on the displacement of stiffened plates.

The thesis study consists of two parts. In the first stage of the study, the effects of two important parameters, explosive mass and standoff distance, on plate displacement are investigated and trend graphs are obtained. Depending on the variable explosive mass, the displacement ratios are obtained by keeping the standoff distance constant. A trend curve is created using the obtained ratios. In addition, displacement changes due to standoff distance are investigated for 1 kg to 10 kg explosive mass range. The percentage decrease of the center displacement of the plate has been found due to the increase in the standoff distance. The plate test values carried out in the literature are compared with the obtained curves and the results are consistent.

In the second part of the study, it is aimed to investigate the damping effects of different forms of stiffened plates exposed to blast loading. Different forms of stiffeners are dimensioned so as to maintain the same weight. The effects of the stiffeners on decreasing the displacement and acceleration values of the plate and increasing the natural frequency are evaluated and the most effective form is selected. By changing the thickness of the selected stiffener form, displacement effects are examined and an optimum thickness is determined. With the selected stiffener form and dimensions, different configurations are tried and the model that provides maximum displacement decrease is selected. In the final decision model, weight increase, natural frequency, mode shapes and stress values as well as displacement decrease are examined.

Blast analyzes in this study are performed by using LS DYNA finite element code. Hypermesh program is used in preparation of plate and stiffener models. CONWEP (Conventional Weapons) explosion method is used in blast analyzes performed with LS DYNA software. The type of explosion has been defined as a spherical free air explosion type. Johnson-Cook material model is used as a plate material to simulate material behavior at high strain rates in mine blast simulations.



1. GİRİŞ

Zırhlı araçlar için asimetrik bir tehdit unsuru olan kara mayınları, araç ve mürettebata ciddi zararlar verebilmektedir. İçerisindeki personelin hayatta kalması askeri araçların mayın karşısındaki başarısı için en önemli ölçüttür. Tehdit unsurlarına karşı araç gövdesinde yüksek deformasyon ve ivmelerin olduğu kısımlar mürettebat için risk teşkil etmektedir. Aracın patlama basıncı karşısındaki zayıf bölgelerinin önceden tespiti ve bu bölgelerde önlem alınması önemlidir. Oldukça masraflı ve meşakkat gerektiren test çalışmaları öncesinde sonlu elemanlar yöntemiyle bir öngörü elde etmek bilgisayar destekli mühendisliğin önemini bu aşamada ortaya koymaktadır. Senaryosu doğru şekilde oluşturulmuş bir nümerik benzetim yöntemi ile patlama sırasında oluşan basıncın yapı üzerindeki etkileri simülasyon ortamında görülebilmektedir. LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile mayın patlaması sırasında, patlamanın yarattığı yüksek basıncın araç gövdesinde ve alt sistemlerinde neden olacağı deformasyon ve ivmelenmeler açık bir şekilde görülebilmektedir [1].

Mayın patlamaları askeri kuvvetler için en önemli asimetrik tehditlerin başında gelmektedir. Bu tehditin temelini patlama sırasında oluşan yüksek şok basıncı oluşturmaktadır. Mayın patlaması sırasında ortaya çıkan şok dalgalarının araç gövdesinde doğrudan etkilediği bölgelere vermiş olduğu zarar daha yüksek olmaktadır. Bu bölgelerin önceden tespiti ve ek tasarım önlemlerinin alınmasında nümerik modelleme ve testle doğrulama çalışmaları önem kazanmaktadır. Patlama yüklerine maruz kalan plakaların yapısal tepkisinin daha iyi anlaşılması, patlama basıncına dayanıklı yapıların tasarlanmasına ve askeri araçlar için güvenlik seviyesinin artırılmasına yardımcı olacaktır. Literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar daha çok ölçeklendirilmiş mayın kütlesi ve patlama mesafelerinde çeşitli çelik plakaları üzerinde deneyler yapılarak gerçekleştirilmiştir.

N. Jacob ve diğerleri [2], çeşitli mesafelerde patlatılan patlayıcı yüklerine maruz kalan sabitlenmiş dairesel plakaların dinamik tepkisini araştırmıştır. Patlayıcı yarıçapından daha küçük mesafelerde patlama yükü lokalize olurken, patlayıcı yarıçapından daha büyük patlama mesafelerinde deforme olan plaka, patlama yükünün düzgün bir

dağılımını gösteren küresel bir kubbe formunu almıştır. Yapılan deneylerde farklı patlama mesafelerinin, uygulanan yükleme koşulununun tipini etkilediği gösterilmiştir.

Yuen ve diğ. [3], patlama yükünün dörtgen bir plaka üzerine etkilerini karakterize etmek için yapılan deney çalışmalarının ve sayısal simülasyonların sonuçlarını sunmuşlardır. Çalışma iki ayrı düzenlemede gerçekleştirilmiştir. Bir konfigürasyonda, patlayıcı, şok dalgası cephesine göre değişik darbe açıları sağlayacak şekilde hedef plakaya göre farklı açılarda (0 °, 15 °, 30 ° ve 45°) eğilmiştir. Diğer yapılandırmada ise, hedef plakası patlayıcıya göre iki farklı açıda (15° ve 45°) konumlandırılmıştır. Patlayıcı yükün veya hedef plakanın eğimli konumlandırılması ile, hedef plakaya aktarılan patlama yükünün bir kısmı artan eğim açısı ile saptmıştır. Sapma ile plakanın maksimum deplasmanı ve oluşacak hasar azalmıştır. Eğim açısı arttıkça, maksimum deformasyon konumunda da kayma gözlenmiştir. Eğim açısına bağlı plakada oluşan deformasyon ve darbe sonuçları paylaşılmıştır.

Zakrisson ve diğ. [4] ise toprakta yarı ölçekli patlama deneyleri yapmış ve plaka üzerinden yapısal deformasyon ve darbe aktarımını ölçmüştür. Yazarlar, mayının gömme derinliği (0, 50 ve 150 mm) ve kumun nem içeriğinin etkisini de araştırmıştır. 50 mm ve 150 mm gömme derinliği deneyleri için toplam darbenin gömme derinliği ile arttığını belirtmişlerdir. Buna karşılık, gömme derinliği 0 ile 50 mm arasında değiştikçe plaka deformasyonu artmış, fakat 150 mm'lik derinlikte ise azalmıştır. LS-DYNA simülasyonlarında ölçülen değerler test değerlerinden daha düşük çıkmasına rağmen, yine de deneylerde gözlemlenen eğilimi açıklamıştır.

Cheng Zheng ve diğ. [5] sınırlandırılmamış patlama yükü altında, takviyesiz ve takviyeli çelik plakaların davranışına ilişkin deneysel ve sayısal araştırmaların sonuçlarını sunmuşlardır. Özel olarak tasarlanmış bir patlama odasında incelenen silindirik TNT yükü altında farklı takviye konfigürasyonlara sahip kare çelik saclarda deneyler yapılmıştır. Numunelerin kalıcı deformasyon profilleri kaydedilmiştir. Aynı yükte bir açık alan patlamasındaki darbe ile kıyaslandığında, plakaya uygulanan eşdeğer darbe kuvvetinin, kapalı hacimde gerçekleştirilen patlama durumuna göre 4.03-6.63 katına kadar artabildiği görülmüştür. Ayrıca, ANSYS/AUTODYN kullanılarak plakaların deformasyon modları hakkında daha fazla bilgi edinmek için sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Plakanın merkez deplasmanları ve deformasyon profilleri açısından korelasyon elde edilmiştir.

Jacob ve diğ. [6] tarafından farklı kalınlıklardaki çelik plakalar çeşitli boyutlarda lokalize patlama yüklerine maruz bırakılarak plakaların değişken uzunluk-genişlik oranlarına ilişkin bir dizi deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Hem yükleme koşullarının hem de plaka geometrilerinin değişmesinin deformasyon üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmuştur.

Düzenli dağılımlı patlama yüküne maruz kalan dörtgen çelik levhaların davranışı Oskouei ve Kiakoouri [7] tarafından incelenmiştir. Sonlu eleman boyutu, yük koşulları, plaka geometrisi ve sönüm oranı gibi birçok parametrenin etkisi dikkate alınmıştır. Sonuçlar, takviye konfigürasyonunun ve sınır koşullarının plakanın dinamik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Tavakoli ve Kiakoouri [8], patlama yüküne maruz kalan kare çelik takviye plakalarının doğrusal olmayan tepkisini sayısal olarak incelenmiştir. Takviye konfigürasyonları, sınır koşulları, sabitleme detayları ve patlama yüküne maruz kalan plakaların dinamik tepkisini etkileyebilecek gerilme hızı dikkate alınmıştır. Plakanın merkez noktasının deplasmanı ve modellerin enerjilerinin değerlendirilmesine yönelik sonuçlar sunulmuştur.

Yapılan literatür çalışmalarında mayın patlama yükü altında pek çok plaka testleri gerçekleştirilmiş ve plakanın yapısal davranışları incelenmiştir. Bir kısmında test ve analiz sonuçlarının korelasyonu sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında ise iki aşamalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada aynı mesafede tutulan plakaların farklı patlayıcı kütlelerinde LS DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile analizleri gerçekleştirilmiş ve patlayıcı kütle oranlarına bağlı deformasyon oranları elde edilmiştir. Sonrasında ise patlayıcı kütleleri sabit tutularak farklı mesafelerde patlama analizleri gerçekleştirilip patlama mesafesinin deformasyon üzerindeki etkisine yönelik trend grafiği oluşturulmuştur. Yüksek maliyetli deneysel çalışmalara başvurmadan simülasyon ortamında patlama parametreleri ve plakanın dinamik davranışı üzerine bir öngörü elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen trend eğrilerin literatürde farklı boyut plaka, malzeme ve farklı patlayıcıyla gerçekleştirilen saha testlerinden elde edilen sonuçlarla da uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşaması ise plaka üzerine farklı formdaki takviyeler kullanılarak en uygun formun seçilmesi, takviye boyutlarının deplasman, ağırlık ve doğal frekans üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve bu parametreler açısından en uygun formdaki

takviyeye karar verilmesi aşamalarını içermektedir. Bu çalışmanın nümerik ortamda tasarımcı için bir öngörü oluşturması hedeflenmiştir.



2. TEORİ

2.1 Patlayıcılar

Üretimi kolay ve kompakt yapıda olan patlayıcılar yapısal hasara ve yaralanmalara neden olacak büyük bir güce sahip olduğu için çok yaygın bir terörist silahı olarak kullanılabilir. Patlayıcının yol açacağı etki, patlama hızı ve patlama basıncı gibi iki Chapman Jouguet (CJ) durum parametresi ve reaksiyona girmemiş haldeki yoğunluğu (ρ_0) ile tanımlanabilmektedir. Genel olarak, daha yüksek CJ parametreleri daha enerjik patlayıcıları göstermektedir. Yanma reaksiyonu hızları basınç ve sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu ve reaksiyon oranı basınçla arttığından, güçlü sınırlandırma çoğu patlayıcı ve birçok itici gaz için yanmaya neden olabilmektedir [9]. Patlayıcıların çoğu yeterli bir uyarılmayla patlayarak yüksek basınç altında çok sıcak, yoğun bir gaza dönüşmektedir. Askeri patlayıcılar için patlama dalgasının hızı 6700 ila 8840 m/s, basınç 18620 ile 38620 MPa, sıcaklıklar ise yaklaşık 3800 ila 5700 K arasında değişmektedir [10].

Patlayıcı maddenin toplam kimyasal enerjisinin yaklaşık üçte biri patlamayla serbest kalırken; geri kalan kısım, patlayıcı ürünlerin etrafındaki hava ile karışması sonucu yanma ısısı şeklinde daha yavaş salınmaktadır. En çok bilinen patlayıcıların ısı çıkışı değerlerine ait tablolar literatürde mevcuttur. Çizelge 2.1, bazı yaygın patlayıcılara ait özgül patlama enerji değerlerini vermektedir [11].

Çizelge 2.1: Patlayıcıların özgül patlama enerjileri

Patlayıcı	Özgül Enerji	TNT Eşdeğeri
	$Q_x / \text{kJ/kg}$	Q_x / Q_{TNT}
B Bileşiği (60 % RDX, 40 % TNT)	5190	1,148
RDX	5360	1,185
HMX	5680	1,256
Nitrogliserin (sıvı)	6700	1,481
TNT	4520	1
Patlayıcı jelatin (91 % nitrogliserin, 7,9 % nitroselüloz, 0,9 % antrasit, 0,2 % su)	4520	1
60 % Nitrogliserin dinamit	2710	0,6
Semtex	5660	1,25
C4	6057	1,34

Hesaplamalarda referans bir patlayıcı olarak TNT kabul edilmektedir. Diğer patlayıcıların gücü genelde TNT eş değeri ile ifade edilmektedir. Patlama dalgasını TNT dışındaki bir kaynaktan ölçmenin ilk adımı, patlayıcı kütlesini TNT'nin eşdeğer bir kütlesine dönüştürmektir. Eşitlik (2.1) ile, Çizelge 2.1 kullanılarak eşdeğer TNT ağırlığı hesaplanabilmektedir [12].

$$W_e = W_{\text{exp}} \left(\frac{H_{\text{exp}}^d}{H_{\text{TNT}}^d} \right) \quad (2.1)$$

(2.1) nolu eşitlikte; W_e TNT eş değer ağırlığını [kg], W_{exp} patlayıcının ağırlığını [kg], H_{exp}^d patlayıcının patlama ısısını [MJ/kg] ve H_{TNT}^d TNT'nin patlama ısısını [MJ/kg] temsil etmektedir.

2.2 Ölçeklendirme Kanunu

Tüm patlama parametreleri temel olarak patlama dalgası şekline, patlama ile salınan enerji miktarına ve patlamadan uzaklığa bağlıdır. Ölçeklendirme kanunları, belirli bir patlama ile aynı maddenin standart yükü arasında parametrik korelasyonlar sağlamaktadır. Ölçeklendirme yasalarının getirilmesiyle mesafenin patlama karakteristikleri üzerindeki etkisi dikkate alınabilmektedir. En yaygın patlama ölçeklendirme yasaları, Hopkinson-Cranz ve Sachs tarafından getirilen yasalardır. Her iki formülasyonun arkasındaki temel fikir, aynı geometriye ama farklı patlayıcı ağırlığına sahip olan iki farklı patlamanın bir hedef yüzeyden aynı ölçeklenmiş mesafede konumlandırılmasıdır. Aynı atmosfer koşullarında olduğu sürece benzer patlama koşulları oluşturulmaktadır. Sachs ölçeklendirmesi, farklı atmosferik koşullar için de uygundur [12].

Hopkinson-Cranz Yasası'na göre eşitlik (2.2)'de olduğu gibi Z ile ifade edilen bir ölçeklendirilmiş mesafe tanımlanmaktadır. W_1 ağırlığının R_1 mesafesinde oluşturduğu basıncı W_2 ağırlığındaki patlayıcı R_2 mesafesinde oluşturacaktır [12].

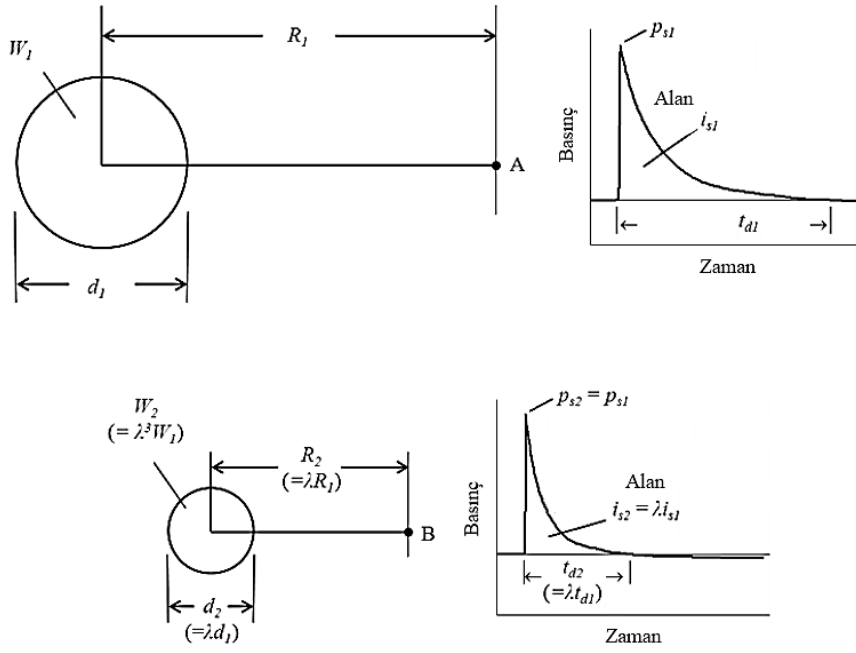
$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \text{ ya da } Z = \frac{R}{\sqrt[3]{E}} \quad (2.2)$$

R: Patlayıcının hedef yapıya olan mesafesi

W: Patlayıcının kütlesi

E: Patlayıcının enerjisi

$$\lambda = \frac{R_1}{\sqrt[3]{W_1}} \quad (2.3)$$



Şekil 2.1: Ölçeklendirilen parametreler [13]

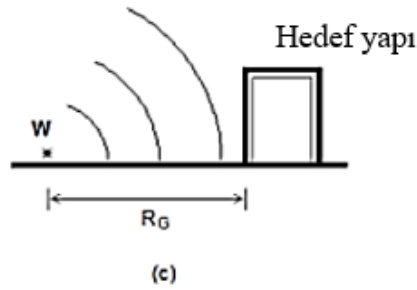
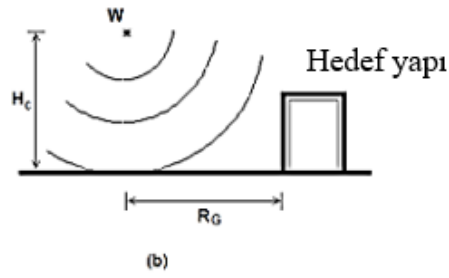
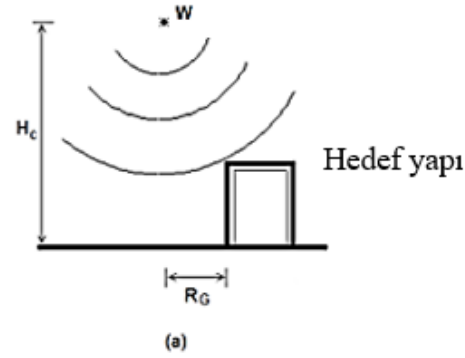
Şekil 2.1’de gösterildiği gibi bir patlama dalgasının tüm mesafe ve zaman parametrelerinin aynı faktör λ ile ölçeklendirildiğinin altını çizmek önemlidir, ancak basınç ve hız değerleri ölçeklendirilememektedir [13].

2.3 Patlama Tipleri

Patlamanın gerçekleşme şekline göre patlama şok dalgası yapılar ve araç gövdesi üzerinde farklı etkilere yol açabilmektedir. Yayılma yolu boyunca yansımalar ve girişim olayları, dalga yoğunluğunu ve dolayısıyla yüklem basınçlarını büyük ölçüde değiştirebilmektedir.

Şekil 2.2’de üç farklı patlama tipi ve yayılım şekli gösterilmiştir. Serbest açık hava patlamalarında patlayıcı yük havada patlayarak patlama dalgası olarak küresel şekilde dışarıya doğru yayılmaktadır. Diğer engellerle veya toprakla önceden etkileşime girmeden doğrudan yapıya ulaşmaktadır (Şekil 2.2a). Hava patlamalarında patlayıcı yük havada patlayarak patlama dalgaları küresel şekilde dışarıya doğru yayılmakta ve ilk önce zeminle etkileşime girdikten sonra hedef yapıya ulaşmaktadır (Şekil 2.2b). Şekil 2.2c’de gösterilen yüzey patlamalarında ise patlayıcı yük zeminde ya da zemin yüzeyine çok yakın mesafede patlatılmaktadır. Patlama dalgaları lokal olarak

etkileşime girmekte ve daha sonra yarım küre şeklinde dışa doğru yayılarak hedef yapıya ulaşmaktadır [12].

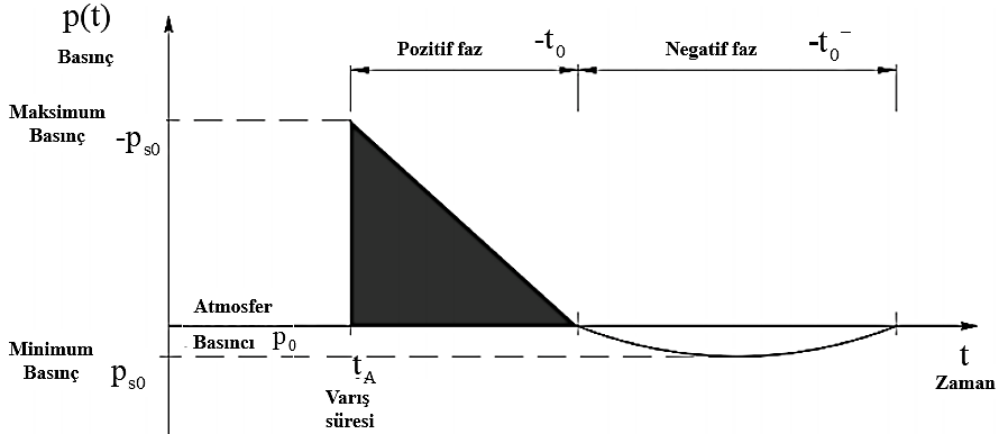


Şekil 2.2: Patlama tipleri

2.4 Patlama Basıncı

Patlama, sıcak gazların ve enerjinin hızlı salınımının gerçekleştiği bir katı, toz veya gazı içeren çok hızlı bir kimyasal reaksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu olay sadece birkaç mili saniye sürmekte ve çok yüksek sıcaklık ve basınçların üretilmesine neden olmaktadır. Patlama sırasında üretilen sıcak gazlar genişlemekte ve küresel bir dalga tipi şeklinde yayılmaktadır. Üretilen gazların yanı sıra, patlama (hava patlamaları için)

etrafındaki hava da genişleyerek ve molekülleri birikerek, bir patlama dalgası ve şok cephesi oluşturmaktadır [14].



Şekil 2.3: Patlama dalgasının basınç profili

Patlama dalgasının karakteristik formu Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Patlama basıncı belli bir maksimum değere ulaştıktan sonra logaritmik bir şekilde azalmaktadır. Basınç değerindeki bu düşüş oranını belirlemek için eşitlik (2.4)'te belirtilen Friedlander denklemi tanımlanmıştır.

$$P_s(t) = P_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte P_{s0} en yüksek pozitif basıncı, t_0 pozitif basınç dalga süresini, b patlama dalgasının sönümlenme katsayısını, t ilk dalganın varış zamanından itibaren geçen süreyi temsil etmektedir.

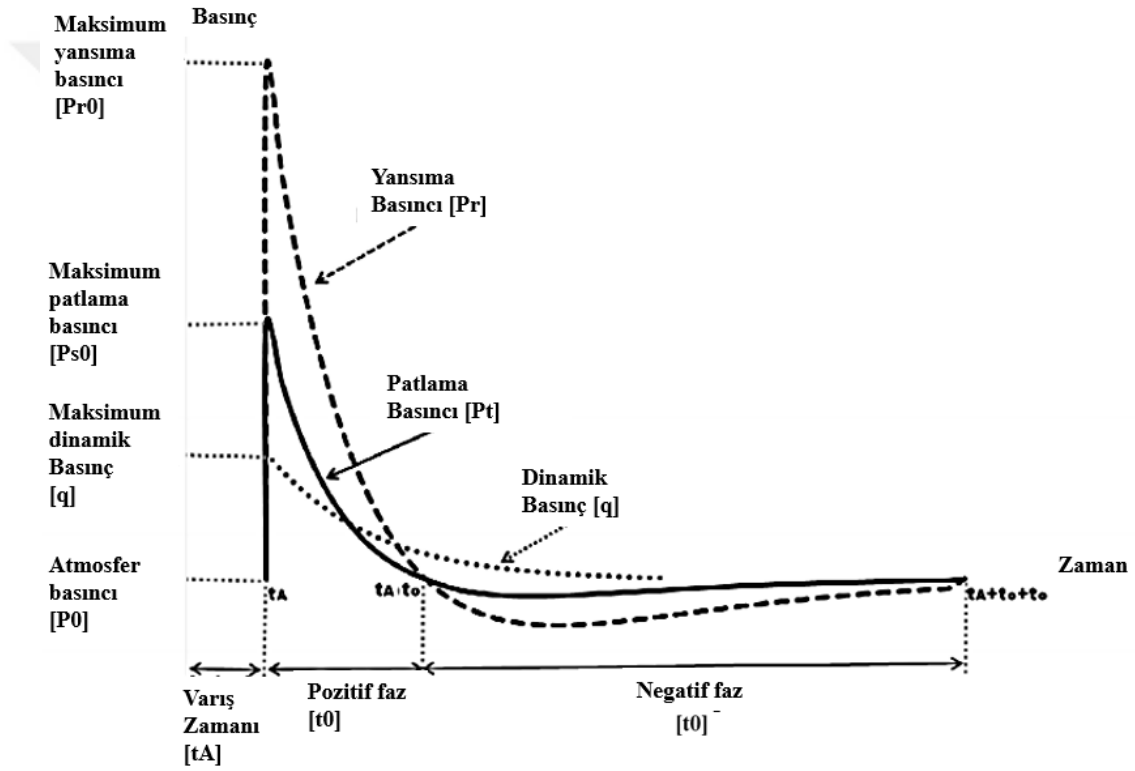
Maksimum pik basıncının yanı sıra, tasarım amaçları için, patlama dalgasının önemli bir parametresi darbedir, çünkü patlama nedeniyle bir yapı üzerine uygulanan toplam kuvvet (birim alan başına) ile doğrudan ilişkilidir ve (2.5) nolu eşitlikle tanımlanmaktadır.

$$i_s = \int_{t_A}^{t_A+t_0} P_s(t) dt \quad (2.5)$$

(2.4) nolu Friedlander denklemi bu eşitlikte yerine koyulursa;

$$i_s = \frac{P_{s0} t_0}{b^2} [b - 1 + e^{-b}] \quad (2.6)$$

elde edilmektedir. Deneysel olarak elde edilen i_s , P_{s0} ve t_0 değerleri bilindiğinde b katsayısı bu eşitlikle analitik olarak hesaplanabilmektedir. Patlama esnasında oluşan şok dalgası bir nesneye veya bir yapıya çarptığında yansıma basıncı meydana gelmektedir. Patlama dalgası yayılma yönüne dik bir engelle karşılaştığında pozitif ilk basınç (patlama basıncı) maksimum yansıma basıncına yükselmektedir (Şekil 2.4).



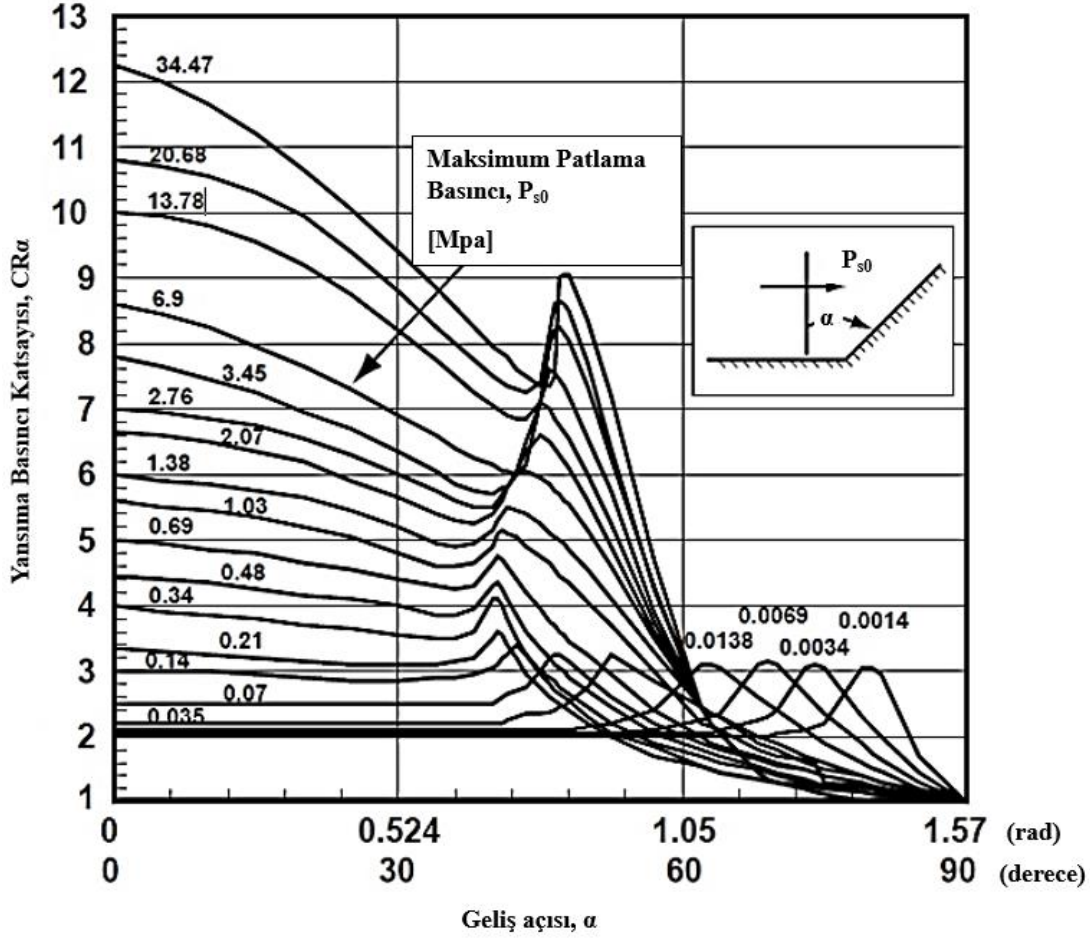
Şekil 2.4: İlk basınç ve yansıma basıncı [11]

Rankine-Hugoniot denklemleri kullanılarak yansıma basıncı için (2.7) nolu denklemdeki gib bir ifade bulabilmektedir. γ sabiti basınç ve hacimdeki ısı kapasiteleri oranı olup ideal gaz varsayımı durumunda 1.4'e eşittir. Yansıma basıncı $20 P_s$ 'e kadar ulaşabilmektedir [15] [16].

$$P_r = 2P_s + \frac{(\gamma+1)P_s^2}{(\gamma-1)P_s + 2P_0\gamma} \quad (2.7)$$

$$i_r = \int_{t_A}^{t_A+t_0} P_r(t) dt \quad (2.8)$$

Analitik çözümün yanısıra geliş açısının bir fonksiyonu olarak Şekil 2.5'te şok dalgasının farklı geliş açlarına ve ilk basınca bağlı yansımaya basıncı eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 2.5: Geliş açısına bağlı yansımaya basıncı grafiği [16]

mesafenin hesaplanmasını gerektirmektedir. Kinney'in [17] ölçeklendirilmiş Z mesafesine bağlı elde ettiği denklem (2.9) nolu eşitlikte gösterilmiştir.

$$P_{so} = P_o \frac{808 [1 + (Z/4.5)^2]}{\left\{ [1 + (Z/0.048)^2] [1 + (Z/0.32)^2] [1 + (Z/1.35)^2] \right\}^{0.5}} \quad (2.9)$$

Bir diğerk bağıntı (2.10) Brode tarafından oluşturulmuştur. Maksimum patlama basıncının 10 bardan yüksek olması ve 0.1 bar ile 10 bar aralığında olması durumunda 2 farklı eşitlik sunmuştur [18].

$$P_{s0} = \left\{ \frac{6.7}{Z^3} + 1 \right\} ; P_{s0} > 10 \text{ bar} \quad (2.10)$$

$$P_{s0} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 ; 0.1 < P_{s0} < 10 \text{ bar}$$

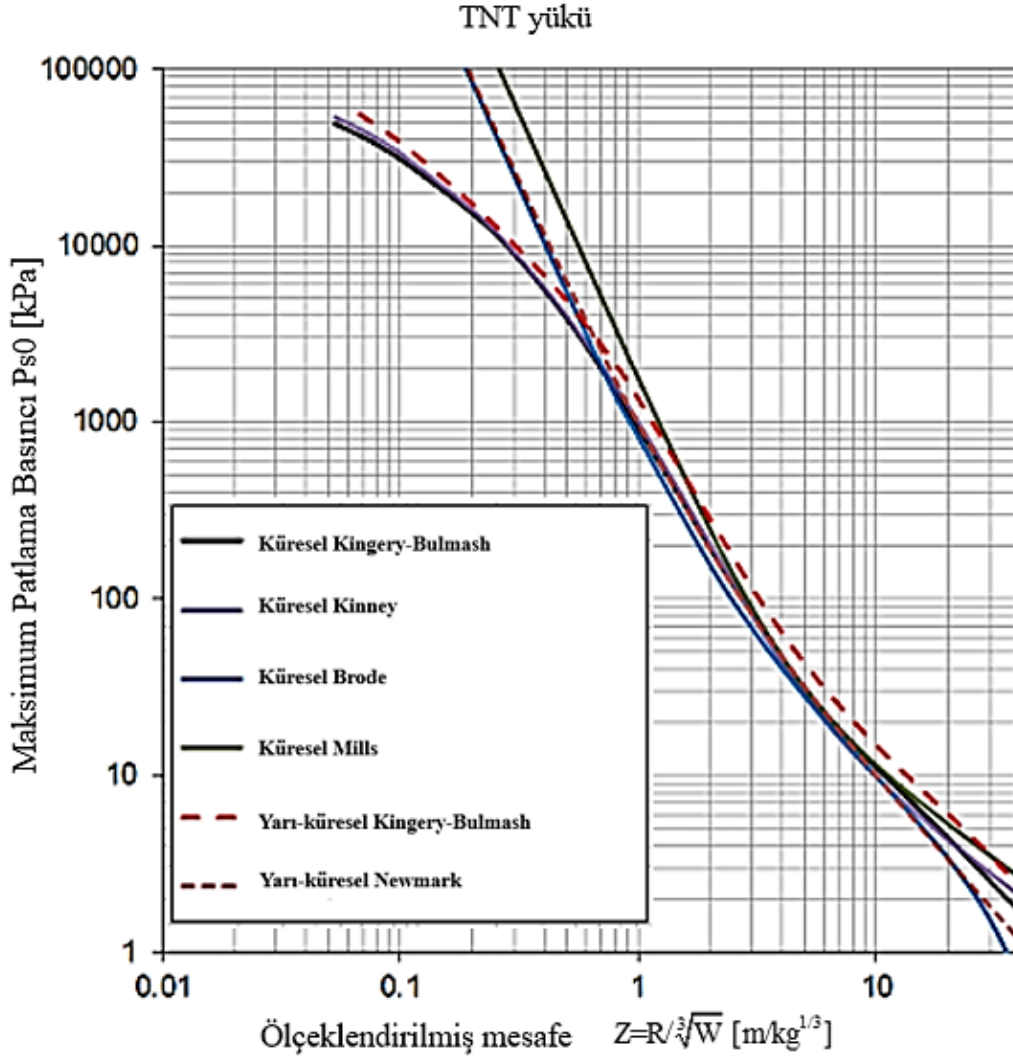
Newmark [19] patlayıcı kütlesi (ton) ve patlama mesafesine (m) bağılı bir basınç (bar) bağıntısı (2.11) sunmuştur.

$$P_{s0} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \sqrt{\frac{W}{R^3}} \quad (2.11)$$

Mills [20] ise yine ölçeklendirilmiş mesafeye bağılı bağıntı (2.12) bulup basıncı kPa cinsinden elde etmeyi amaçlamıştır.

$$P_{s0} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (2.12)$$

Karşılaştırma amacı ile hem açık hava patlamaları (küresel dalgalar) hem de yüzey patlamaları (yarım küre dalgaları) için ölçeklendirilmiş mesafeye bağılı maksimum basınç eğrileri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Kingery-Bulmash çalışmasının ilgili eğrileri referans için dahil edilmiştir.



Şekil 2.6: Patlama basınç eğrilerinin karşılaştırılması [12]

2.5 Açık ve Kapalı Çözüm Metodu

Açık ve kapalı çözüm yöntemleri zamana bağlı diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılan çözüm yöntemleridir. Açık çözüm yöntemi kullanılırken katılık matrisi sadece başlangıçta hesaplanır. İteratif yöntemler ile denklem ve denge çözümü gerekli değildir. Açık çözüm yönteminde yakınsama sorunu yoktur. Açık yöntem küçük zaman adımlarını gerektirmektedir. Gerekli olan küçük zaman artışlarına bağlı olarak açık yöntem, yüksek hızlı dinamik simülasyonlar için idealdir [21].

Örtük (kapalı) bir yöntem kullanıldığında ise, denklem çözme ve denge çözme her zaman artışı için gereklidir. Her artış için yakınsama elde edilmelidir, bu her artışın hesaplama açısından pahalı olduğu anlamına gelmektedir. Öte yandan, yöntem

koşulsuz olarak kararlıdır. Örtük yöntem, ilgilenilen yanıt süresinin uzun olduğu sorunlar için idealdir [21].

2.5.1 Merkezi farklar yöntemi

Merkezi farklar yöntemi doğrusal olmayan problemler için kullanılan bir açık çözüm yöntemidir. Çok serbestlik dereceli bir sistemin genel hareket denklemi matrix formunda ifade edilecek olursa (2.13) nolu eşitlik elde edilmektedir.

$$[M]\{\ddot{D}(t)\} + [C]\{\dot{D}(t)\} + \{R^{int}(t)\} = \{R^{ext}(t)\} \quad (2.13)$$

Bu denklemde [M] kütle matrisini, [C] sönüm matrisini, R^{int} iç kuvvet vektörünü (lineer elastik malzeme için $K \cdot D$), R^{ext} dış kuvvet vektörünü (basınç) temsil etmektedir.

(2.13) ile belirtilen hareket denklemi düzenlenecek olursa;

$$\ddot{D}^n = M^{-1} (R_{ext}^n - C\dot{D}^n - R_{int}^n) \quad (2.14)$$

$$\dot{D}^{n+1/2} = \dot{D}^{n-1/2} + \ddot{D}^n \Delta t^n \quad (2.15)$$

$$D^{n+1} = D^n + \dot{D}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (2.16)$$

$$\Delta t^{n+1/2} = \frac{1}{2} (\Delta t^n + \Delta t^{n+1}) \quad (2.17)$$

denklemleri elde edilmektedir.

Yer değiştirme artışları başlangıçtaki geometriye eklenerek geometri güncellenmektedir. Merkezi farklar yönteminde kritik zaman adımı maksimum doğal frekans ve sönüm oranı ile belirlenmektedir [21].

$$\Delta t_{cr} \leq \frac{2}{w_{max}} (\sqrt{1-\zeta^2} - \zeta) \quad (2.18)$$

Sönümsüz bir sistemde kritik zaman adımı (2.19) eşitliğine dönüşmektedir.

$$\Delta t_{cr} \leq \frac{2}{w_{max}} = \frac{L}{C_d} \quad (2.19)$$

(2.19) eşitliğinde; L eleman uzunluğunu, C_d malzemedeki ses hızını ifade etmektedir.

Kritik zaman aşımı Δt_{cr} aşıldığında, sayısal işlem kararsız hale gelmektedir.

2.6 Patlama Çözüm Yöntemleri

Patlama yükleri altındaki yapıların davranışlarını simüle edebilmek için çeşitli nümerik yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan ilki olan CONWEP yöntemi, Lagrange tekniğini kullanmakta olup, patlama basıncı ampirik olarak hesaplanmaktadır [22]. Bu yöntemde basınç hedef yüzeydeki Lagrange tipi elemanlara direkt uygulanır. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yönteminde ise patlayıcı ve patlayıcının içerisinde hareket ettiği akışkan Euler tipi elemanlar kullanılarak modellenirken, hedef yüzey Lagrange elemanlardan oluşur. Patlayıcı hava içerisinde infilak ederek, patlama enerjisi, ilgili temas algoritmaları kullanılarak hava elemanları vasıtasıyla hedef yapıya taşınırlar.

2.6.1 ALE yöntemi

Akışkan ortam hareketinin tanımlanabilmesi için iki yaklaşım mevcuttur. Bunlardan ilki olan Lagrange metodunda hem düğüm noktaları hem de malzeme noktaları, yapı deforme olduğunda konum değiştirmektedir. Deformasyon sırasında malzeme noktalarının düğüm noktalarına göre konumu sabit kalmaktadır. Eulerian metodunda ise ağ yapısı bir kontrol hacmi oluşturmaktadır. Yapı deforme olduğunda ağ yapısından akmaktadır. Düğüm noktaları sabit kalmakta ve malzeme noktaları ağ boyunca hareket etmektedir. Düğüm noktalarına göre bir malzeme noktasının konumu harekete göre değişmektedir.

Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yöntemi patlayıcı ve patlayıcının içinde bulunduğu akışkan ortamın modellendiği bir çözüm yöntemidir. Akışkan ortam Euler elemanlarla modellenirken hedef yapılar Lagrange tipi elemanlar kullanılarak modellenmektedir.

Patlama sonrasında oluşan şok basıncı akışkan ortam tarafından iletilerek hedef yapıya ulaşmaktadır. Basıncın hedef yapıya bu aktarımı LS DYNA sonlu elemanlar yazılım içerisindeki temas algoritmaları ve hal denklemleri kullanılarak sağlanmaktadır. Jones-Wilkins-Lee JWL hal denklemi, kimyasal ürünlerle ilişkili basınç-hacim ilişkisini tanımlamak için kullanılan deneysel bir matematiksel ifadedir.

Belirli bir yüksek basınçlı, yüksek yoğunluklu durumdan normal basınç ve gaz yoğunluğunda bazı terminal durumuna genişledikçe şok dalgalarının durumunu hesaplamak için kullanılmaktadır. Basınç, hacim V ve enerji E'nin bir fonksiyonu olarak temsil edilir.

$$P=A \left[1 - \frac{W}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{W}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (2.20)$$

(2.20) nolu denklemde; P basıncı, $V=P/V_i$ patlayıcı malzemenin o anlık hacmini, V_i tepkimeye girmeyen patlayıcı malzeme hacmini, E özgül enerjisi ve A,B,R₁,R₂,w değişken katsayıları ifade etmektedir.

Çizelge 2.2: TNT'ye ait hal denklem parametreleri

Malzeme	Birim (cm, g, µs)						
TNT	*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN						
	RO	D	PCJ				
	1,63	0,693	0,21				
	*EOS_JWL						
	A	B	R₁	R₂	w	E₀	V₀
3,71	3,23E-02	4,15	0,95	0,3	0,07	1	

Hava, ρ yoğunluğuna ve iç enerjiye (E) bağlı olarak basıncın doğrusal bir polinom denklemi ile tarif edilen mükemmel bir gaz olarak düşünülmektedir. γ 1.4 ve başlangıçtaki iç enerji E₀ 253.3 kPa'ya eşittir, bu da 1 atmosfere eşit bir başlangıç basıncı verir [23].

$$P=(\gamma-1)\left(\frac{\rho}{\rho_0} E\right) \quad (2.21)$$

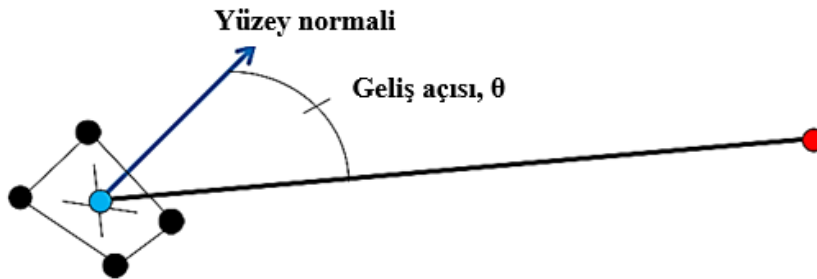
2.6.2 CONWEP yöntemi

Kingery ve Bulmash [24] tam ve yarı küre formundaki TNT patlayıcıları ile hava ve zemin ortamında bir dizi patlama testleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı patlayıcı kütleleri ve farklı mesafelerde gerçekleştirilen testler sonucunda patlama parametreleri elde etmişlerdir. Bu parametreler polinom denklemlerine çevrilerek ABD Ordu Mühendisleri Birliği tarafından CONWEP (Conventional Weapons) programı oluşturulmuştur. CONWEP yönteminde, ampirik olarak elde edilmiş basınç doğrudan hedef yapıya uygulanmaktadır.

$$P(t)=P_{so} \left[1 - \frac{t-T_a}{T_0} \right] \exp \left[\frac{-A^*(t-T_a)}{T_0} \right] \quad (2.22)$$

Bu denklemde; $P(t)$ t anındaki basıncı (kPa), P_{so} maksimum basıncı (kPa), T_0 basıncın pozitif olduğu süreyi (ms), T_a basıncın varış zamanını, A P_{so} 'a bağlı birimsiz dalga şekli sayısı olup, farklı patlamalar için farklı değerler alabilen katsayıyı temsil eder.

(2.22) eşitliğinde gösterilen Friedlander denklem parametreleri, Kingery ve Bulmash hesaplamalarından elde edilmektedir. Deney verilerinden maksimum basınç, impuls ve zaman değerleri kullanılarak A katsayısı bulunabilmektedir. Friedlander bağıntısı kullanılarak, farklı zaman dilimlerindeki patlama basınç değerleri çıkartılır. CONWEP yöntemindeki elde edilen bağıntılar ve eğriler, patlamaya maruz yapıların davranışlarını simulasyon ortamında görebilmek için Randers-Pehrson ve Bannister [22] tarafından LS-DYNA yazılımı içerisine *LOAD_BLAST kartı ile tanımlanmıştır.



Şekil 2.7: Patlama dalgasının geliş açısı

Patlama dalgasının yüzey normaliyle yaptığı açı geliş açısı olarak tanımlanıp Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

$$P(\tau)=P_r \cos^2\theta+P_s(1+\cos^2\theta-2\cos\theta) \quad (2.23)$$

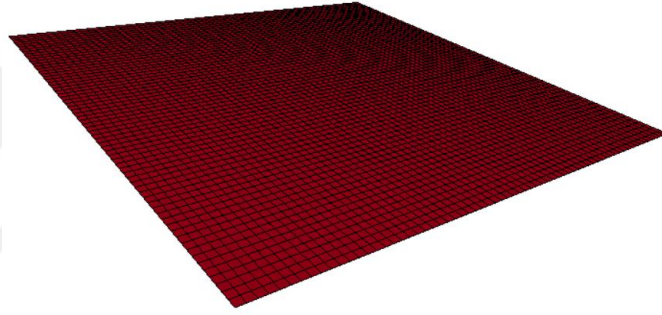
(2.23) nolu patlama fonksiyonu açık havada küresel patlamalar ve yüzeyde yarı küresel patlamalar için kullanılmaktadır. Basıncın hesaplanabilmesi için eşdeğer TNT kütlesi, patlama tipi, patlama konumu ve hedef yüzeyin tanımlanması gerekmektedir. Simülasyon sırasında, basınç vektörü yapısal deformasyondan bağımsız olarak her zaman kabuğun yüzeyine normal kalmaktadır. Bu, patlama dalgasının akışıyla çakışmaktadır ve deformasyonun büyük olması durumunda yanlışlıklara neden olabilmektedir[25] [26].



3. SAYISAL MODELİN OLUŞTURULMASI VE DOĞRULANMASI

3.1 Modelleme ve Sınır Şartları

1000 mm x1000 mm x 16 mm boyutlarındaki plaka çepeçevre ankastre tutularak çeşitli kütle ve mesafelerde CONWEP analizleri gerçekleştirilmiştir. Plaka 15 mm eleman boyutu ile Belytschko-Tsay eleman formülasyonu ve 5 integrasyon noktalı kabuk eleman kullanılarak modellenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Plakanın kabuk eleman modeli

Malzemelerin yüksek hızlardaki davranışları bilinen plastisite teorisinden farklılaşmaktadır. Orta ve yüksek gerinim hızlarındaki ($100 \text{ s}^{-1} - 1500 \text{ s}^{-1}$) malzeme davranışının nümerik benzetimini sağlayabilmek için Johnson-Cook malzeme modelleri kullanılmaktadır [27].

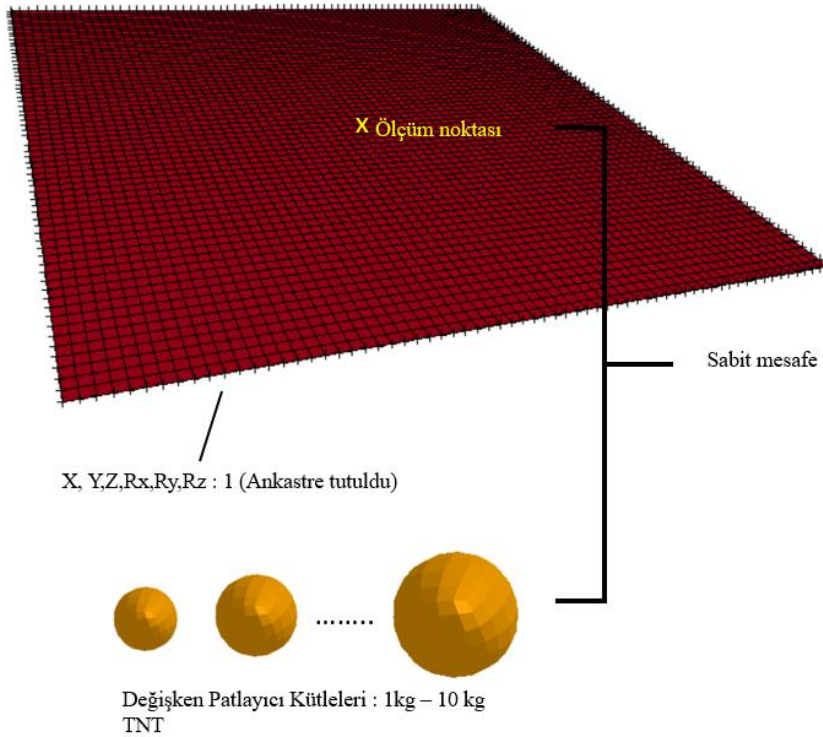
$$\sigma_{eg} = [A + B(\epsilon_e^{pl})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_e^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \left(1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (3.1)$$

(3.1) eşitliğinde; ϵ_e^{pl} eş değer plastic gerinimi, $\dot{\epsilon}_e^{pl}$ plastic gerinim hızını, $\dot{\epsilon}_0$ referans gerinim hızını, T_r oda sıcaklığını, T_m ise erime sıcaklığını ifade etmektedir. Bu çalışmada plaka, patlama yüküne maruz kalacağı için malzeme olarak AISI 1006

Johnson Cook modeli kullanılmıştır. LS-DYNA'da, CONWEP patlama karakteristikleri hedef yapı üzerine ampirik basınç bağıntıları ile doğrudan uygulanır, böylece her düğümde patlama kaynağından uzaklığına göre doğru patlama basıncı elde edilmektedir. Yöntemin kullanımı kolaydır, çok az hesaplama süresi gereklidir ve küçük deformasyonlar veren patlamalara bakıldığında sonuçlar çok iyi olabilmektedir. Pek çok farklı durum için sonuçlar elde edilmek istendiğinden hızlı çözüm yöntemi olarak CONWEP çözüm yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiştir.

3.2 TNT Kütlesi Deplasman İlişkisi

TNT kütlesine bağlı plakanın merkez deplasman ilişkine yönelik bir bağıntı elde edebilmek için 1 kg – 10 kg TNT aralığındaki patlayıcılar 500 mm sabit patlama mesafesinde patlatılmıştır. Plaka çepeçevre ankastre tutularak merkez noktasından ölçüm alınmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Analiz modeli

Patlama olayını simüle edebilmek için LS DYNA sonlu elemanlar yazılımı içerisinde bulunan *LOAD BLAST ENHANCED kartı aktifleştirilmiştir. Kart içerisinde TNT

kütlesi, mayın konumu, hedef yüzey tanımlanmış ve patlama tipi olarak açık havada küresel patlama seçilmiştir (Şekil 3.3).

***LOAD_BLAST_ENHANCED (1)**

BID	M	XBO	YBO	ZBO	TBO	UNIT	BLAST
1	1.000e+004	0.0	0.0	-50.000000	0.0	4	2
CFM	CFL	CFT	CFP	NIDBO	DEATH		
0.0	0.0	0.0	0.0	0	1.000e+020		

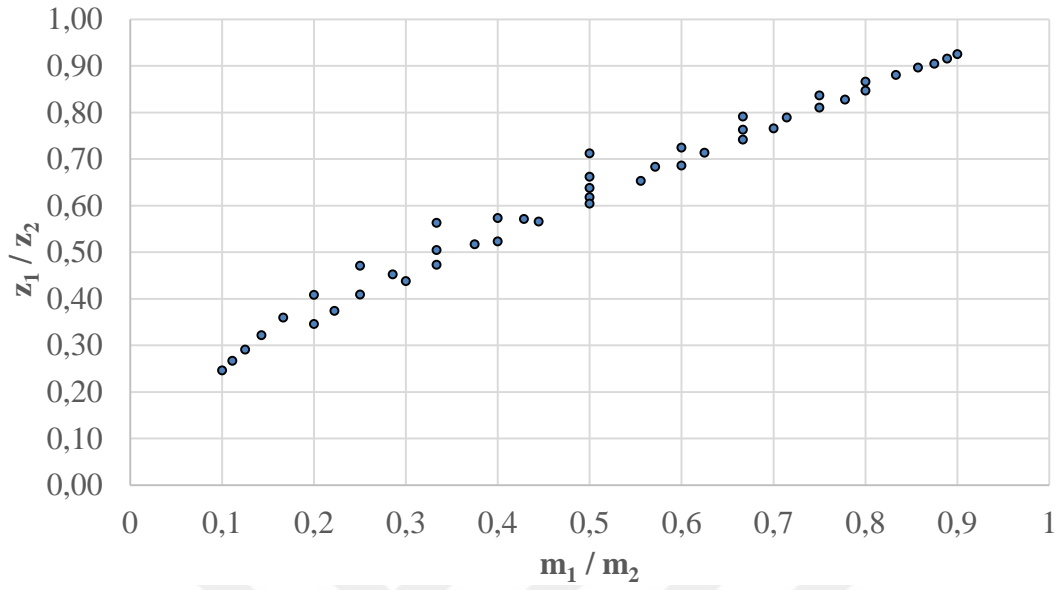
Şekil 3.3: LOAD_BLAST_ENHANCED kart parametreleri

Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi patlama mesafesi 500 mm’de sabit tutularak bir analiz matrisi oluşturulmuştur. Matris içindeki m_1 , 1 kg TNT’yi; m_{10} ise 10 kg TNT’yi temsil ederken z_1 , 1kg TNT’nin; z_{10} , 10 kg TNT’nin oluşturduğu maksimum deplasmanı temsil etmektedir. Bu şekilde elde edilen değerler ile farklı kütlelerin oranı ve sebep oldukları deplasman oranları çıkarılmıştır.

Çizelge 3.1: Analiz matrisi

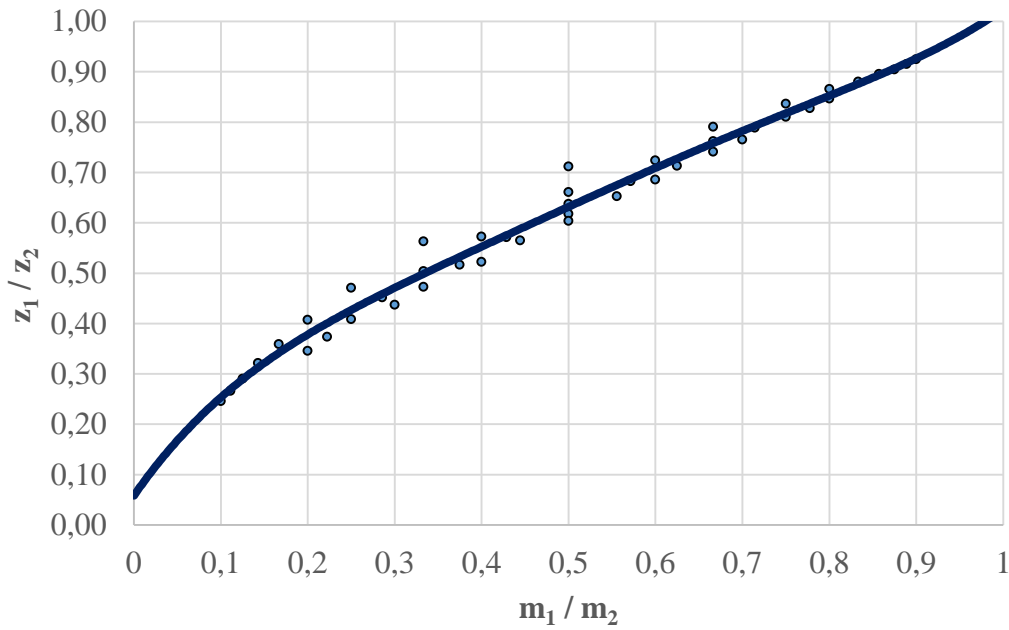
Mayın merkezinden uzaklık : 500 mm								
m_1/m_2								
m_1/m_3	m_2/m_3							
.	m_2/m_4	m_3/m_4						
.	m_2/m_5	m_3/m_5	m_4/m_5					
.	.	.	m_4/m_6	m_5/m_6				
.	.	.	.	m_5/m_7	m_6/m_7			
.	.	.	.	.	m_6/m_8	m_7/m_8		
.	.	.	.	.	.	m_7/m_9	m_8/m_9	
m_1/m_{10}	m_2/m_{10}	m_3/m_{10}	m_4/m_{10}	m_5/m_{10}	m_6/m_{10}	m_7/m_{10}	m_8/m_{10}	m_9/m_{10}
z_1/z_2								
z_1/z_3	z_2/z_3							
.	z_2/z_4	z_3/z_4						
.	z_2/z_5	z_3/z_5	z_4/z_5					
.	.	.	z_4/z_6	z_5/z_6				
.	.	.	.	z_5/z_7	z_6/z_7			
.	.	.	.	.	z_6/z_8	z_7/z_8		
.	.	.	.	.	.	z_7/z_9	z_8/z_9	
z_1/z_{10}	z_2/z_{10}	z_3/z_{10}	z_4/z_{10}	z_5/z_{10}	z_6/z_{10}	z_7/z_{10}	z_8/z_{10}	z_9/z_{10}

Oluşturulan matris değerleri kütle oranları x ekseninde, deplasman oranları y ekseninde olacak şekilde Şekil 3.4'te gösterilen grafik üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 3.4: Analiz sonucu verileri

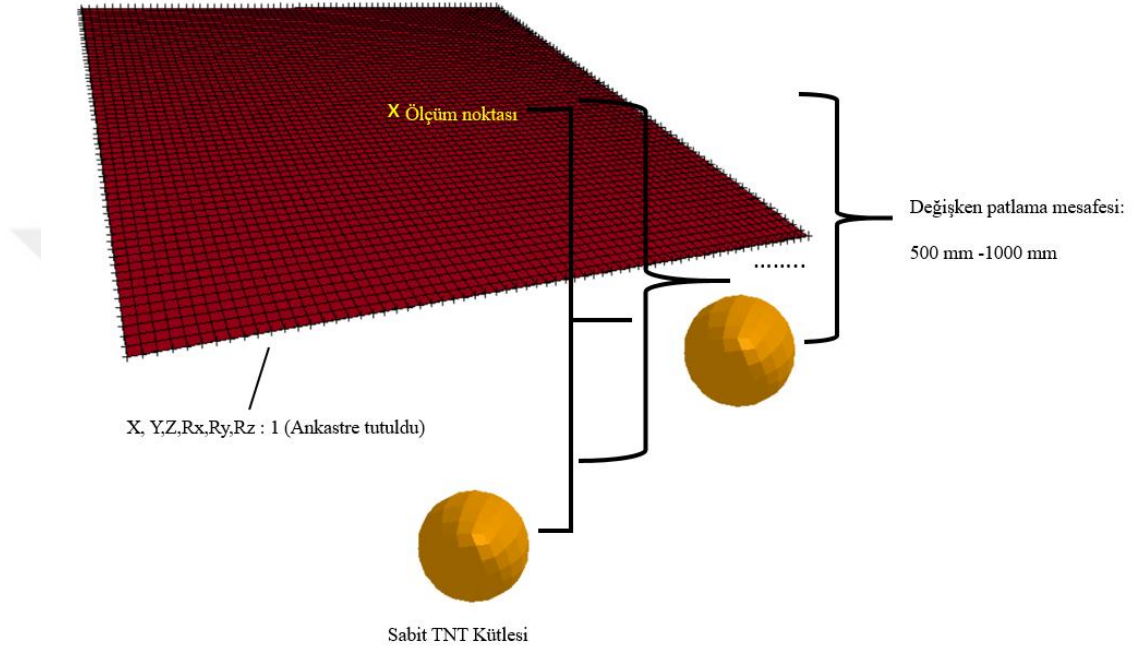
Eğri uydurma yöntemiyle bu noktalardan geçen bir eğri ile polinom denklemi oluşturulmuştur (Şekil 3.5). Elde edilen bu denklem ile aynı mesafede iki farklı kütlede patlatılan TNT patlayıcılarının plakada oluşturacağı deplasman oranları tahmin edilebilmektedir.



Şekil 3.5: Kütle oranlarına bağlı deplasman oranı grafiği

3.3 Patlama Mesafesi ve Deplasman İlişkisi

Çalışmanın bu bölümünde patlayıcı kütleleri sabit tutulmak üzere her bir patlayıcı kütlesi için patlama mesafesi değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). 1 kg ve 10 kg aralığındaki her bir patlayıcı için sırasıyla 500 mm-800 mm patlama mesafeleri arasındaki deplasman sonuçları elde edilmiştir.



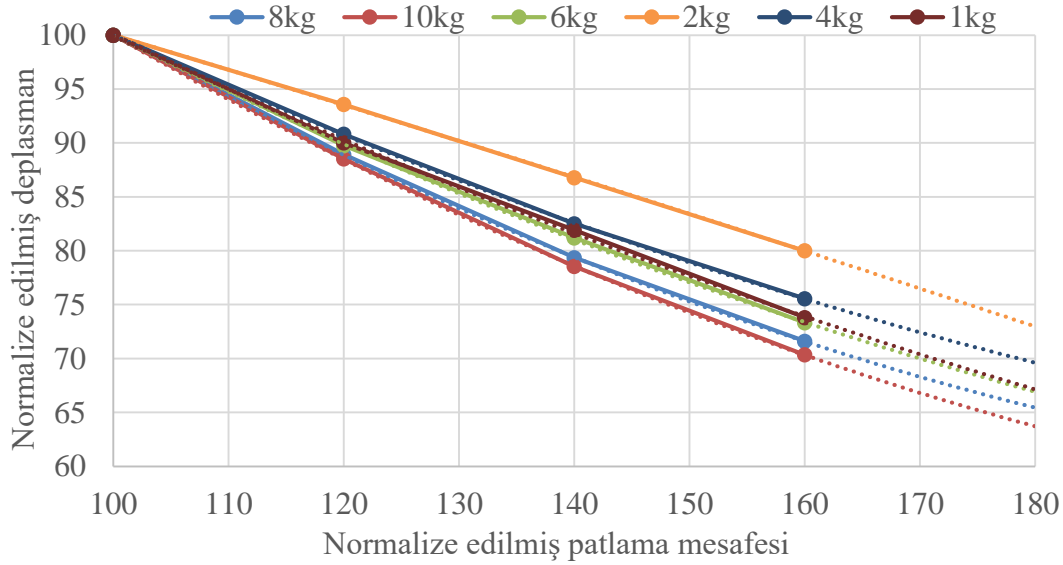
Şekil 3.6: Analiz modeli

Çizelge 3.2’de oluşturulan matrise göre her bir patlayıcının mesafeye göre değişen deplasmanları elde edilmiştir. 500 mm mesafe ve bu mesafe oluşan deplasman değerleri (z_{11} , z_{21} , z_{41} , z_{61} , z_{81} , z_{101}) 100 olacak şekilde normalize edilmiştir. Matris çizelgesinde z_{11} , 1 kg patlayıcının 500 mm mesafedeki deplasmanını, z_{104} ise 10 kg patlayıcının 800 mm mesafedeki deplasmanını ifade etmektedir.

Çizelge 3.2: Analiz matrisi

	Patlayıcı merkezinden uzaklık [mm]			
M [kg]	500	600	700	800
1	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}
2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Z_{24}
4	Z_{41}	Z_{42}	Z_{43}	Z_{44}
6	Z_{61}	Z_{62}	Z_{63}	Z_{64}
8	Z_{81}	Z_{82}	Z_{83}	Z_{84}
10	Z_{101}	Z_{102}	Z_{103}	Z_{104}

Normalize edilen patlama mesafelerine bağlı deplasman trendi her bir patlayıcı kütlesi için Şekil 3.7'deki grafikte gösterilmiştir. Patlayıcı merkezine olan mesafe arttıkça patlama dalgasının yapı üzerindeki etkisi azalarak plakanın merkez deplasmanının düşmesine neden olmaktadır. Patlayıcı kütlelerine göre bakıldığında deplasmanın düşüş trendi benzer şekilde ilerlemektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Patlama mesafesine bağlı deplasman düşüşü

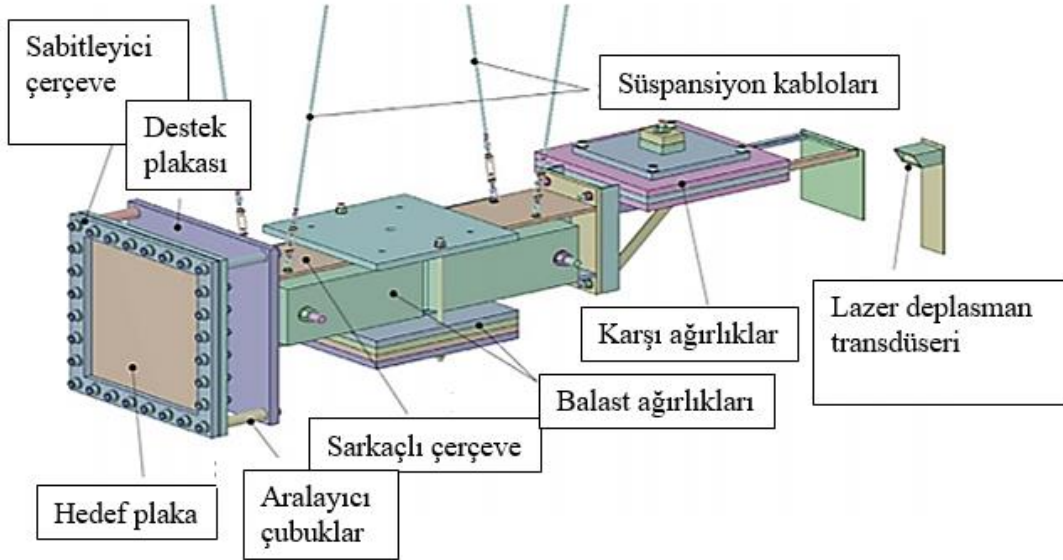
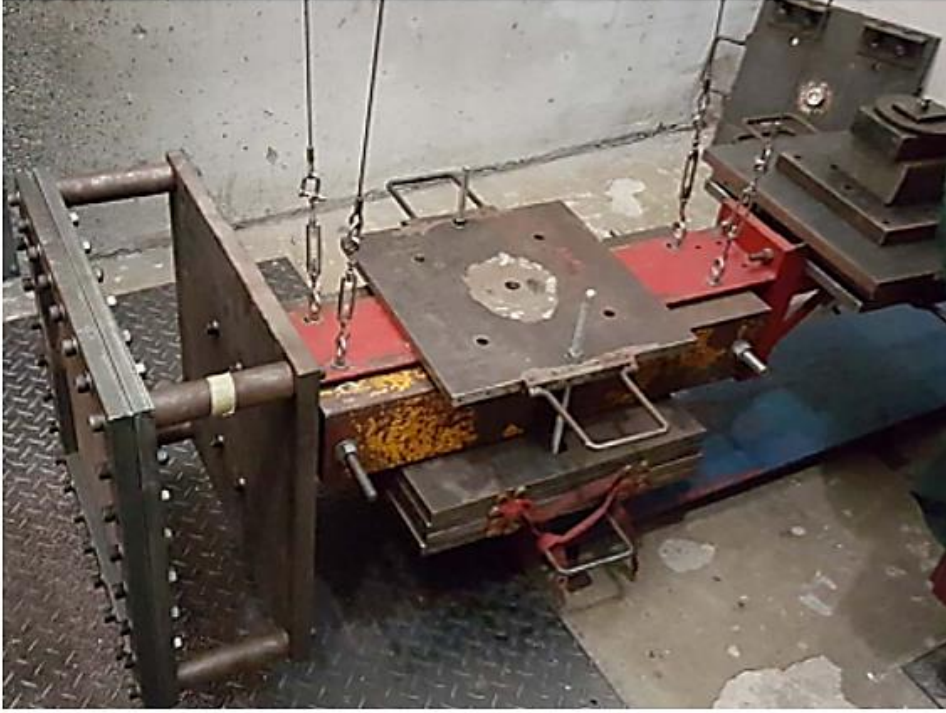
1 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg ve 10 kg TNT kütleleri için bakıldığında patlama mesafesinin her % 20 artışında titreşim genliği bir öncekine göre ortalama %10 kadar düşerken; 2 kg TNT kütlelerinde her %20 artışta ortalama %7 oranında düşmektedir. Genel olarak bakıldığında aynı kütledeki patlayıcılarla gerçekleştirilen patlamalarda patlama mesafesi %20 arttıkça plakanın merkez deplasmanı bir öncekine göre %7 - %10 arasında düşmektedir.

3.4 Sayısal Modelin Doğrulanması

Gerçekleştirilen CONWEP analizleri sonucunda TNT kütlesi ve patlama mesafesine bağlı trend grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen bu grafiklerin doğruluğunu kontrol edebilmek amacıyla literatürde plaka ile yapılmış test dataları incelenmiş ve referans alınmıştır.

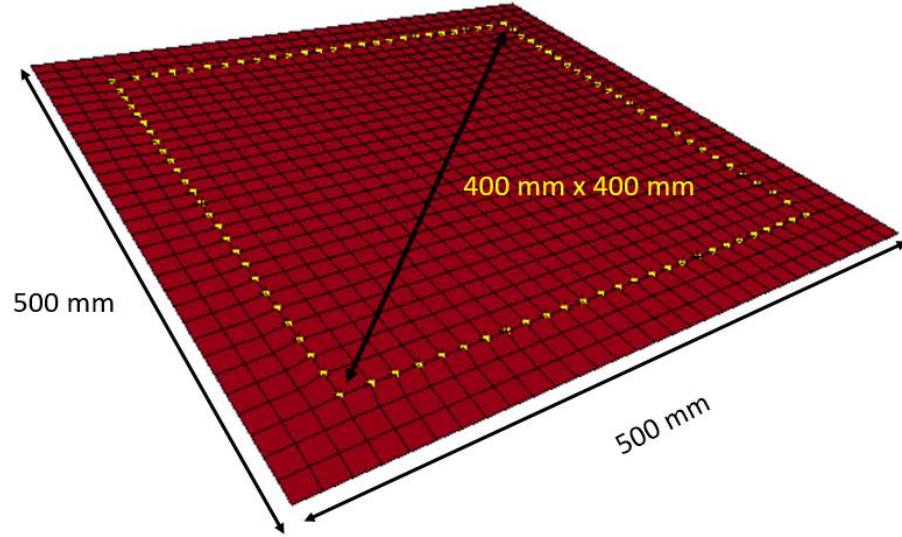
B. McDonald ve diğ. [28] plaka testleri için Şekil 3.8’de gösterilen deney düzeneğini kullanmışlardır. Hedef plakalar, kenar uzunluğu 500 mm olan kare olup, 400 mm x 400’lik alan patlamaya maruz bırakılacak şekilde cıvatalarla sınırlandırılmıştır. Kelepçeli hedef plakası bir patlama sarkaçına tutturulmuştur ve kütlesi, düzeneğin arkasına cıvatalanmış bir dizi ağırlık ile dengelenmiştir. Sarkaçın uygulanan yüklem nedeniyle yer değiştirmesi, bir lazer yer değiştirme dönüştürücüsü ile ölçülmüş ve uygulanan darbenin hesaplanmasında kullanılmıştır. Salınımın genliğini, lazer yer değiştirme dönüştürücüsünün çalışma mesafesi dahilinde sınırlamak için, balast kütlesi (340 kg) sarkaça sabitlenmiştir.

Polistiren köprüler, yükleme ve hedef plaka arasında bir durma mesafesi vermek için kullanılmıştır. Kırılma eşiği, kullanılan patlayıcı kütlesini değiştirerek 13 mm ve 25 mm’lik bir patlama mesafesi için değerlendirilmiştir. Bu testlerde, patlayıcının çapı 50 mm’de sabit tutulmuş ve patlayıcı kütlesi, patlayıcı yüksekliği arttırılarak değiştirilmiştir. Deformasyona direnci karşılaştırmak için yırtılmış panellerin tümü için hedef deformasyon ölçümleri kaydedilmiştir [28]



Şekil 3.8: Deney düzeneği [28]

[28] ile referans gösterilen makaledeki test sınır koşulları analiz modeli için oluşturulmuştur. Plaka malzemesi RHA zırh çeliği olarak tanımlanmıştır. Plaka boyutu 500 mm x 500 mm x 4 mm olarak modellenmiştir. Plakanın 400 mm x 400 mm alanı makalede tariflendiği üzere ankastre olarak sınırlandırılmıştır (Şekil 3.9). Makalede



Şekil 3.9: Testle uyumlu analiz modeli

PE4 patlayıcının, *LOAD_BLAST_ENHANCED kartında TNT eş değeri tanımlanarak, 25 mm patlama mesafesindeki analizleri gerçekleştirilmiştir. 40 gr PE4 patlayıcı için tanımlanan parametreler Şekil 3.10’da gösterilmiştir.

***LOAD_BLAST_ENHANCED (1)**

BID	M	XBO	YBO	ZBO	TBO	UNIT	BLAST
1	29.850000	0.0	0.0	-2.5000000	0.0	4	2
CFM	CFL	CFT	CFP	NIDBO	DEATH		
0.0	0.0	0.0	0.0	0	1.000e+020		

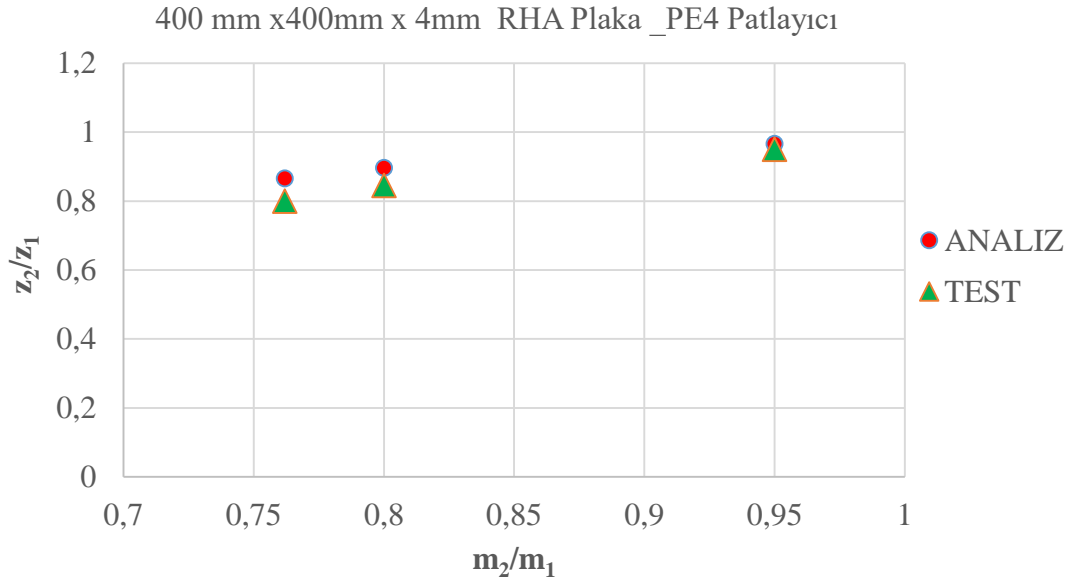
Şekil 3.10: Kart parametreleri (40 gr PE4)

Makaledeki plaka modeli ile birebir hale getirilen analiz modeline ilişkin sonuçlar için Çizelge 3.3’ten elde edilen test sonuçlarından işaretli alandaki veriler kullanılmıştır. 40, 50 ve 52.5 gr PE4 patlayıcı kütlelerinin 25 mm patlama mesafesindeki deplasman değerleri referans alınmıştır.

Çizelge 3.3: RHA plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [28]

Test No	Malzeme	Patlama mesafesi [mm]	Patlayıcı Çapı [mm]	Patlayıcı Kütle [gr]	Darbe [Ns]	Kalıcı Deplasman [mm]
15	RHA	13	50	37,5	64,5	29,7
16	RHA	13	50	37,5	71,4	30,2
17	RHA	13	50	40	73	Yırtıldı
18	RHA	13	50	40	75,8	Yırtıldı (33,4)
19	RHA	25	50	40	61	24,7
20	RHA	25	50	50	81,5	29,2
21	RHA	25	50	50	86,2	Yırtıldı
22	RHA	25	50	52,5	85,8	Yırtıldı
23	RHA	25	50	52,5	93,1	30,7
24	RHA	25	50	52,5	102,1	32,1
25	RHA	25	50	55	88,8	Yırtıldı
26	RHA	25	50	55	97,7	31,2
27	RHA	25	50	55	98,4	Yırtıldı
28	RHA	25	50	60	96,5	Yırtıldı
29	RHA	25	50	70	114	Yırtıldı

19, 20 ve 23 nolu test verileri analiz sonuçlarından elde edilen grafik üzerinde işaretlendiğinde elde edilen trendin test sonuçlarıyla uyumlu çıktığı görülmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: RHA plaka ile yapılan analiz ve literatür test sonuçları

Aynı makalede farklı malzeme türleri ile de testler gerçekleştirilmiştir. ARS ve HHA zırh sacıyla aynı mesafelerde farklı kütledeki patlayıcılarla yapılan deplasman

sonuçları Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te gösterilmiştir. İlgilenilen test numaraları işaretlenip bu değerler Şekil 4.4'de elde edilen trend eğri üzerinde işaretlenmiştir.

Çizelge 3.4: ARS plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [28]

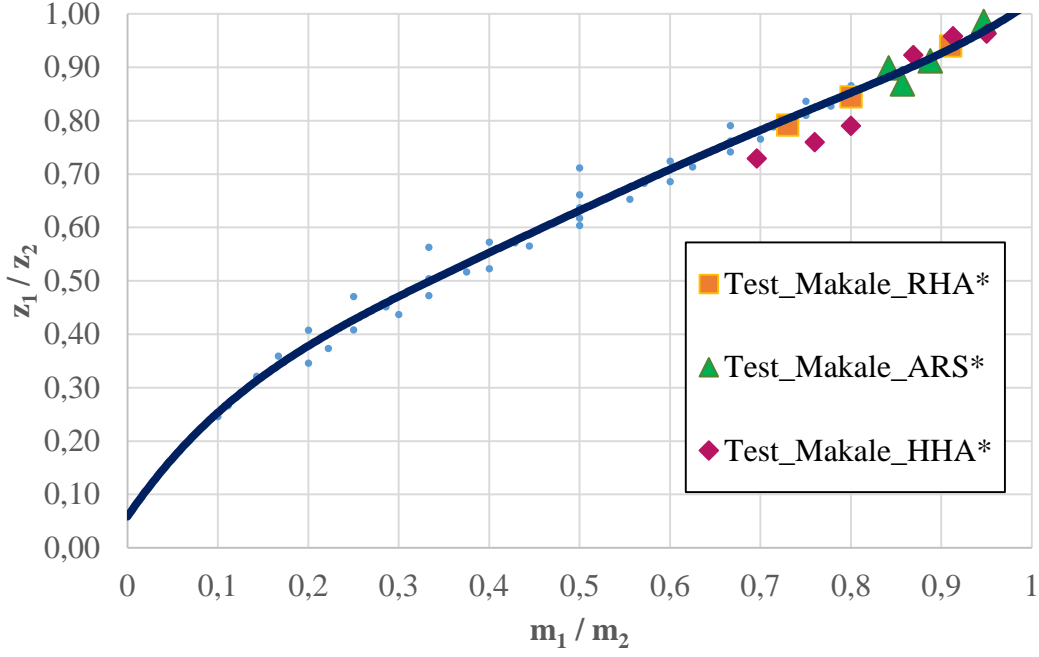
Test No	Malzeme	Patlama mesafesi [mm]	Patlayıcı Çapı [mm]	Patlayıcı Kütlesi [gr]	Darbe [Ns]	Kahçı Deplasman [mm]
1	ARS	13	50	40	71,5	31,2
2	ARS	13	50	45	80,2	34,2
3	ARS	13	50	47,5	85,5	33,7
4	ARS	13	50	47,5	86,8	34,7
5	ARS	13	50	50	86,9	Yırtıldı
6	ARS	13	50	50	90,7	Yırtıldı
7	ARS	25	50	40	71,2	28,7
8	ARS	25	50	60	106,5	32,4
9	ARS	25	50	70	109,8	37,7
10	ARS	25	50	70	117,2	36,9
11	ARS	25	50	72,5	121,7	Yırtıldı
12	ARS	25	50	72,5	122	Yırtıldı
13	ARS	25	50	75	127,2	Yırtıldı
14	ARS	25	50	75	127,9	Yırtıldı

ARS plaka malzemesiyle gerçekleştirilen testte 13 mm sabit patlama mesafesinde 40, 45 ve 47.5 gr patlayıcı kütlesine ait deplasman sonuçları referans alınmıştır.

Çizelge 3.5: HHA plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [28]

Test No	Malzeme	Patlama mesafesi [mm]	Patlayıcı Çapı [mm]	Patlayıcı Kütlesi [gr]	Darbe [Ns]	Kahçı Deplasman [mm]
46	HHA	13	50	30	61,2	23,1
47	HHA	13	50	35	62,8	24,2
48	HHA	13	50	37,5	66,1	26,2
49	HHA	13	50	40	69,6	28,2
50	HHA	13	50	40	72,7	Yırtıldı
51	HHA	13	50	40	78,5	Yırtıldı
52	HHA	25	50	40	72,3	20,7
53	HHA	25	50	50	94,7	26,2
54	HHA	25	50	52,5	90,5	27,2
55	HHA	25	50	57,5	86,4	28,3
56	HHA	25	50	57,5	92,7	28,5
57	HHA	25	50	60	96,8	Yırtıldı
58	HHA	25	50	60	99,8	30,2
59	HHA	25	50	60	107,9	Yırtıldı
60	HHA	25	50	70	110,5	29,2

HHA plaka malzemesiyle gerçekleştirilen testte 25 mm sabit patlama mesafesinde 40, 50 ve 52.5 ve 57.5 gr patlayıcı kütlesine ait deplasman sonuçları referans alınmıştır.

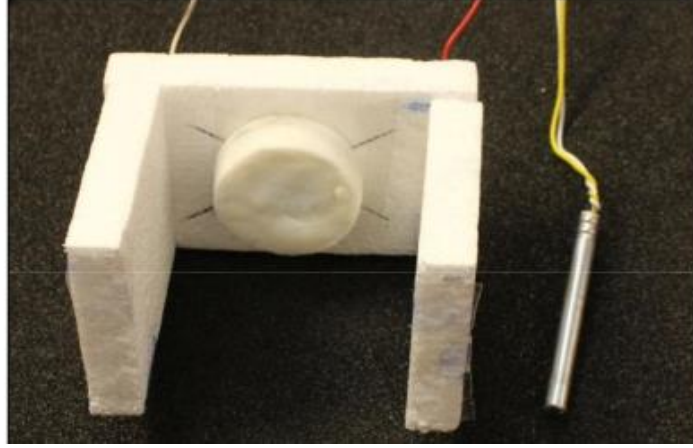


Şekil 3.12: Elde edilen eğrinin literatür testleri ile doğrulanması

Elde edilen trend eğri, 1000 mm x1000 mm x16 mm plaka boyutu ve TNT patlayıcı ile 500 mm patlama mesafesinde oluşturulmuştur. Literatürdeki farklı boyut plaka, malzeme ve farklı patlayıcıyla gerçekleştirilen test sonuçları bu eğri üzerinde işaretlendiğinde elde edilen trend eğrinin test sonuçlarıyla uyumlu çıktığı görülmektedir (Şekil 3.12). Dolayısıyla plaka geometrisi, patlayıcı türü ve miktarından bağımsız olarak aynı şartlarda farklı kütledeki patlayıcılarla tekrarlanan durumlar için bu eğrinin geçerli olduğu görülmüştür.

Şekil 3.7'de elde edilen diğer bağıntı ise patlama mesafesine bağlı deplasman düşüşüne yönelik öngörü niteliği taşımaktadır. Bu trendin doğruluğunu kanıtlayabilmek için literatürde aynı kütle ile farklı mesafelerde gerçekleştirilen plaka testlerine yönelik sonuçlar incelenmiş ve analiz sonucunda elde edilen Şekil 3.7'deki eğri ile uyumluluğuna bakılmıştır.

[29] ile referans gösterilen çalışmada hava patlama yüklemesi, levhaların merkezinde silindirik PE4 plastik diskleri patlatılarak oluşturulmuştur. Patlayıcı kütlesi, patlayıcının yüksekliğinin ve diskin çapının değiştirilmesiyle değişmiştir. PE4 diskleri gibi bir polistiren köprü düzenlemesi kullanılarak yerleştirilmiştir. Patlama mesafeleri köprü ayaklarının uzunlukları değiştirilerek ayarlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13: Patlayıcı disk modeli

Plakaya etkiyen darbe kuvvetinin belirlenmesi ve görüntü alabilmek amacıyla eklenecek iki yüksek hızlı kameranın desteklenmesi için sarkaç sistemine paneller montelenmiştir (Şekil 3.14). Test plakası, çevresi boyunca cıvatalarla sabitlenmiş ve arka yüzey, Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) prosedüründe kullanılan benek deseniyle boyanmıştır [29].



Şekil 3.14: Sarkaç düzeneğin iç görüntüsü

Şekil 4.7’de deney düzeneği hazırlanan çalışmada Armox 370 T zırh sacı ile gerçekleştirilen test sonuçları Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6: AX370T plaka ile gerçekleştirilen test sonuçları [29]

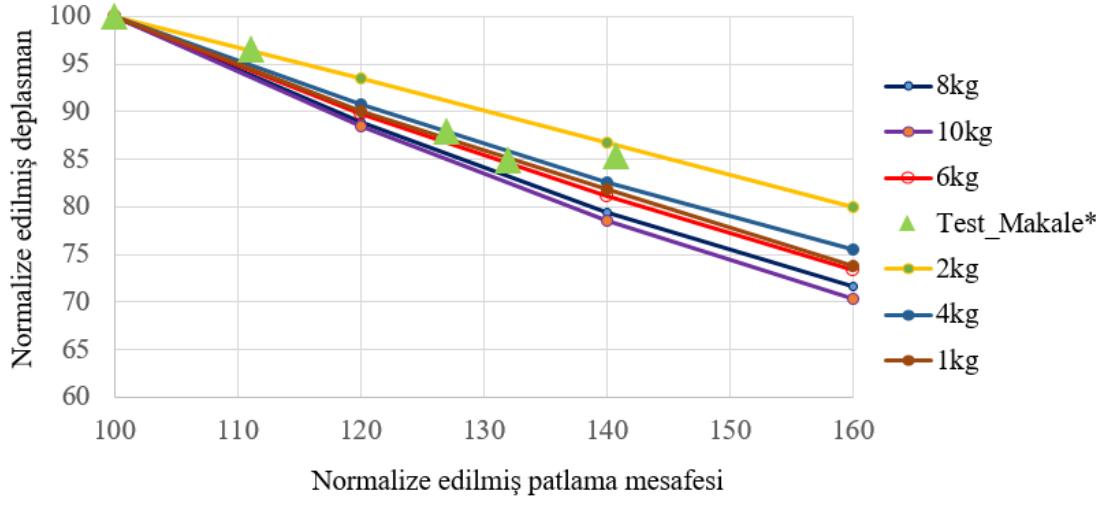
Test Plakası	d[mm]	Patlayıcı Kütlesi[gr]	Deplasman [mm] (Sonlu Elemanlar)	Deplasman [mm] (Test)	Tahmin Edilen Hata Modu
AX370T	25	40	29,8	42,93	II (test)
	25		-	47,12	II
	27	60	33,73	45,2	II
	30		31,82	43,65	II
	38		26,21	38,58	I
	50		20,33	32,9	I
AX440T	25	60	40,21	28,91	II (test)
	27	60	38,8	27,59	I
	30	60	37,84	27,78	I
	38	60	33,9	23,27	I
	50	60	28,79	17,46	I

60 gr patlayıcı ile 27 mm-50 mm aralığındaki patlama mesafelerinde oluşan deplasman sonuçları, 27 mm mesafe ve bu mesafedeki deplasman 100 olacak şekilde normalize edilmiştir (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7: Normalize edilen test değerleri

Test_Mesafesi [mm]	Normalize Mesafe	Test Deplasmanı [mm]	Normalize deplasman
27	100,0	45,2	100,0
30	111,1	43,65	96,6
38	140,7	38,58	85,4
50	185,2	32,9	72,8

Normalize edilen test sonuçları Şekil 3.15'te elde edilen grafik üzerinde işaretlenmiş ve elde edilen eğrilerin test sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.15: Analiz trend eğrilerinin literatür test sonuçlarıyla karşılaştırılması

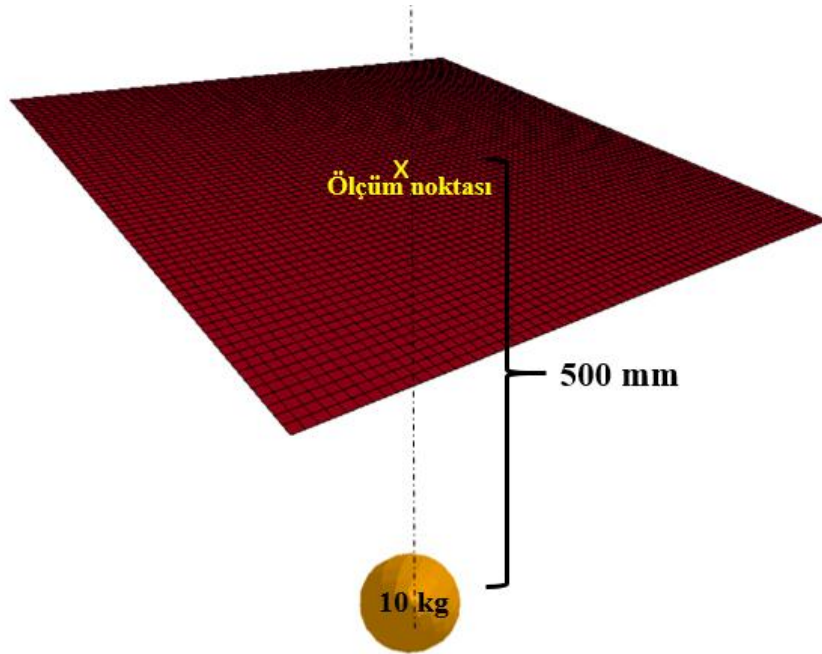




4. PARAMETRİK ANALİZLER VE TASARIM GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

Tez çalışmasının ikinci aşaması olarak nitelendirilen bu bölümde değişik formdaki takviye plakalarının patlama yükü altındaki sönüm etkileri incelenmiştir.

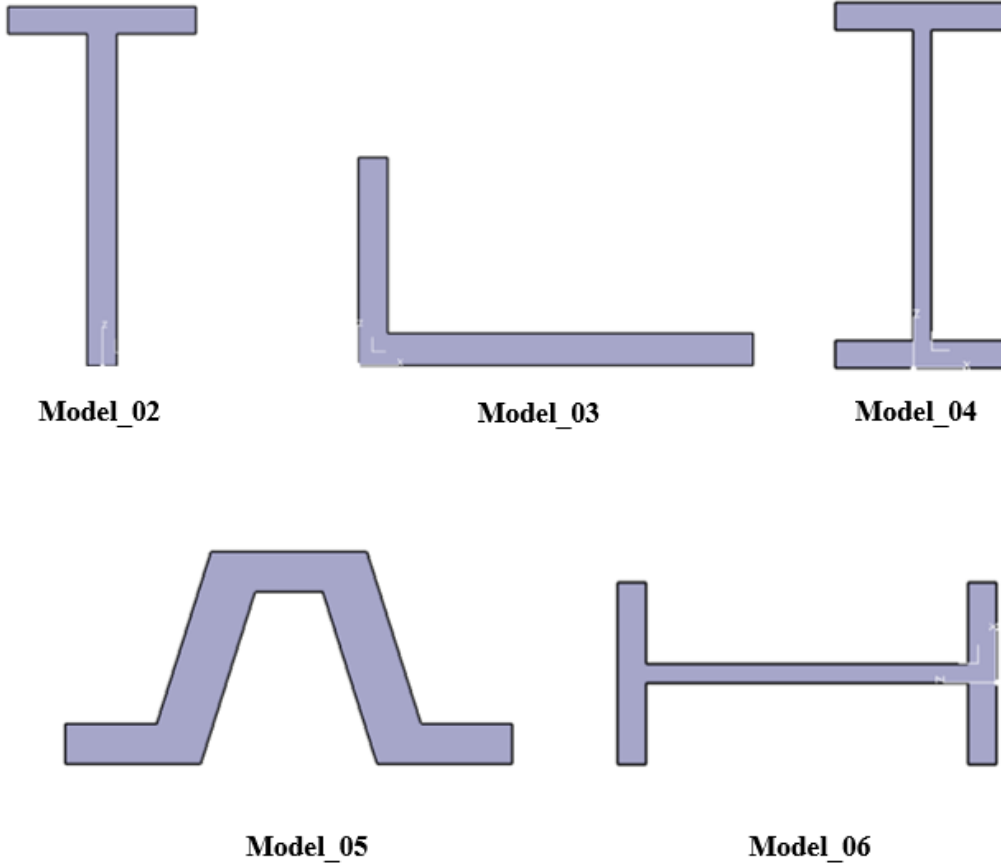
Şekil 4.1’de gösterilen plaka modeli temel alınarak Model_01 olarak adlandırılmış, üzerine değişik formda takviyeler yerleştirilerek sonuçları değerlendirilmiştir. Plaka malzemesi olarak AISI 1006 JC malzeme modeli kullanılmıştır. 10 kg TNT küresel patlayıcı, merkezinden 500 mm mesafede konumlandırılarak plaka merkezinden ölçüm alınmıştır. Üzerine takviyelerin yerleştirileceği model plaka boyutları 1000 mm x 1000 mm uzunluğunda ve 16 mm kalınlığındadır. Model kabuk elemanlar ve 15 mm eleman boyutu ile modellenmiştir. Model plaka ağırlığı 126 kg olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1: Model_01 ve sınır şartları

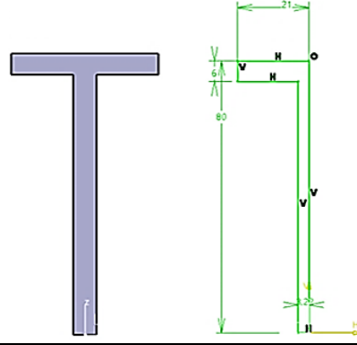
4.1 Uygun Geometrik Formun Belirlenmesi

Takviyelerin ağırlığı aynı tutulacak şekilde her bir form için geometrik boyutlar seçilmiştir. Takviyeli plakanın toplam ağırlığı 132 kg civarında tutulmuştur. Böylece aynı ağırlıktaki farklı geometrik takviyelerin deplasman üzerindeki etkisi incelenecektir.



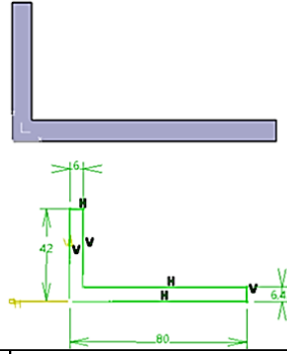
Şekil 4.2: Farklı formdaki takviye modelleri

Takviyelerin geometrik ölçüleri ve ağırlık bilgileri Şekil 4.3-Şekil 4.7 aralığında belirtilmiştir. Farklı geometrik formdaki takviyelerin ağırlığı yaklaşık 6 kg olacak şekilde boyutları ayarlanmıştır.



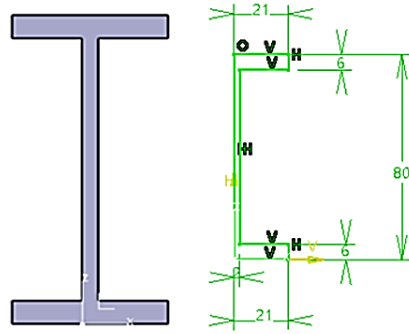
Hacim	7,29E-04 m ³	
Alan	0,245 m ²	
Kütle	5,726 kg	
Yoğunluk	7860 kg/m ³	
Ağırlık Merkezi		
Gx	Gy	Gz
0 mm	500 mm	50,836 mm
Atalet Momenti		
IoxG	IoyG	IozG
0,481 kg x m ²	0,004 kg x m ²	0,478 kg x m ²
IxyG	IxzG	IyzG
0 kg x m ²	9,212e-4 kg x m ²	2,776e-17 kg x m ²

Şekil 4.3: Model_02'ye ait geometrik özellikler



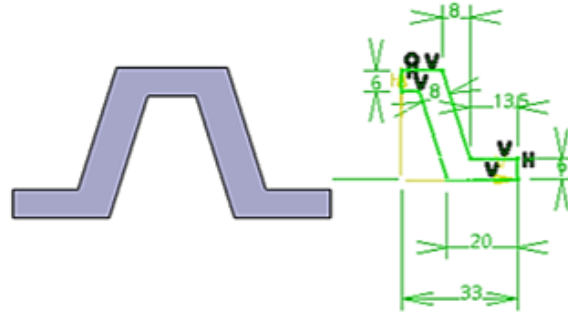
Hacim	7,28E-04 m ³	
Alan	0,245 m ²	
Kütle	5,721 kg	
Yoğunluk	7860 kg/m ³	
Ağırlık Merkezi		
Gx	Gy	Gz
29,15 mm	500 mm	9,373 mm
Atalet Momenti		
IoxG	IoyG	IozG
0,477 kg x m ²	0,004 kg x m ²	0,481 kg x m ²
IxyG	IxzG	IyzG
0 kg x m ²	9,212e-4 kg x m ²	0 kg x m ²

Şekil 4.4: Model_03'e ait geometrik özellikler



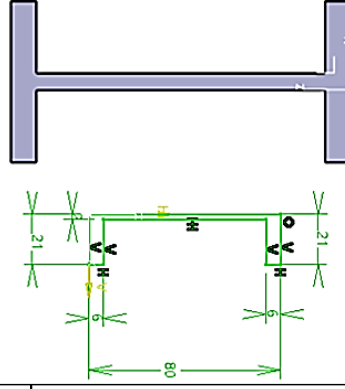
Hacim	7,28E-04 m ³	
Alan	0,305 m ²	
Kütle	5,722 kg	
Yoğunluk	7860 kg/m ³	
Ağırlık Merkezi		
Gx	Gy	Gz
2 mm	500 mm	40 mm
Atalet Momenti		
IoxG	IoyG	IozG
0,483 kg x m ²	0,006 kg x m ²	0,477 kg x m ²
IxyG	IxzG	IyzG
0 kg x m ²	9,212e-4 kg x m ²	0 kg x m ²

Şekil 4.5: Model_04'e ait geometrik özellikler



Hacim	7,27E-04 m ³	
Alan	0,22 m ²	
Kütle	5,713 kg	
Yoğunluk	7860 kg/m ³	
Ağırlık Merkezi		
Gx	Gy	Gz
0 mm	500 mm	13,94 mm
Atalet Momenti		
IoxG	IoyG	IozG
0,477 kg x m ²	0,002 kg x m ²	0,478 kg x m ²
IxyG	IxzG	IyzG
0,002 kg x m ²	0,477 kg x m ²	0,478 kg x m ²

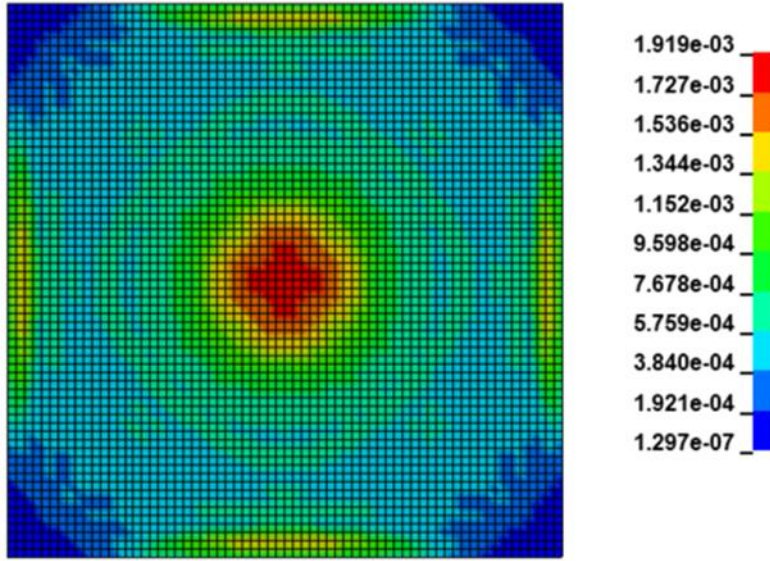
Şekil 4.6: Model_05'e ait geometrik özellikler



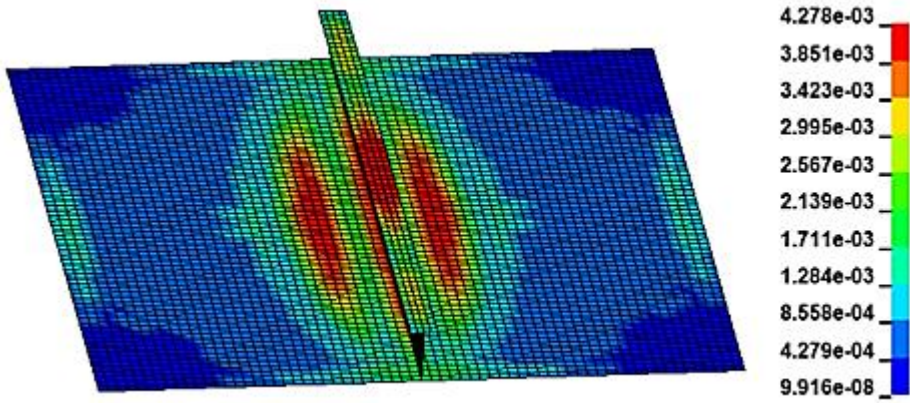
Hacim	7,28E-04 m ³	
Alan	0,305 m ²	
Kütle	5,722 kg	
Yoğunluk	7860 kg/m ³	
Ağırlık Merkezi		
Gx	Gy	Gz
2 mm	500 mm	40 mm
Atalet Momenti		
I _{oxG}	I _{oyG}	I _{ozG}
0,483 kg x m ²	0,006 kg x m ²	0,477 kg x m ²
I _{xyG}	I _{xzG}	I _{yzG}
0 kg x m ²	0 kg x m ²	0 kg x m ²

Şekil 4.7: Model_06'ya ait geometrik özellikler

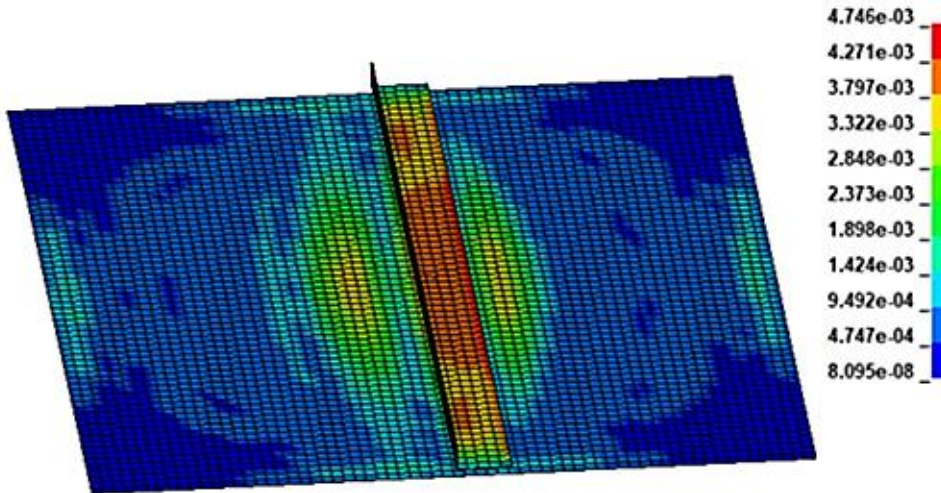
Şekil 4.2'de gösterilen takviyeler Şekil 5.1'de gösterilen Model_01 üzerine kopmaz kaynaklar tanımlanarak bağlantısı sağlanmıştır. Her bir model 10 kg TNT ile 500 mm patlama mesafesinde küresel patlama tipi ile analiz edilmiştir. Patlama basıncının yapıya ulaştığı andaki (200 µs) gerilme dağılımları her bir model için çıkarılmıştır (Şekil 4.8-Şekil 4.13).



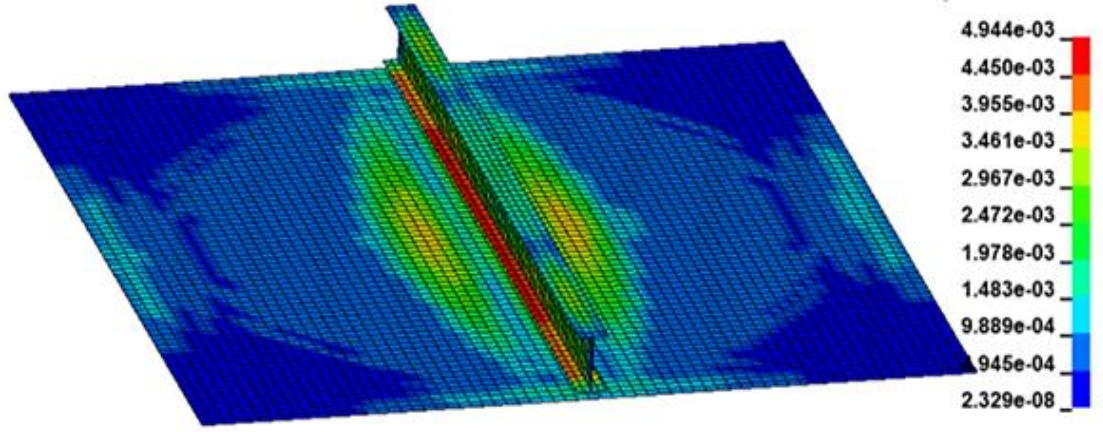
Şekil 4.8: Model_01 gerilme dağılımı



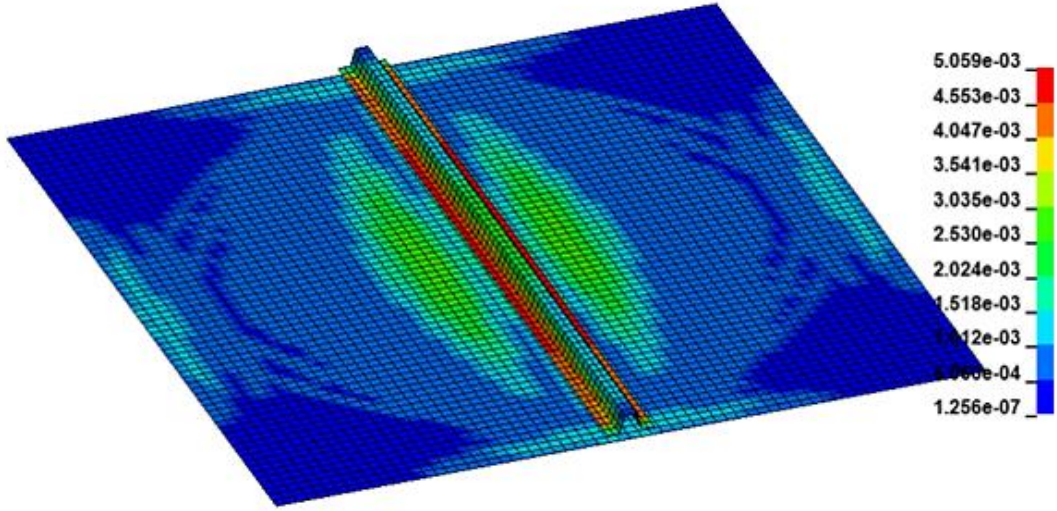
Şekil 4.9: Model_02 gerilme dağılımı



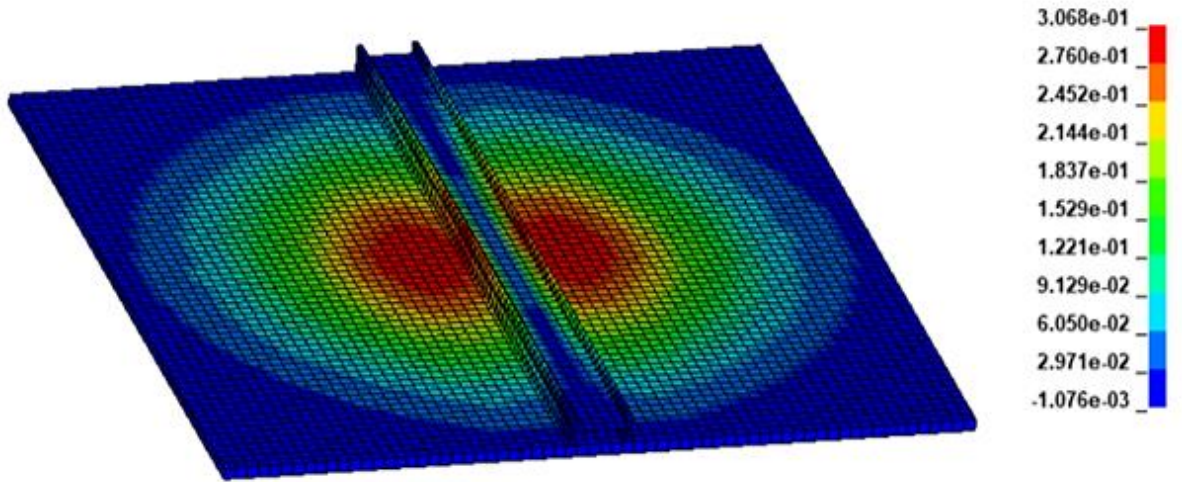
Şekil 4.10: Model_03 gerilme dağılımı



Şekil 4.11: Model_04 gerilme dağılımı

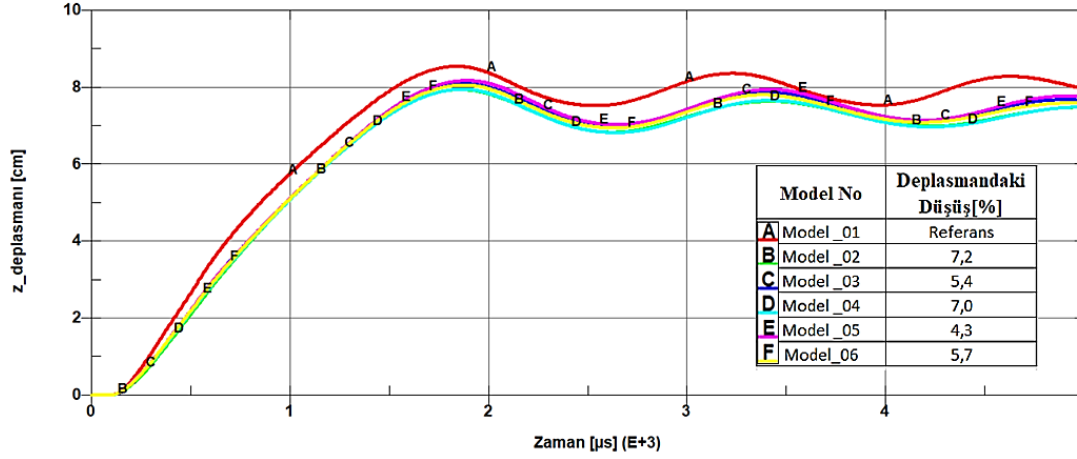


Şekil 4.12: Model_05 gerilme dağılımı



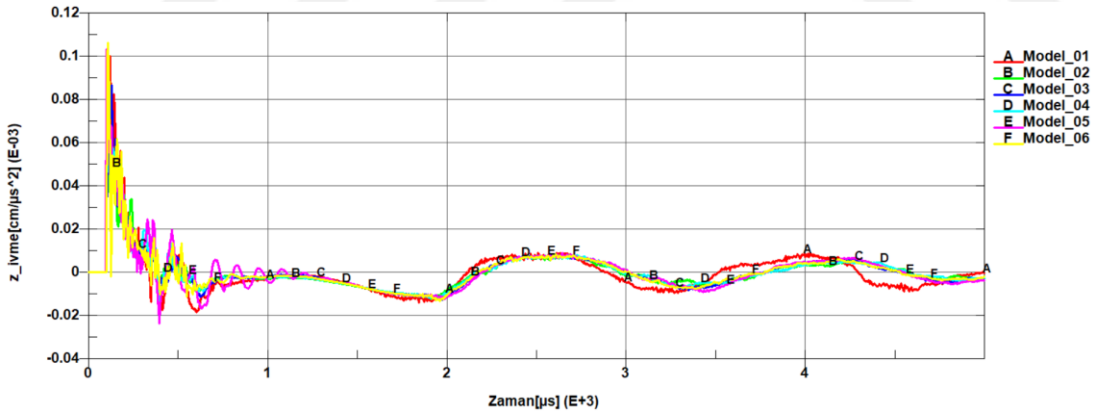
Şekil 4.13: Model_06 gerilme dağılımı

Altı modelin deplasman değerleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Model_01 takviyesiz plaka olup referans kabul edildiğinde her bir takviye modelindeki deplasman düşüşleri yüzdesel olarak belirtilmiştir. Maksimum deplasman düşünü sağlayan modeller Model_02 ve Model_04 olarak görülmektedir.

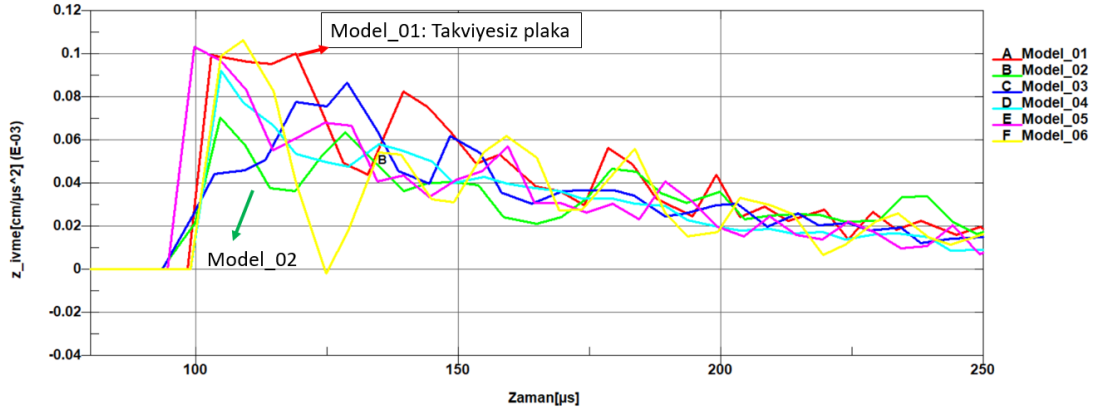


Şekil 4.14: Modellerin deplasman düşüşüne etkileri

İlk 200 µs zaman dilimindeki ivme değerleri incelendiğinde Model_02'de takviyesiz plakaya göre ivmede düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.16).

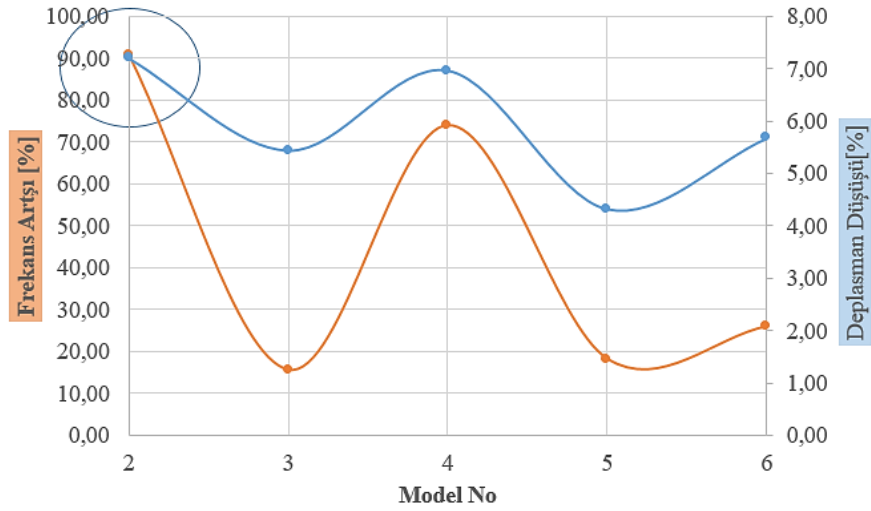


Şekil 4.15: Modellerin ivme düşüşüne etkileri



Şekil 4.16: Modellerin ivme düşüşüne etkileri [0-250 μ s]

Plakanın deplasman ve ivme değerlerinin yanısıra ilk doğal frekansları da değerlendirilmiştir. Deplasman düşüşü ve doğal frekans artırma performansları beraber incelendiğinde deplasman düşüşü ve doğal frekans artırma açısından maksimum verimin Model_02'de olduğu görülmektedir (Şekil 4.17).



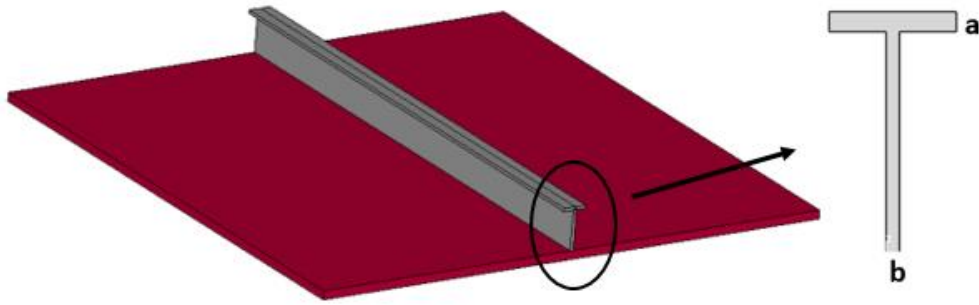
Model No	Deplasmandaki Düşüş[%]	İlk Doğal Frekans Artışı [%]
Model_01	Referans	Referans
Model_02	7,2	91,7
Model_03	5,4	16
Model_04	7,0	74,7
Model_05	4,3	18,6
Model_06	5,7	26,5

Şekil 4.17: Modellerin deplasman ve frekans değerlendirmesi

Deplasman, ivme ve ilk doğal frekansları değerlendirildiğinde sönüm açısından etkin form olarak Model_02 seçilmiş ve bu geometrik form ile çalışılmaya devam edilmiştir.

4.2 Takviye Boyutlarının Deplasman Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Seçilen Model_02'ye ait kalınlık değişiminin deplasman üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.18'de gösterilen modele ait boyut parametreleri a ve b kalınlıklarıdır.



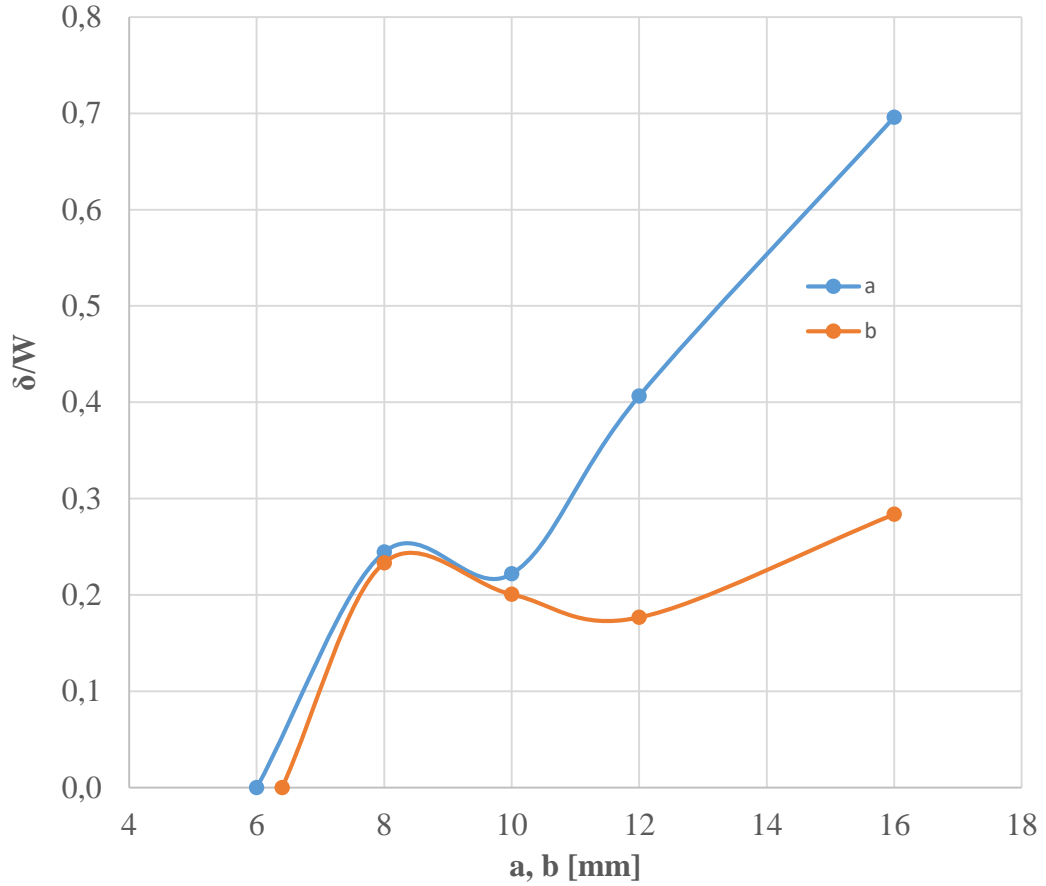
Şekil 4.18: Seçilen takviye formu

Mevcut modelde a kalınlığı 6 mm, b kalınlığı 6.4 mm olup referans alınmıştır. Takviyeye ait a ve b kalınlık değerleri değiştirilerek plaka deplasmanındaki düşüş miktarları ve kalınlığın ağırlığa etkisi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Kalınlığa bağlı deplasman ve ağırlık değerleri

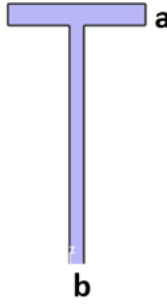
a[mm]	% Deplasman Düşüşü (δ)	% Ağırlık Artışı (W)	δ/W
6	0	4,7	0
8	1,3	5,2	0,2
10	1,3	5,7	0,2
12	2,5	6,2	0,4
16	5,1	7,3	0,7
b[mm]	% Deplasman Düşüşü (δ)	% Ağırlık Artışı (W)	δ/W
6,4	0	4,7	0
8	1,3	5,4	0,2
10	1,3	6,4	0,2
12	1,3	7,3	0,2
16	2,6	9,3	0,3

Deplasman düşüş oranının ağırlık artışına oranı (δ/W) verim olarak tanımlanmıştır. Bu katsayı a ve b kalınlıklarına bağlı olarak Şekil 4.19'daki grafikte gösterilmiştir. 6-10 mm aralığında a ve b kalınlıkları arasında verim açısından farklılık görülmezken kalınlıklar 10 mm üzerine çıktığında a ve b kalınlığının verime olan etkileri farklılaşmaktadır. Kalınlıklar 10 mm'nin üzerine çıktığında a kalınlığının artması b kalınlığına göre verimi çok daha keskin bir şekilde yükseltmektedir.



Şekil 4.19: Kalınlığa bağlı verim değişimi

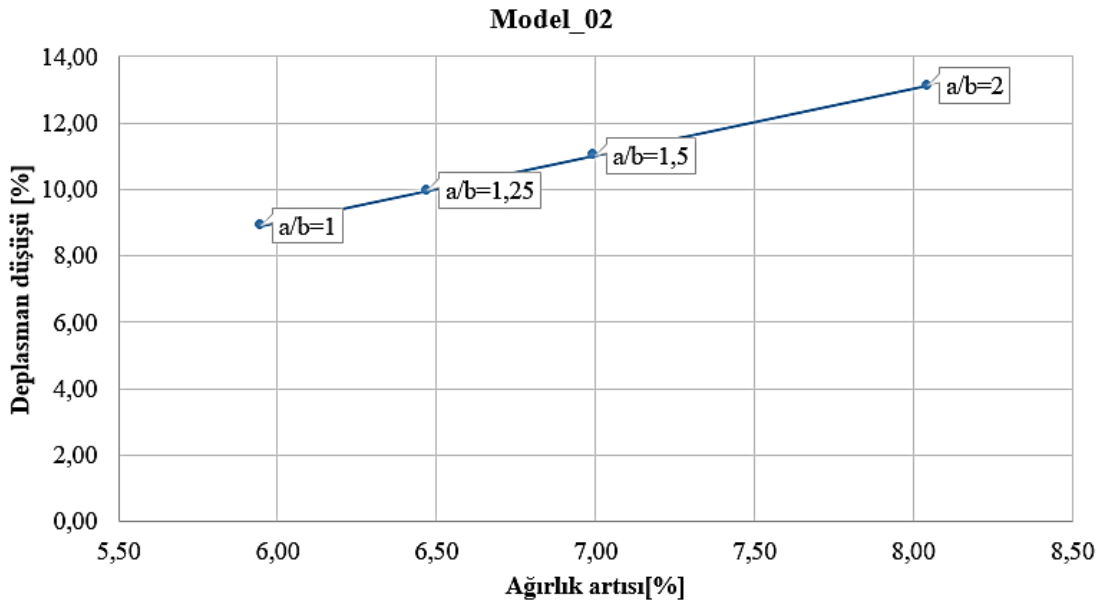
a/b oranları 1, 1.25, 1.5 ve 2 olacak şekilde a ve b parametreleri değiştirilerek Şekil 4.20'deki modeller hazırlanmıştır. Bu modellere ait sonuçlar Şekil 4.21'deki grafikte gösterilmiştir.



Model No	Deplasman düşüşü [%]	Ağırlık Artışı [%]	a/b
Model 2 a 8 b 8	8,6	6,0	1,0
Model 2 a 10 b 8	9,7	6,5	1,25
Model 2 a 12 b 8	10,9	7,0	1,5
Model 2 a 16 b 8	13,2	8,0	2,0

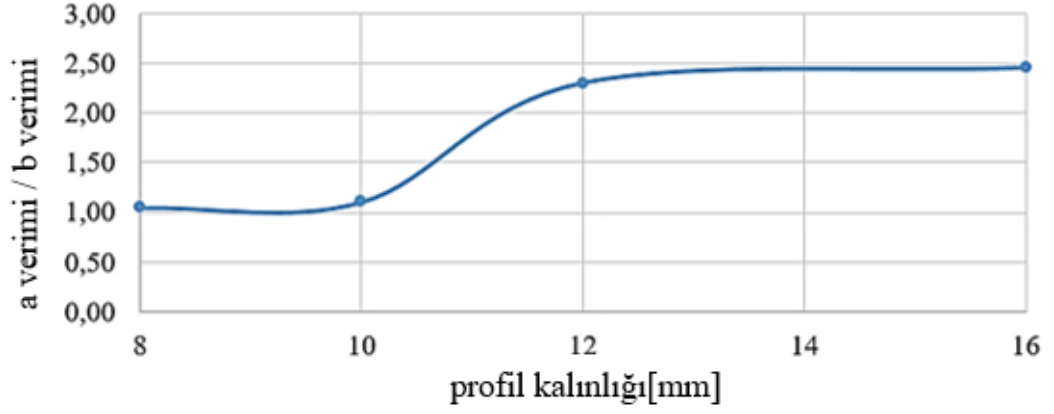
Şekil 4.20: a/b oranına bağlı sonuçlar

Takviye modelinde a/b oranı arttıkça plaka deplasmanındaki düşüş azalırken; ağırlık artmaktadır.



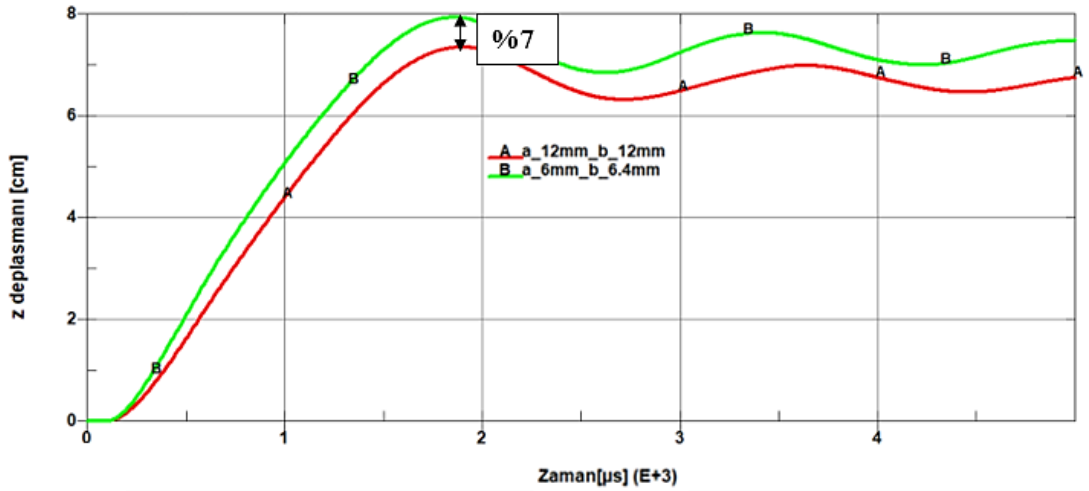
Şekil 4.21: a/ b oranına bağlı deplasman düşüşü

Boyuta karar verebilme aşamasında parameter sayısının ikiden teke indirilmesi amacıyla takviyenin a ve b kalınlıklarının aynı değerde olduğu verimler oranlanmıştır. Kalınlık 12 mm olduğunda a'daki birim ağırlığa bağlı deplasman düşüş etkisinin b'ye göre arttığı görülmüştür. Bu kalınlıktan sonra birim ağırlığa bağlı deplasman etkisinde etkin bir değişme olmamaktadır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22: Kalınlığın verim oranına etkisi

Takviye modelinde a ve b kalınlıkları 12 mm seçildiğinde deplasman değeri Model_02'nin referans kalınlığındaki deplasman değerlerine göre %7 düşüş göstermiştir (Şekil 4.23).

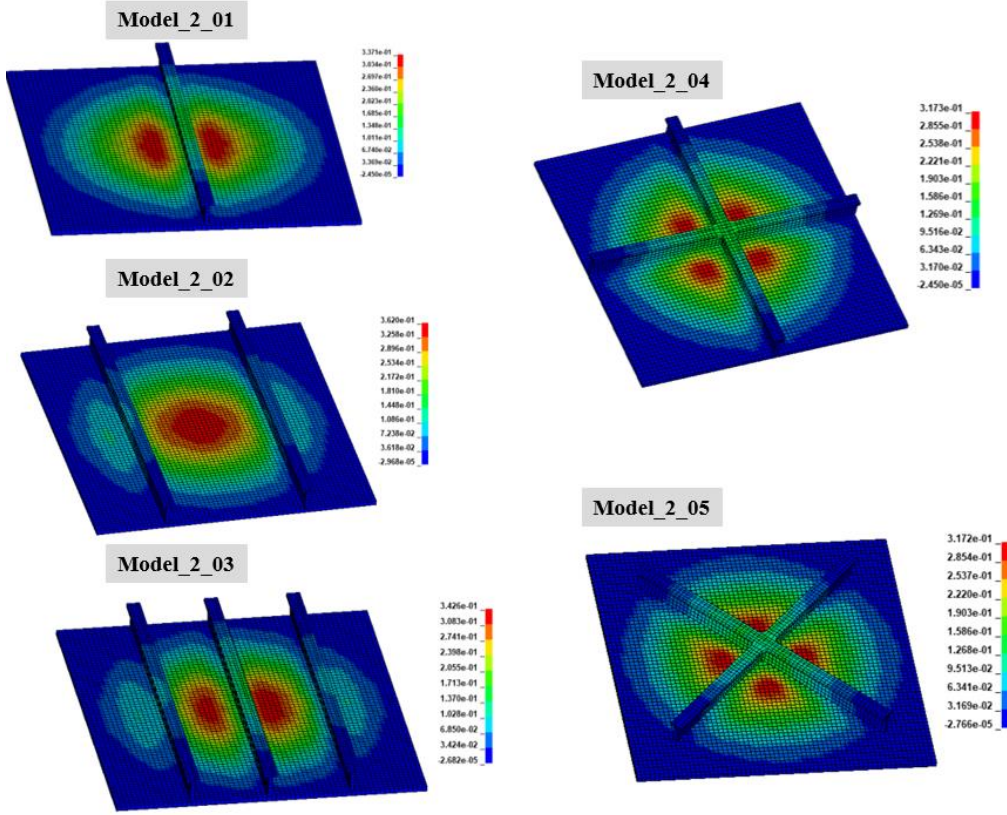


Şekil 4.23: Boyutlandırılan takviye modelinin deplasman düşüşüne etkisi

4.3 Değişik Konfigürasyonların Deplasman Üzerindeki Etkisi

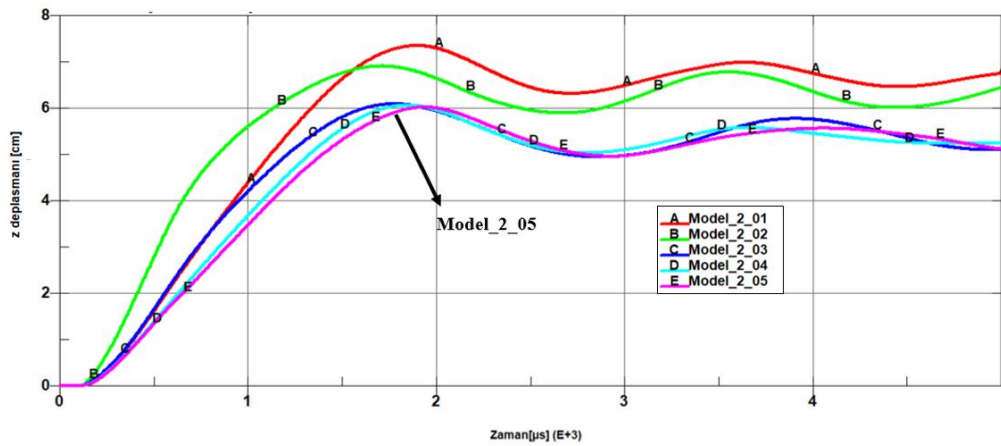
Bölüm 5.1 ve 5.2'de takviyenin geometrik formuna ve kalınlıklarına karar verilmiştir. Bu bölümde Model_02'nin belirlenen boyutlarda çeşitli konfigürasyonları denenmiştir

ve deplasman sonuçları incelenmiştir. Hazırlanan farklı konfigürasyonlar ve gerilme dağılımları Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



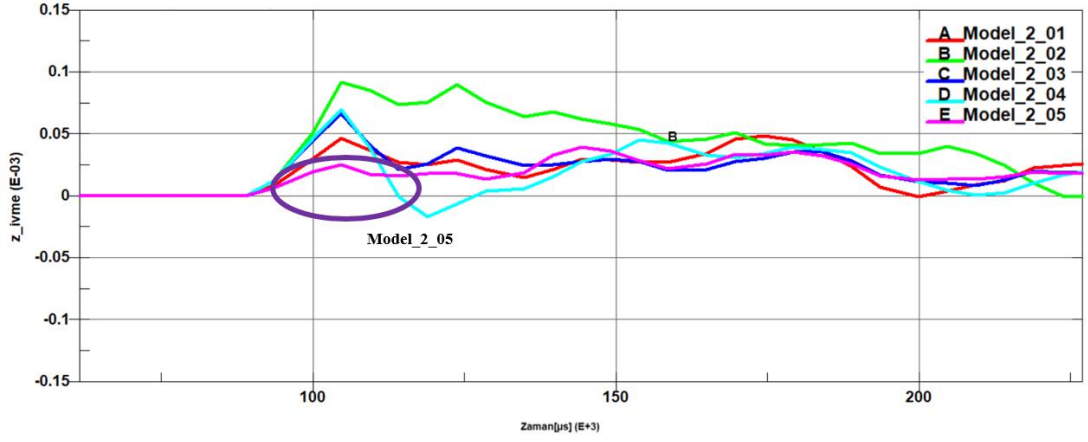
Şekil 4.24: Takviyeli plakaların konfigürasyonları

Şekil 4.24'te gösterilen modellerin deplasman sonuçlarına bakıldığında Model_2_03, Model_2_04, Model_2_05'te deplasman düşüşü birbirine yakın ve referans modele göre daha fazladır (Şekil 4.25).



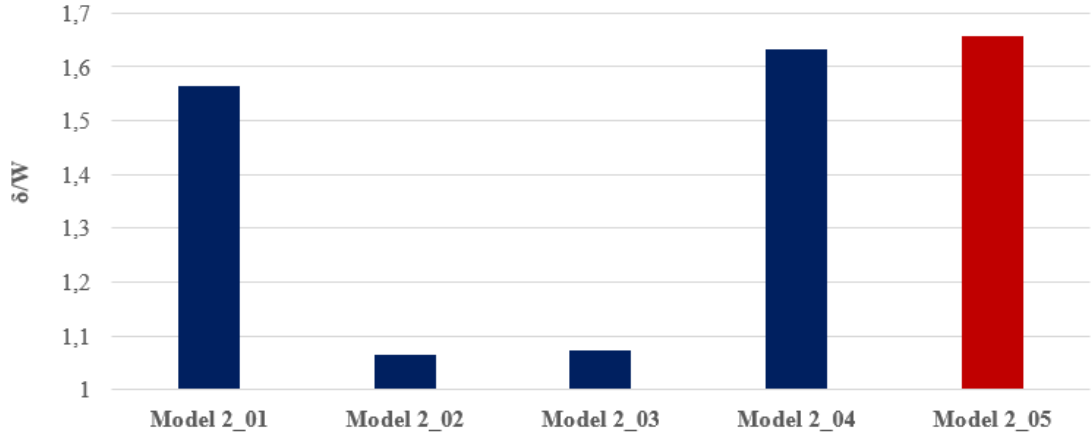
Şekil 4.25: Modellerin deplasman sonuçları

İlk 200 μs 'deki zaman dilimindeki ivme değerleri incelendiğinde Model_2_05'te takviyesiz plakaya göre ivmede maksimum düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26: Modellerin ivme sonuçları

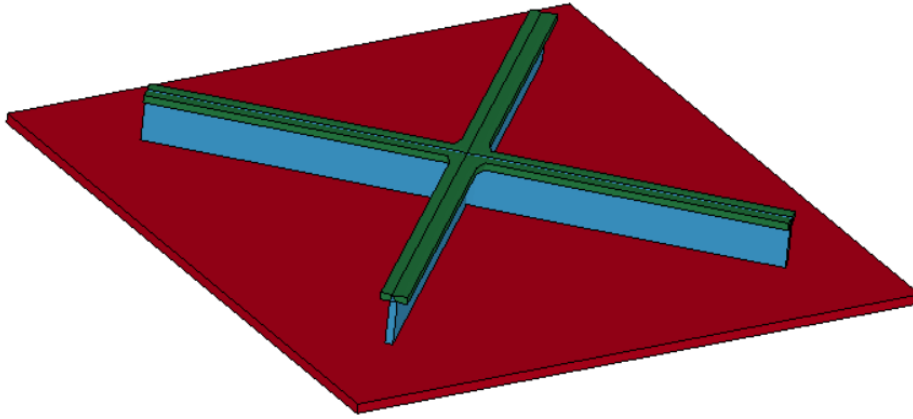
Şekil 4.24'te gösterilen farklı konfigürasyonlar için verim değerleri Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Birim ağırlığa bağlı maksimum deplasman düşüşü (δ/W) Model_2_05'te görülmüştür.



Şekil 4.27: Modellerin deplasman ve ağırlık oranları

4.4 Seçilen Tasarım

Seçilen model Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Nihai karar verilen bu model ile birlikte ağırlık % 18 artarak deplasman % 29 oranında düşmüştür. İlk 3 doğal frekans %45 ile %80 oranında artmıştır.



Şekil 4.28: Seçilen nihai takviye plakası modeli

Takviyesiz plaka modeli (Model_01) ve seçilen takviyeli plaka modeli (Model_2_05) modeline ait ilk 10 frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir (Şekil 4.29).

Mod	Öz Değer	Frekans		
		Radyan	Hertz	Periyot
1	2.320655E-07	4.817318E-04	7.666999E-05	1.304291E+04
2	1.480814E-06	1.216887E-03	1.936736E-04	5.163327E+03
3	1.480817E-06	1.216888E-03	1.936738E-04	5.163321E+03
4	3.766899E-06	1.940850E-03	3.088959E-04	3.237337E+03
5	5.943902E-06	2.438012E-03	3.880216E-04	2.577176E+03
6	5.944629E-06	2.438161E-03	3.880454E-04	2.577018E+03
7	9.937339E-06	3.152355E-03	5.017128E-04	1.993172E+03
8	9.937485E-06	3.152378E-03	5.017165E-04	1.993158E+03
9	1.715561E-05	4.141933E-03	6.592090E-04	1.516969E+03
10	1.715616E-05	4.141999E-03	6.592197E-04	1.516945E+03

Mod	Öz Değer	Frekans		
		Radyan	Hertz	Periyot
1	7.496654E-07	8.658322E-04	1.378015E-04	7.256816E+03
2	3.115073E-06	1.764957E-03	2.809016E-04	3.559965E+03
3	3.211883E-06	1.792173E-03	2.852331E-04	3.505904E+03
4	6.255663E-06	2.501132E-03	3.980676E-04	2.512136E+03
5	8.257950E-06	2.873665E-03	4.573580E-04	2.186471E+03
6	1.060050E-05	3.255841E-03	5.181832E-04	1.929820E+03
7	1.064018E-05	3.261928E-03	5.191520E-04	1.926218E+03
8	1.600012E-05	4.000016E-03	6.366223E-04	1.570790E+03
9	1.731641E-05	4.161299E-03	6.622912E-04	1.509910E+03
10	2.018852E-05	4.493164E-03	7.151092E-04	1.398388E+03

Şekil 4.29: Takviyeli ve takviyesiz plakanın frekans değerleri

10 kg TNT 500 mm mesafede 1000 mm x1000 mm x 16 mm boyutlarındaki plaka altında küresel olarak patlatılarak CONWEP analizleri yapılmıştır. İlk aşamada aynı ağırlık fakat farklı geometrik formlardaki takviyelerin plaka deplasmanı, ivmesi ve doğal frekans üzerindeki etkileri incelenerek sönüm açısından en efektif form seçilmiştir. Seçilen takviye geometrisinin kalınlıkları değiştirilerek optimum bir kalınlık seçilmiştir. Seçilen takviye formuyla farklı konfigürasyonlar denenerek ağırlık artışı düşüş seviyede tutularak en fazla deplasman ve ivme düşüşü sağlayan konfigürasyon bulunmuştur.

Seçilen son modelde ağırlıkta %18 artış ile deplasmanda yaklaşık %29 düşüş sağlanmıştır. İlk 3 doğal frekans %45 ile %80 oranında artmıştır (Çizelge 4.2).

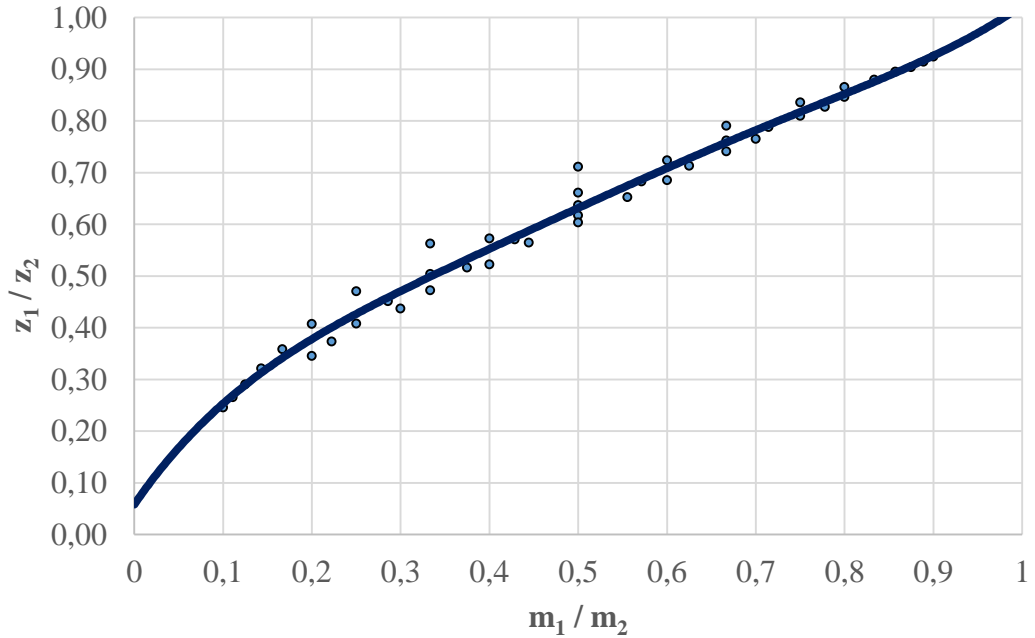
Çizelge 4.2: Seçilen modele ait analiz sonuçları

Mod Şekli	Model_01	Model_02_05	Frekans Artışı[%]
1	76,70	138,00	79,9
2	194,00	281,00	44,8
3	194,00	285,00	46,9
4	309,00	398,00	28,8
5	388,00	457,00	17,8
	Model_01	Model_02_05	%Fark
Normalize deplasman	1,0	0,7	29,4
Normalize ağırlık	1,0	1,2	17,7



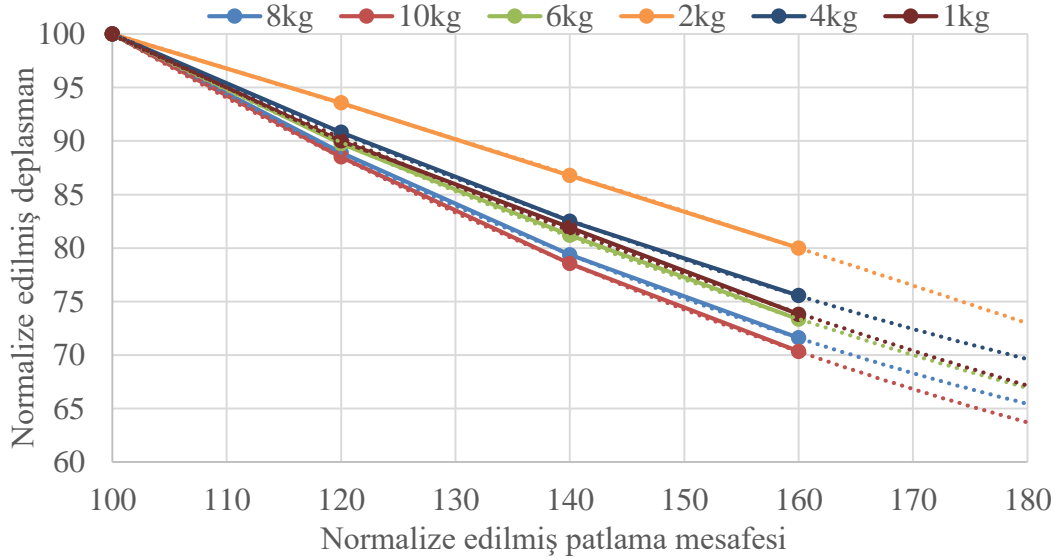
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada küresel yayılı patlama yüklerine maruz kalan plakaların patlama basıncı altındaki patlayıcı kütlesi ve patlama mesafesine bağlı deplasman davranışları incelenmiş ve bağıntılar elde edilmiştir. 1000 mm x 1000 mm x 16 mm boyutlarında AISI 1006 yapı çeliği plaka, 1 kg-10 kg TNT patlayıcı ile 500 mm-800 mm patlama mesafelerinde patlatılmıştır. CONWEP yöntemi ile gerçekleştirilen analizler sonucunda patlayıcı kütlesi ve patlama mesafesiyle plakanın merkez deplasmanı arasında trend grafikler elde edilmiştir. Patlama mesafeleri sabit tutularak farklı kütledeki patlayıcıların oluşturduğu deplasman oranlarına yönelik bir trend grafik elde edilmiş (Şekil 5.1) ve literatürde gerçekleştirilen plaka test verileriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.



Şekil 5.1: Kütle oranına bağlı deplasman oranı

Aynı patlayıcı kütlesinde farklı mesafelerde patlatılan durumlarda patlama mesafesine bağlı deplasman değişimini öngörmeye yönelik yapılan çalışmada 1 kg-10 kg arası TNT miktarlarında, patlama mesafesinin her yüzde 20 artışında titreşim genliği bir öncekine göre ortalama %7 ile %10 oranında düşmektedir (Şekil 5.2).

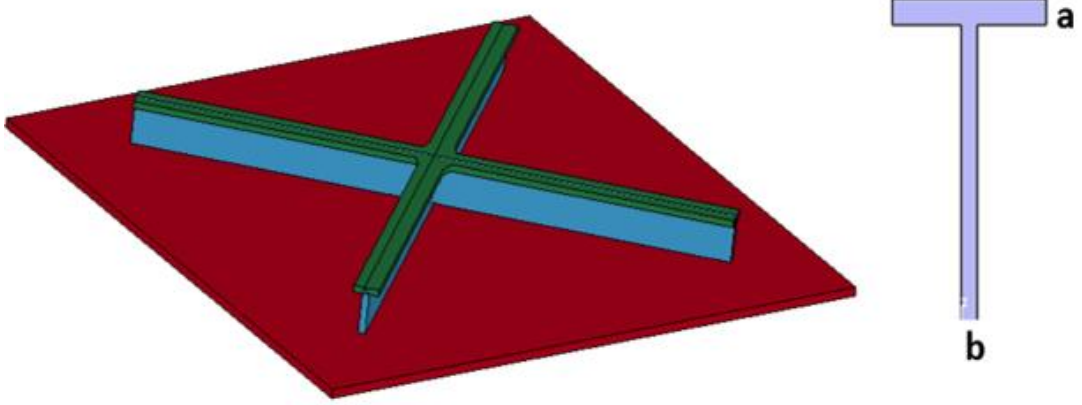


Şekil 5.2: Patlama mesafesine bağlı plaka deplasmanı trendi

Çalışmanın ikinci aşamasında plaka üzerine eklenen değişik formlardaki takviyelerin patlama yükü altındaki sönüm etkileri incelenmiştir. 10 kg TNT 500 mm mesafede 1000 mm x1000 mm x 16 mm boyutlarındaki plaka altında küresel olarak patlatılarak CONWEP analizleri tekrarlanmıştır. İlk aşamada aynı ağırlık fakat farklı geometrik formlardaki takviyelerin plaka deplasmanı, ivme ve doğal frekans üzerindeki etkileri incelenerek sönüm açısından en efektif form T formu olarak seçilmiştir (Şekil 5.3).

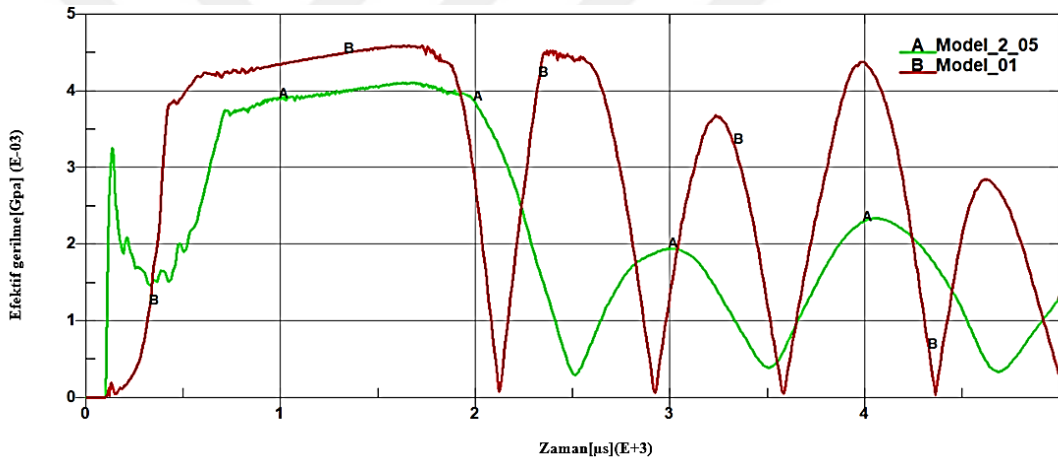
Seçilen takviye geometrisinin kalınlık değişiminin deplasmana etkisi incelendiğinde a kalınlığının b kalınlığına göre deplasmana etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. a/b arasındaki oran arttıkça deplasman düşüşü artmaktadır.

Farklı konfigürasyonlar denenerek köşegen boyunca çapraz yerleştirilen T formuna nihai olarak karar verilmiş ve bu tasarımla ağırlıkta %18 artış ile plakanın merkez deplasmanı yaklaşık %30 düşüş sağlarken ilk 3 doğal frekans %45 ile %80 oranında artmıştır.



Şekil 5.3: Seçilen takviye modeli

Seçilen takviye plakası modeli ile maksimum efektif gerilme takviyesiz plaka gerilmesine göre % 11 oranında düşmüştür (Şekil 5.4).



Şekil 5.4: Takviyeli ve takviyesiz plakanın gerilme değerlerinin kıyaslanması

Yapılan tez çalışmasında CONWEP yöntemi kullanılarak açık alanda küresel patlama analiz sonuçları incelenmiştir. Bu çalışma gelecekte aşağıda belirtilen adımlar ile genişletilebilir:

- ALE yöntemi ile gölgeleme etkilerinin incelenmesi
- Farklı patlama tiplerinin deplasman sonuçlarına etkisinin incelenmesi
- Toprakta patlama analizleri gerçekleştirilerek toprak parametrelerinin deplasmanla ilişkisinin incelenmesi



KAYNAKLAR

- [1] **A.Erdik ve N.Kılıç**, (2010), "Anti-Tank Mayın Patlamasının Zırhlı Araç Üzerindeki Etkilerinin Sayısal Analiz ile İncelenmesi ", Savunma Teknolojileri Kongresi Kitapçığı, Cilt 1, Sayfa 867-874 Ankara, Türkiye
- [2] **Jacob N, Nurick GN, Langdon GS.** (2007). The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plate subjected to blast loads. *Engineering Structures* 29: 2723-2736
- [3] **S. Chung Kim Yuen, A. Butler, H. Bornstein, A. Cholet**, The influence of orientation of blast loading on quadrangular plates, *Thin-Walled Struct.* 131 (2018) 827-837.
- [4] **Zakrisson B, Wikman B, Johansson B.** (2008). Half scale experiments with rig for measuring structural deformation and impulse transfer from land mines. In: Bless S, Walker J, editors. *Proc. 24th Int. Symp. Ballistics*, 1. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.; p. 497e504.
- [5] **Cheng Zheng, Xiang-shao Konga, Wei-guo Wua, Shuang-xi Xua, Zhong-wei Guan**, Experimental and numerical studies on the dynamic response of steel plates subjected to confined blast loading, *Int J. Impact Eng.* 113 (2018) 114-160.
- [6] **N. Jacob, et al.**, Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads - experiments and predictions, *Int. J. Impact Eng.* 30 (8–9) (2004) 1179–1208.
- [7] **Oskouei, A. V. and Kiakojoiri, F.** (2012). "Steel Plates Subjected to Uniform Blast Loading", *Applied Mechanics and Materials*, 108, 35-40.
- [8] **Tavakoli H.R, Kiakojoiri F.**, Numerical dynamic analysis of stiffened plates under blast loading, *Latin American Journal of Solids and Struct.* 11 (2014) 185-199.
- [9] **Mader C. L.** (1998). *Numerical Modelling of Explosives and Propellants*, 2nd edn, Boca Raton, FL, CRC Press)
- [10] **U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.** TM 5-855-1 - *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*. U.S. Army, 1991.
- [11] **Vladimir Sigmund, Hrvoje Draganic**, Blast Loading on Structures, *Technicki vjesnik*, volume: 19,3(2012), pp 643-652
- [12] **Karlos V and Solomos G** (2013) Calculation of blast loads for application to structural components. JRC Technical Report, EUR 26456EN, December. Luxembourg: European Union.

- [13] **B. Zakrisson, H.-Å. Häggblad, B. Wikman**, Experimental study of blast loaded steel plates to fracture, To be submitted for journal publication. (2013).
- [14] **Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J.** Blast Loading and Effects on Structures – An Overview EJSE Special Issue: Loading on Structures, 2007.
- [15] **W.E. Baker and P. Cox. Explosion hazards and evaluation.** ELSEVIER SCI. PUBL. CO, P. O. BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, THE NETHERLANDS, 1982.
- [16] **U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.** TM 5-855-1 - Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons. U.S. Army, 1991.
- [17] **Kinney G. F., Graham K.J.**, (1985) “Explosive Shocks in Air”, Springer, Berlin.
- [18] **Brode H. L.**, (1955) “Numerical solution of spherical blast waves”, Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, New York.
- [19] **Newmark N.M., Hansen R.J.**, (1961) “Design of blast resistant structures”, Shock and Vibration Handbook, Vol.3, Eds. Harris & Crede, McGraw-Hill, New York.
- [20] **Mills C. A.** (1987) “The design of concrete structures to resist explosions and weapon effects”. Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections, Edinburgh, UK.
- [21] **J.O. Hallquist.** LS-DYNA theory manual. *Livermore software Technology corporation*, 3, 2006.
- [22] **Naval Facilities Engineering Command**, (2002), “Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects”, Supersedes TM 5-855- 1/NAVFAC P- 1080/AFJAM32/DSWA DAHSCWEMAN-97 August 1998., Department of the Army, US Army Corps of Engineers and Defense Special Weapons Agency, Washington DC.
- [23] **J.O. Hallquist et al.** LS-DYNA keyword user’s manual. Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [24] **C.N. Kinger, G.Bulmash**, (1984), “Airblast parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst”, Report ARBL-TR-02555, U.S. BRL, Aberdeen Proving Ground MD.
- [25] **T. Børvik, A.G. Hanssen, S. Dey, H. Langberg, and M. Langseth.** On the ballistic and blast load response of a 20 ft ISO container protected with aluminium panels filled with a local mass-Phase I: Design of protective system. *Engineering Structures*, 30(6):1605–1620, 2008.
- [26] **A. Neuberger, S. Peles, and D. Rittel.** Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Airblast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 34(5):859–873,2007.

- [27] **Johnson, G.R., Cook, W.H.:** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, pp. 541–547 (1983)
- [28] **McDonald B, Bornstein H, Langdon G.S, Curry R, Daliri A, Orifici A.C,** Experimental response of high strength steels to localised blast loading, Int J Impact Eng 115 (2018) 106-119
- [29] **Mehreganian N, Fallah A. S., Boiger G. K., Louca L. A.,** Response of armour steel plates to localised air blast load-A dimensional analysis, Int Jnl. Multiphysics Volume 11 (4),2017.





EKLER

EK A: Frekans Analizi Sonuçları

MODEL_01 Frekans Analiz Sonuçları

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

ls-dyna ls971s.64531 R5.1.0

date 01/26/2011

r e s u l t s o f e i g e n v a l u e a n a l y s
i s:

problem time = 5.00000E+03

(all frequencies de-shifted)

PERIOD	MODE	EIGENVALUE	frequency RADIANS	-----| CYCLES
1.304291E+04	1	2.320655E-07	4.817318E-04	7.666999E-05
5.163327E+03	2	1.480814E-06	1.216887E-03	1.936736E-04
5.163321E+03	3	1.480817E-06	1.216888E-03	1.936738E-04
3.237337E+03	4	3.766899E-06	1.940850E-03	3.088959E-04
2.577176E+03	5	5.943902E-06	2.438012E-03	3.880216E-04
2.577018E+03	6	5.944629E-06	2.438161E-03	3.880454E-04
1.993172E+03	7	9.937339E-06	3.152355E-03	5.017128E-04
1.993158E+03	8	9.937485E-06	3.152378E-03	5.017165E-04
1.516969E+03	9	1.715561E-05	4.141933E-03	6.592090E-04
1.516945E+03	10	1.715616E-05	4.141999E-03	6.592197E-04

MODAL PARTICIPATION FACTORS

X-ROT	MODE	X-TRAN Y-ROT	Y-TRAN Z-ROT	Z-TRAN
-0.760410E-11	1	0.315415E-10 0.622550E-08	-0.268885E-10 0.188143E-19	0.287356E+03

2	0.155673E-07	-0.237068E-09	-0.196628E-03
-0.121953E-10	-0.262114E-07	-0.140830E-17	
3	0.177914E-10	0.422605E-07	0.117568E-05
-0.191828E-09	-0.115629E-09	0.335709E-15	
4	-0.176610E-09	-0.704373E-10	0.188160E-03
0.149886E-11	-0.462477E-11	-0.621104E-15	
5	0.246044E-10	-0.110645E-09	-0.734388E+01
0.274625E-11	-0.798083E-07	-0.114798E-18	
6	0.562368E-09	0.217272E-09	-0.134893E+03
0.349787E-11	-0.219176E-07	-0.124605E-18	
7	0.181286E-08	-0.444304E-09	-0.348858E-03
0.324439E-10	0.872822E-07	0.724338E-17	
8	0.319489E-10	0.115258E-07	0.299364E-05
-0.208317E-09	-0.761618E-09	0.860380E-15	
9	0.747387E-07	-0.377134E-07	-0.573324E-02
-0.994699E-11	0.162819E-06	-0.248463E-16	
10	0.256616E-07	0.129335E-08	-0.351610E-04
-0.272293E-10	0.101213E-08	0.675460E-15	

MODAL EFFECTIVE MASS

Z-TRAN	MODE	X-TRAN	Y-TRAN	
Accum. %	Eff. Mass	Accum. %	Eff. Mass	
	1	9.948631E-22	0.00%	7.229899E-22
0.00%	8.257370E+04	67.77%		
	2	2.423423E-16	0.00%	5.620123E-20
0.00%	3.866239E-08	67.77%		
	3	3.165344E-22	0.00%	1.785947E-15
0.00%	1.382213E-12	67.77%		
	4	3.119112E-20	0.00%	4.961417E-21
0.00%	3.540434E-08	67.77%		
	5	6.053782E-22	0.00%	1.224238E-20
0.00%	5.393260E+01	67.82%		
	6	3.162577E-19	0.00%	4.720705E-20
0.00%	1.819611E+04	82.75%		
	7	3.286466E-18	0.00%	1.974063E-19
0.00%	1.217016E-07	82.75%		
	8	1.020733E-21	0.00%	1.328447E-16
0.00%	8.961902E-12	82.75%		
	9	5.585876E-15	0.00%	1.422298E-15
0.00%	3.287005E-05	82.75%		
	10	6.585165E-16	0.00%	1.672766E-18
0.00%	1.236299E-09	82.75%		

Z-ROT	MODE	X-ROT	Y-ROT	
Accum. %	Eff. Mass	Accum. %	Eff. Mass	
0.00%	1	5.782231E-23	0.00%	3.875681E-17
0.00%	2	1.487257E-22	0.00%	6.870354E-16
0.00%	3	3.679811E-20	0.00%	1.337015E-20
0.00%	4	2.246591E-24	0.00%	2.138853E-23
0.00%	5	7.541873E-24	0.00%	6.369362E-15
0.00%	6	1.223507E-23	0.00%	4.803809E-16
0.00%	7	1.052608E-21	0.00%	7.618182E-15
0.00%	8	4.339587E-20	0.00%	5.800619E-19
0.00%	9	9.894256E-23	0.00%	2.650996E-14
0.00%	10	7.414364E-22	0.00%	1.024415E-18

MODEL_2_05 Frekans Analiz Sonuçları

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
ls-dyna ls971s.64531 R5.1.0
date 01/26/2011

results of eigenvalue analysis:

problem time = 5.00000E+03

(all frequencies de-shifted)

PERIOD	MODE	EIGENVALUE	frequency RADIANS	frequency CYCLES
7.256816E+03	1	7.496654E-07	8.658322E-04	1.378015E-04
3.559965E+03	2	3.115073E-06	1.764957E-03	2.809016E-04
3.505904E+03	3	3.211883E-06	1.792173E-03	2.852331E-04
2.512136E+03	4	6.255663E-06	2.501132E-03	3.980676E-04

2.186471E+03	5	8.257950E-06	2.873665E-03	4.573580E-04
1.929820E+03	6	1.060050E-05	3.255841E-03	5.181832E-04
1.926218E+03	7	1.064018E-05	3.261928E-03	5.191520E-04
1.570790E+03	8	1.600012E-05	4.000016E-03	6.366223E-04
1.509910E+03	9	1.731641E-05	4.161299E-03	6.622912E-04
1.398388E+03	10	2.018852E-05	4.493164E-03	7.151092E-04

MODAL PARTICIPATION FACTORS

	MODE	X-TRAN	Y-TRAN	Z-TRAN
X-ROT	Y-ROT	Z-ROT		
	1	-0.596461E+00	0.262039E+00	-0.344205E+03
-0.592482E-05		-0.105702E-04	-0.123356E-05	
	2	0.130500E+02	0.121493E+02	-0.123931E+00
-0.246200E-03		0.262931E-03	0.231424E-05	
	3	-0.120851E+02	0.128919E+02	0.321387E+01
-0.263519E-03		-0.248324E-03	-0.420979E-06	
	4	0.381873E+00	-0.171806E+00	0.423614E+00
0.431834E-05		0.986776E-05	-0.527414E-05	
	5	-0.644897E+00	0.155491E+01	0.121430E+01
-0.288977E-04		-0.154324E-04	-0.141267E-05	
	6	0.140611E+02	0.182324E+02	-0.641597E+00
-0.366756E-03		0.286057E-03	-0.228758E-04	
	7	-0.186140E+02	0.147995E+02	0.112341E+01
-0.301526E-03		-0.377339E-03	0.872500E-05	
	8	0.312950E+00	0.444035E+01	-0.353409E+01
-0.105547E-03		0.378600E-05	0.350106E-03	
	9	0.666568E+01	-0.301813E+01	-0.947932E+02
0.716232E-04		0.136288E-03	-0.191410E-04	
	10	-0.137036E+02	0.815886E+01	-0.362072E+02
-0.172678E-03		-0.314964E-03	-0.896676E-05	

MODAL EFFECTIVE MASS

	MODE	X-TRAN	Y-TRAN
Z-TRAN		Eff. Mass	Accum. %
Accum. %	Eff. Mass	Accum. %	Eff. Mass
	1	3.557661E-01	0.00%
0.00%	1.184771E+05	82.21%	6.866464E-02

	2	1.703024E+02	0.12%	1.476045E+02
0.10%	1.535880E-02	82.21%		
	3	1.460490E+02	0.22%	1.662020E+02
0.22%	1.032893E+01	82.21%		
	4	1.458270E-01	0.22%	2.951746E-02
0.22%	1.794489E-01	82.21%		
	5	4.158926E-01	0.22%	2.417750E+00
0.22%	1.474518E+00	82.21%		
	6	1.977159E+02	0.36%	3.324188E+02
0.45%	4.116466E-01	82.22%		
	7	3.464792E+02	0.60%	2.190249E+02
0.60%	1.262044E+00	82.22%		
	8	9.793796E-02	0.60%	1.971667E+01
0.62%	1.248980E+01	82.22%		
	9	4.443126E+01	0.63%	9.109100E+00
0.62%	8.985746E+03	88.46%		
	10	1.877892E+02	0.76%	6.656697E+01
0.67%	1.310958E+03	89.37%		

Z-ROT	MODE	X-ROT	Y-ROT	
Accum. %	Eff. Mass	Accum. %	Eff. Mass	
	1	3.510353E-11	0.00%	1.117291E-10
0.00%	1.521679E-12	0.00%		
	2	6.061438E-08	0.00%	6.913267E-08
0.00%	5.355724E-12	0.00%		
	3	6.944246E-08	0.00%	6.166500E-08
0.00%	1.772233E-13	0.00%		
	4	1.864803E-11	0.00%	9.737276E-11
0.00%	2.781653E-11	0.00%		
	5	8.350787E-10	0.00%	2.381581E-10
0.00%	1.995631E-12	0.00%		
	6	1.345100E-07	0.00%	8.182855E-08
0.00%	5.233008E-10	0.00%		
	7	9.091797E-08	0.00%	1.423845E-07
0.00%	7.612570E-11	0.00%		
	8	1.114026E-08	0.00%	1.433383E-11
0.00%	1.225740E-07	0.00%		
	9	5.129884E-09	0.00%	1.857441E-08
0.00%	3.663783E-10	0.00%		
	10	2.981760E-08	0.00%	9.920213E-08
0.00%	8.040272E-11	0.00%		



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad:Songül KÖSE

Doğum Tarihi ve Yeri: 12.10.1992 / Kastamonu

E-posta : songulkose92@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Dinamiği, Titreşim & Akustik Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 03/04/17 – : OTOKAR’da Patlama & Balistik Analiz Mühendisi olarak çalışmaktadır.
- 22/06/15 – 31/09/15 : Arçelik AŞ. Titreşim ve Akustik Birimi’nde uzun dönem stajyer olarak çalıştı.
- 14/07/14 – 13/08/14 : TEI Tusaş’ta üretim stajını yaptı.