

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

V-ŞEKİLLİ KOMPOZİT PANEL PLAKALARIN KARA MAYINI
PATLAMALARI ESNASINDA KORUYUCULUKLARININ
SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ İLE ARAŞTIRILMASI

HARUN SELİM ADIBELLİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

V-ŞEKİLLİ KOMPOZİT PANEL
PLAKALARIN KARA MAYINI
PATLAMALARI ESNASINDA
KORUYUCULUKLARININ SONLU
ELEMANLAR ANALİZLERİ İLE
ARAŞTIRILMASI

HARUN SELİM ADIBELLİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE

2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF PROTECTION OF V-
SHAPED COMPOSITE PANEL PLATES
DURING LANDMINE EXPLOSIONS BY
FINITE ELEMENT ANALYSIS**

HARUN SELİM ADİBELLİ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE
2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/07/2023 tarih ve 2023/40 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/07/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Harun Selim Adıbelli'nin tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE

: Prof. Dr. Muhammet Kayfeci

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Ottawa Anlaşması kara mayınlarının kullanımının yasaklandığını ve çoğu ülkenin bu anlaşmaya uyduğunu belirtmektedir. Buna rağmen bazı çatışmalarda hala kullanılmaktadırlar. Siviller için ciddi bir tehdit oluşturmakta, yaralanma ve ölümlere yol açmakta ve çatışma sonrası kalkınma ve yeniden yapılanma çabalarını engellemektedir. Bu gereklilik nedeniyle, kara mayını patlamalarının etkisini hafifletmek için etkili karşı önlemler ve koruyucu tedbirler geliştirme ihtiyacı giderek artmaktadır. Savunma sanayinde, kara mayınlarını temizlemek için kullanılan silahlı araçlara yönelik koruyucu tasarımların geliştirilmesi ihtiyacı artmaya devam etmektedir.

Bu tez, askeri araçları mayın patlamalarına karşı korumak için V-şekilli kompozit panel plakaların kullanımı üzerine detaylı bir çalışma sunmaktadır. Çalışma, kompozit panel plakaların patlama sırasındaki davranışını simüle etmek ve aracı korumadaki etkinliğini değerlendirmek için sonlu elemanlar analizini (FEA) kullanmaktadır.

Çalışma, çeşitli parametrelerin, örneğin malzeme özelliklerinin (E-Glass, S2-Glass ve AISI 4340), kalınlığın ve çeşitli açılara sahip panel plakalarının geometrik boyutlarının koruma kabiliyeti üzerindeki etkilerini araştırmaktadır.

Tez, panel plakaların koruma kabiliyetini artırabilecek optimum tasarım parametrelerine ilişkin ayrıntılı bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, kompozit panel plakaların kullanımının askeri araçları mayın patlamalarına karşı korumak için uygun bir çözüm olabileceği sonucuna vararak, manevra kabiliyetini ve maliyet etkinliğini artırmak için hafif çözümler sunmaktadır.

Genel olarak tez, V-şekilli kompozit panel plakaların mayın patlamaları sırasındaki davranışlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar ve balistik koruma alanında çalışan araştırmacılar ve mühendisler için değerli bir referans olarak hizmet edebilir.

Anahtar Kelimeler: Mayın Patlamaları, V-Şekilli Koruyucu Gövde, Silahlı Araçlar, Kompozit Malzemeler, Sonlu Elemanlar Analizi, E-Glass, S2-Glass, Çelik

SUMMARY

Ottawa Treaty states that the use of land mines are banned and most of the countries are observe this agreement. Although they are still used in some conflicts. They are serious threat to civilians, causing injury or death, as well as hindering post-conflict development and reconstruction efforts. Because of this requirement still there is a growing need to develop effective countermeasures and protective measures to mitigate the impact of landmine explosions. In defence industry, the development of the armed vehicles in order to establish protective designs for the ones which are used to clear the field of land mines, keeps growing.

This thesis presents a detailed study on the use of V-shape composite panel plates in order to protect military vehicles against landmine explosions. The study uses finite element analysis (FEA) to simulate the behavior of the composite panel plates during the explosion and to evaluate their effectiveness in protecting the vehicle. And compares the results, by addressing a experimental study to validate the values.

The study investigates the effects of various parameters, for instance the material properties (E-Glass, S2-Glass and AISI 4340), thickness, and geometric dimensions of the panel plates with various angles, on the protection capability.

The thesis provides detailed insights into the optimal design parameters that can enhance the protection capability of the panel plates. Also, concluding that the use of composite panel plates can be a viable solution for protecting military vehicles against landmine explosions, gives lightweight solutions to increase maneuverability and cost effectiveness.

Overall, the thesis provides a comprehensive understanding of the behavior of V-shaped composite panel plates during landmine explosions, and can serve as a valuable reference for researchers and engineers working in the field of ballistic protection.

Keywords: Landmine Explosions, V-Shape Hull, Armed Vehicles, Composite Materials, Finite Elements Analysis, E-Glass, S2-Glass, Steel

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde, akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Fevzi BEDİR'e,

Bütün çalışma boyunca göstermiş olduğu desteklerinden dolayı aileme, sevgili eşim Sueda BAŞOL ADIBELLİ'ye ve çalışma boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli dostum Osman AYDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. KARA MAYINI PATLAMALARI	4
2.1. Patlamanın Araçlar Üzerindeki Etkileşimi	6
3. ZIRHLI ASKERİ ARAÇLAR	8
3.1 Zırhlı Askeri Araçlarda Koruyucu Gövde	10
4. KOMPOZİT MALZEMELER	15
4.1 Kompozit Malzemelerin Zırhlı Askeri Araçlarda Kullanımı	18
5. ANALİZLERDE KULLANILAN MALZEME TEORİSİ	21
5.1 Johnson-Cook Malzeme Modeli	21
5.2 Cowper-Symonds Malzeme Modeli	24
5.3 Kompozit Malzeme Modeli	25
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	27
6.1 Explicit Çözüm Teorisi	28
6.1.1 Explicit Yöntem Zaman Entegrasyonu	29
6.1.1.1 Düğümler (Node) Üzerinde Döngü	29
6.1.1.2 Elemanlar Üzerinde Döngü (Gerilme Hesabı)	30
6.1.1.3 Düğüm Kuvvetleri	30
6.1.1.4 Düğümlerde Oluşan Bileşke Kuvvet	31

6.1.1.5 Enerji Dengesi	32
7. LS-DYNA PROGRAMI İLE NUMERİK MODELLEME	33
7.1 Ağ Yapısı (Mesh) Doğrulama	35
7.2 Malzeme Modelinin Oluşturulması	36
7.3 Çözüm Yöntemi	40
8. ANALİZ SONUÇLARI	44
8.1 Çelik V-Şekilli Panel Plaka Analiz Sonuçları	44
8.2 Kompozit V-Şekilli Panel Plaka Analiz Sonuçları	48
9. SONUÇ	53
 KAYNAKLAR	 55
ÖZGEÇMİŞ	61
EKLER	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
p	: Basınç
v	: Hacim
T	: Sıcaklık
ρ	: Yoğunluk
K	: Bulk Modülü
μ	: Sürtünme Katsayısı
σ_Y	: Akma Dayanımı
A	: İlk Akma Gerilmesi
B	: Gerinim Sertleşme Katsayısı
N	: Pekleşme Üsteli
c	: Gerinim Oranı Katsayısı – Strain Rate
M	: Termal Yumuşama Katsayısı
ϵ_{eff}^p	: Efektif Plastik Şekil Değiştirme (Gerinim)
$\dot{\epsilon}$	: Şekil Değiştirme Hızı/Oranı
$\dot{\epsilon}_0$	: Referans Gerinim Oranı Katsayısı – 1/saniye
T_H	: Salt Erime – Benzeşik Sıcaklık
T_R	: Oda Sıcaklığı (22 Derece)
T_M	: Erime Sıcaklığı
ΔT	: Sıcaklık Değişimi
C_p	: Spesifik Sıcaklık Katsayısı
β	: İzotropik/Kinematik Pekleşme Katsayısı
E_p	: Plastik Sertleşme Modülü
E	: Elastisite Modülü
P_i	: Etken Basınç
P_s	: Anlık Basınç Pik Değeri

Δt	: Zaman Değişimi
v_{ij}	: Poisson Oranı (i ve j kartezyen referansı)
D	: Düğüm Vektörü
K	: Sertlik/Rijitlik Matrisi
R	: Reaksiyon Kuvvet/Yük Vektörü
M	: Kütle Matrisi
C	: Sönümlleme Matrisi
E_k	: Dönüştürülebilir Kinetik Enerji
E_{kr}	: Rotasyonel Kinetik Enerji
E_i	: İç Enerji
E_{wk}	: Dış İş
kNm	: Kilo Newton Metre
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
GPa	: Gigapascal
EYP	: El Yapımı Patlayıcı
AT	: Anti Tank – Tanksavar
AP	: Anti Personel
NATO	: North Atlantic Treaty Organization – Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
STANAG	: Standardization Agreement – Standartlaştırma Antlaşması

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bir Lojistik Aracının Maruz Kaldığı Örnek Mayın Patlaması	4
2.2: Kara Mayını Patlaması Fiziği	6
3.1: Fowler B5 Zırhlı Karayolu Treni, 1901	8
3.2: Simms Motorlu, Vickers Zırhlı Askeri Araç	8
3.3: NATO STANAG 4569 Standartı	10
3.4: Patlama Ürünlerinin Akış Diyagramı	12
3.5: V-Şekilli Koruyucu Panel Plaka Kesit Görünümü – Crocodile Zırhlı Aracı	12
3.6: SPV 400 Supacat Zırhlı Aracı Patlatılmış Görünüm	13
3.7: SPV 400 Supacat Mayın Patlamasına Maruz Kalması	14
4.1: Farklı Malzemelerin Dayanım-Özgül Katsayı Parametre Kıyaslama Grafiği	16
4.2: Farklı Tipte Fiber Katkılı Kompozit Malzeme Görselleştirmesi	17
4.3: 3B Kartezyen Koordinat Düzlemi – Referans İçin	18
4.4: Spall Liner Etkisinin Kıyaslanması- solda, Spall Liner olmadan koruma sağda, Spall Liner ile koruma	19
4.5: Spall Liner – Şarapnel Etkisinin Araç Üzerinde Görselleştirilmesi	19
6.1: Eleman Üzerinden Döngü Hesaplaması	30
6.2: Düğüm (Nodal) Kuvvetler	30
6.3: Bileşke Kuvvetler	31
7.1: 3B Model Görselleri (Görselde ilk açı referansı olan 90 derecelik modele yer verilmiştir)	33
7.2: Referans Açı Parametrelerini Gösteren 3B Model Karşılaştırması	33
7.3: Simulasyon konsepti ve parametreleri	34
7.4: Referans Düzlemler	35
7.5: Eleman Boyutuna Kıyasla Elde Edilen Zaman-Deformasyon Grafiği	36
7.6: 5 mm Mesh Eleman Boyutuna Sahip Model	37
7.7: Patlama Yükünün – Yansıyan Şok Dalgasına Etkisi	41

8.1:	Çelik D Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	46
8.2:	Çelik D Plakası Analiz Sonucu Yer Değiştirme Görseli	47
8.3:	Çelik C Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	47
8.4:	Çelik B Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	48
8.5:	Çelik A Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	48
8.6:	Çelik Plaka Enerji-Zaman Grafiği	49
8.7:	Kompozit D Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	50
8.8:	Kompozit C Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	50
8.9:	Kompozit B Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	51
8.10	Kompozit A Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	51
8.11	Kompozit Plaka Enerji-Zaman Grafiği	52
8.12	Malzemelere Göre Deformasyon Karşılaştırma Grafiği	52

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: NATO EAP-55 STANAG 4569 Koruma Seviyeleri	10
4.1: Bazı Fiber ve Malzemelerin Özellikleri	16
6.1: Eleman Tipleri	27
6.2: Explicit ve Implicit Çözüm Karşılaştırması	28
7.1: Analizde simüle edilen durum çalışmaları	34
7.2: Deney Çalışması Sonucu Vide Kesitinden Alınan Değerler	35
7.3: D Plakasının Maruz Kaldığı Patlama Sonucu Elde Edilen Veriler	36
7.4: AISI 4340 Çeliği için Johnson-Cook Parametreleri	37
7.5 MAT55 Malzeme Kartı Parametre Açıklamaları	39
7.6 S2 Glass MAT55 malzeme kartı parametreleri	40
7.7 E Glass MAT55 malzeme kartı parametreleri	41
7.8 LOAD_BLAST_ENHANCED yük kartı değerleri ve açıklamaları	44
8.1 Çelik Malzeme Deformasyon Sonuçları	45
8.2 Kompozit Malzeme Deformasyon Sonuçları	49

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisi göz önünde bulundurulduğunda, kara mayınlarının etkinliğinin geçmiş yıllarda daha fazla olduğu düşünülecek olsa da ülkemiz de dahil olmak üzere birçok ülkede etkinliğini hala daha sürdürmeye devam ettiği araştırmalarca ortaya konulmaktadır.

2021 sonu itibarıyla Türkiye, 3.804 alanda 140,59 km² mayından etkilenmiş bölge bildirmişti. Mayınla kirlenmiş alanların çoğu, Ermenistan, İran, Irak ve Suriye sınırları boyunca bulunuyordu; 919 alan ise sınır bölgelerinde bulunmamaktaydı. Türkiye'de 2020 ve 2021 yılları arasında geçen sürede, temizlik operasyonları sırasında toplam 14.022 adet antipersonel mayın imha edilmişti ve EYP'lere (El Yapımı Patlayıcı) karşı güvenlik operasyonları kapsamında 103 adet daha el yapımı mayın temizlenmişti.(International Campaing to Ban Landmines, 2022)

Savaş alanlarında yaşanan beklenmedik sayılabilecek kara mayını patlamaları ve kamu güvenliğini tehdit eden terörist eylemlerde kullanılan kara mayınlarının yol açtığı patlamaya karşı daha etkili malzeme ve bu malzemelerden üretilen yapıların geliştirilmesine yönelik ilgiyi arttırmıştır. Geleneksel patlamaya dayanıklı yapılar, genellikle koruyucu amaçlarla hantal ve sağlam bir şekilde tasarlanır, bu da düşük operasyonel performansa ve yüksek maliyetlere yol açar.(Qi et al., 2014)

Kara mayını patlamalarına karşı koruma, araç ve yolcuların güvenliği ile ilgili önemli ve çözülmeye çalışılan bir sorundur. Patlama ve patlamadan kaynaklanan hasarı en aza indirmek için koruyucu yapının nasıl tasarlanacağı her zaman zorlayıcı bir sorun olmuştur.(Paykani et al., 2013a)

Mayınların patlama etkisine karşı koruma sağlamak için araç ve ekipman tasarımına dahil edilen üç önemli ilke sayıldığında bunlar; enerji emilmesi, patlama etkisinin koruyucu gövdeden¹ sapıtılması ve patlama noktasından uzaklık olacaktır. (Ramasamy et al., 2009a)

Bu kriterlerden dolayı aracın tasarımı, patlama enerjisinin yayılımında hayati bir rol oynamaktadır.

¹ Cümlede yer alan “koruyucu gövde” ifadesi, yabancı dildeki kaynaklarda geçen “hull” kelimesinin karşılığı olarak kullanılmıştır. Zırhlı araçların alt bölümünde yer alan koruyucu bir gövde görevi gören bu yapı, çalışmanın diğer kısımlarında da “koruyucu gövde” olarak tanımlanmıştır.

Düz koruyucu gövde, patlamaya daha fazla yüzey alanı verir ve böylece patlamanın yayılması için daha fazla alan sağlar. Alt gövdenin şekli, minimum patlama yayılımına yol açacak biçimde ve aynı zamanda yolcuların bu patlamadan minimum hasarla etkilenmelerine neden olacak şekilde tutulması gerekmektedir.(Kania, 2009)

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu tez, kara mayını patlamalarının zırhlı personel taşıyıcı araçlarda ve buna benzer askeri alanlarda kullanımı yaygın olan zırhlı ve tekerlekli araçlarda etkilerinin azaltılmasına yönelik tasarlanan koruyucu panel tabakaların koruyuculuklarını incelemektedir.

Çalışma, numerik modelleme yapılarak ve sonlu elemanlar analizleri aracılığıyla, kompozit panel plakalarının patlama esnasındaki davranışlarını simule ederek sonuçlarını ortaya koymaktadır. Ortaya çıkarılan sonuçları, geçmişte yapılan deneysel ve numerik analizler ile kıyaslayarak, kompozit malzemelerin bu uygulamalarda kullanılmasının getirdiği avantajları ve dezavantajları kıyaslamaktadır.

Yapılan çalışma bu kıyaslamanın geçmiş yıllarda ortaya çıkarılan sonuçları yorumlayarak literatüre Türkçe katkıda bulunmaktadır. Tezin amaçları doğrultusunda, referans alınan deneysel çalışmadaki vaka analizlerini bilgisayar destekli mühendislik uygulaması LS-DYNA ile simule etmekte ve çıkan sonuçları çelik ile kompozit malzemeler arasında kıyaslamaktadır.

Bu kapsamda, kompozit malzemelerden, E-Glass fiber, S2-Glass fiber ve çelik malzemelerden AISI4340 çelik parametreleri kullanılarak modellenip; kalınlık, V şekilli panel plakaların farklı açılarla geometrik boyutlandırılması ve her birinin kendi aralarındaki koruyuculuk kapasiteleri açısından kıyaslanması amaçlanmıştır.

Seçilen malzeme ve geometri parametreleri haricinde NATO standartlarını referans alan patlayıcı Ls-Dyna programında seçilip, CONWEP-ALE methodu aracılığıyla modellenerek daha hızlı ve yakınsak sonuçlar elde etmeye çalışılmıştır.

Sonlu elemanlar modeli, uygulanan farklı boyutlardaki ağ yapısı (mesh) parametreleri doğrulamanın akabinde, deneysel parametreleri referans alarak, çelik malzeme için tamamlanan analizler ile doğrulandıktan sonra oluşturulmuştur. Ve çalışmanın geri kalan kısmında bu model üzerinden kompozit malzemelerle oluşturulmuş V şekilli panel plakaların, kara mayını patlamalarına maruz kalmaları simule edilerek çalışma tamamlanmıştır.

Giriş kısmında bahsedilen konularla literatür taraması üç farklı bölüme ayrılarak 2,3 ve 4'üncü bölümlerde sırasıyla; kara mayını patlamaları, zırhlı askeri araçlar ve kompozit malzemeler başlıkları altında toplanmıştır.

NATO standartı üzerine bilgilendirmeler 3'üncü bölümde yapılırken, devam eden kısımlar malzeme teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi sırasıyla 5 ve 6'ncı bölümlerde yapılmıştır. Ls-Dyna programında yapılan numerik modelleme ve doğrulama alt başlıklarla ayrılarak 7'nci bölümde detaylandırılmıştır.

Çalışmanın sonuçları 8'inci bölümde aktarılıp, kıyaslamalar ve gelecek çalışma önerileriyle nihayete kavuşturularak tamamlanmıştır.

2. KARA MAYINI PATLAMALARI

Mayınlar, özellikle Tanksavar (AT) mayınları, askeri araçlar ve içindekileri için önemli bir tehdittir.(Radonić et al., 2004) AT mayınları, zırhlı ve diğer araçların imha ve hasarını sağlamak amacıyla genellikle düşman araçlarının kullandığı güzergahlarda mayın tarlalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu mayınlar, büyük çeşitlilikte patlayıcı yük ve ateşleme tiplerine sahip olup, büyük miktarda güçlü patlayıcı ve yıkıcı etkilere sahiptir. Tüm toprak tiplerine, demiryolu hatlarına, kıyı bölgelerine ve nehir yaklaşımlarına gömülebilirler ve tek başlarına veya gruplar halinde gömülerek mayın tarlaları oluşturabilirler. (NATO - TR-HFM-090 Task Group 25, 2007)

Modern tanksavar mayınları, Birinci Dünya Savaşı sırasında ilk zırhlı araçlara karşı kullanılan bir silah olarak ortaya çıktı. İkinci Dünya Savaşı sırasında, tanksavar mayınlarının üretimindeki teknolojik ilerleme, yaygın taktiksel uygulamalarını mümkün kıldı. Rusya-Almanya çatışmasında tüm Alman tanklarının dörtte biri mayınlar tarafından imha edildi.(Mitchell, 1964) Şekil 2.1’de örnek patlama resmi paylaşılmıştır. (NATO - TR-HFM-090 Task Group 25, 2007)



Şekil 2.1 Bir Lojistik Aracının Maruz Kaldığı Örnek Mayın Patlaması

Kara mayınları tanksavar (AT), anti-personel (AP) ve El Yapımı Patlayıcılar (EYP) modern savaşların en çok kullanılan silahları arasında yer almıştır. 2’nci Dünya

Savaşı'ndan bu yana kara mayını patlamaları sonucu yaşanan araç kayıpları, diğer tehditlere kıyasla daha fazla yaşanmıştır ve bu sebeple her zaman en tehlikeli silahlardan biri olduğunu söyleyebilmekteyiz. (Bird, 2001)

Konvansiyonel bir askeri çatışmada kara mayınlarının kullanımları; düşman hareket özgürlüğünü kısıtlamanın yanı sıra güçlü bir savunma kuvveti karşıtı olarak, yani daha büyük olası bir saldırı gücüne karşı koruma sağlama üzerine amaçlanmıştır. Piyasada yer alan diğer silahlarla kıyaslanması durumunda daha ucuz olmaları, kolay erişilip kullanıma hazır hale getirilmeleri ve konuşlandırma için çok az teknik uzmanlık gerektirmeleri sebebiyle topluca -tek başına bir kütle halinde- kullanılmışlardır. (Ramasamy et al., 2009b)

Kullanım amaçlarına göre, konuşlandıran taraf için, araç hedeflerine karşı kara mayınlarının sayısı avantajı bulunmaktadır. Bu yöntem, sadece karşıt güçleri zayıflatmakla kalmayıp aynı zamanda hızlı ve esnek bir şekilde tepki verme yeteneklerini de engellemektedir. (Stansfield, 1982) Sebep olduğu yıkıcı etki sayesinde savaş ortamında, etkilenen taraf açısından da moral bozukluğuna sebebiyet vermektedir.

Yaygın çeşitlilikte kara mayını türleri olmasına karşılık, bunlar hedef ve hasar mekanizmasına göre sınıflandırılabilir: (NATO - TR-HFM-090 Task Group 25, 2007)

- Anti-Personel (AP) Mayınları:
 - Patlayıcı Etkili Mayınlar
 - Parçacık Etkili Mayınlar
- Tanksavar (AT) Mayınları:
 - Patlayıcı Etkili Mayınlar
 - Boşluklu İmla Hakkı Mayınları

Patlayıcı etkili AP Mayınları, maruz kalan tarafın faaliyetlerini durdurmak ve yaralamak amaçlı kullanılmaktadır. Bu mayınların çoğu, bir basınçlı fitil ile çalıştırılır ve tahmini 250 grama kadar patlayıcı içermektedir. Diğer türdeki parçacık etkili mayınlar ise, bir tuzak teli tarafından etkinleştirilerek parça püskürmesine neden olur. Mayının merkezinden 360 derece yayılacak şekilde parça (şarapnel) püskürterek maruz kalan tarafına ölümüne veya yaralanmasında etkili olacak bir çalışma prensibi bulunmaktadır. (NATO - TR-HFM-090 Task Group 25, 2007)

AT mayınları ilk üretimlerinden itibaren etkilenen tarafın ana muharebe tanklarını durdurmak için mayın tarlası bariyerlerinde kullanılmaktaydı. Günümüzde

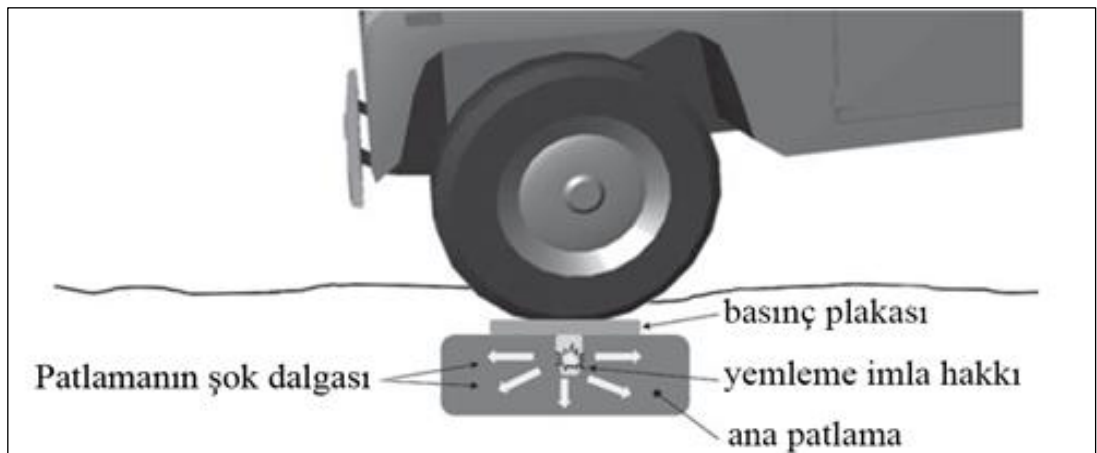
herhangi bir çatışma alanında ve her türlü araca karşı kullanılmaktadırlar. Birinci nesil mayınlar, aracın tekerleklerinden veya paletlerinden 200 kg'dan fazla yükler tarafından etkinleştirilen bir basınç sigortası kullanmaktadır. 12 kg'a kadar, AP-mayınlarına kıyasla daha yüksek miktarda patlayıcı içeren ve aşırı patlama yüklerine neden olarak araçta ciddi hasara neden olan bir çalışma prensibine sahiptirler. (NATO - TR-HFM-090 Task Group 25, 2007)

İkinci ve üçüncü nesil AT mayınları daha farklı etkilere sahip olacak şekilde gelişmiş fitiller ile patlama prensibine sahiptirler. Ancak çalışmamızda STANAG 4569 kapsamında araçların altındaki patlama etkilerine odaklanmamız sebebiyle bu bölümde bahsedilmemiştir.

2.1. Patlamanın Araçlar Üzerindeki Etkileşimi

Tanım gereği patlama, dalganın patlayıcı içinde yayılmasıyla 1 ms'den daha az bir süre içerisinde kimyasal reaksiyona neden olduğu bir şok dalgası işlemidir. (Ramasamy, Masouros, et al., 2011)

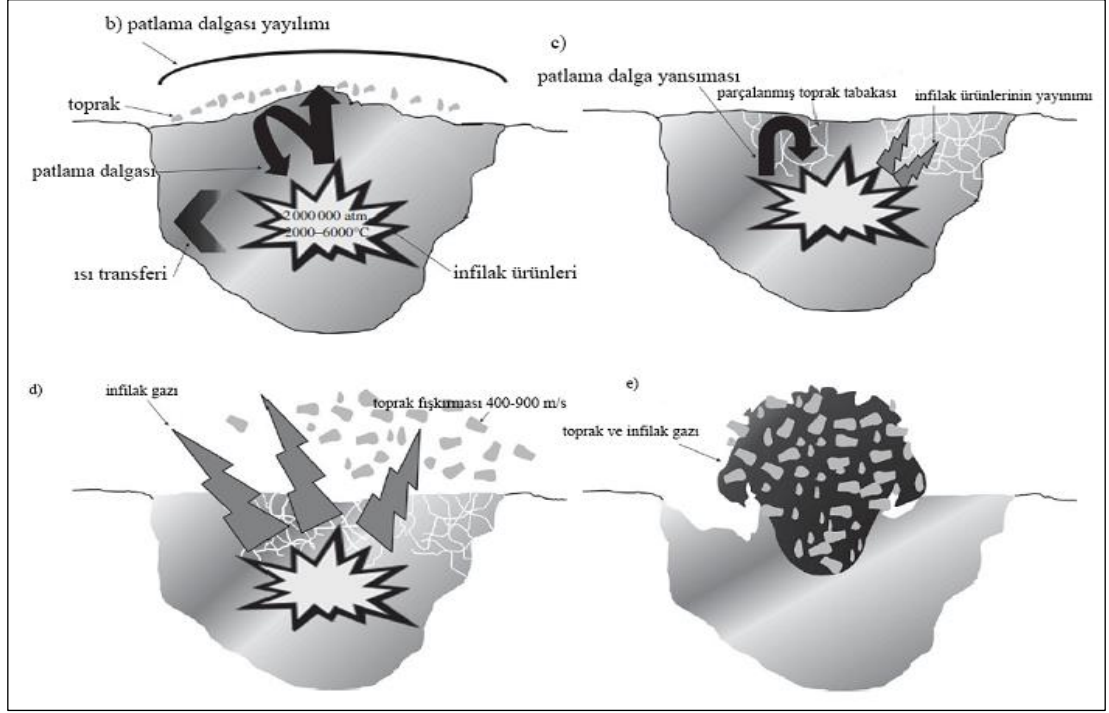
Patlama dalgasının arkasında, patlayıcı sıcak ve yüksek basınçlı gaza dönüşmektedir. Lokal basınç 2000 ile 6000 °C sıcaklıklarda 1,000,000 – 2,500,000 atm arasındadır. (Rasbash, 1984). Bu gaz 3-4 km/s hızında dışarı doğru genişler ve malzemeyi şiddetli bir şekilde yoldan çeker. Daha sonrasında bir hedefe iletilen enerji miktarını belirleyen birkaç fiziksel süreç gerçekleşir. Bir kara mayını için bu süreçler üç farklı aşama ile karakterize edilebilir, bunlar; patlayıcının toprak ile etkileşime girmesi, gazın genişlerken malzemeyi yüzeyden dışarı doğru itmesi ve toprak



Şekil 2.2 Kara Mayını Patlaması Fiziki

püskürmesi sonucu araçla etkileşimidir. (Grujicic et al., 2007) Şekil 2.2’de (Ramasamy, Masouros, et al., 2011) Mayın patlamasının fiziği ve devamında buna ilişkin detaylar resimlendirilmiştir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi mayının tetiklenmesi ekzotermik bir reaksiyona ve bir patlama dalgasının oluşmasına sebep olur.

Şekil 2.2-b’de ise patlama dalgasının toprak ara yüzüne yansımaları ve



Şekil 2.2 - devamı Kara Mayını Patlaması Fiziği

Şekil 2-c’de toprak örtüsünün (tabaka) parçalanmasına neden olur. Patlama ürünleri, toprak püskürmesinin salınmasıyla sonuçlanan ve parçalanmış toprak örtüsünün havalanması sayesinde oluşur ve bu Şekil 2-d’de görselleştirilmiştir. Son olarak, toprak püskürmesi ile çevrelenmiş aşırı ısınmış patlama gazının ters çevrilmiş bir konisi örneklendirilerek Şekil 2-e’de gösterilmiştir. Her ikisi de daha sonra aracın zeminine etki ederek aracın ve dolayısıyla yolcuların yaralanmasına neden olmaktadır. (Ramasamy, Masouros, et al., 2011)

3. ZIRHLI ASKERİ ARAÇLAR

Modern askeri araçlar, artan yük gereksinimlerine ve gelişen teknolojiye karşılık daha fazla hareket kabiliyeti ihtiyacını dengeleyerek zırhlı savaş (muharebe) araçlarının gelişimini yönlendirmeye devam etmektedir. (Wright & French, 2008)

John Fowler & Co.® tarafından bir yol lokomotifi Şekil 3.1’de gösterildiği gibi (Hills, 2019) 1899-1902 Güney Afrika Savaşı’nda kullanıma amaçlı imal edilen araç, ilk zırhlı araç olarak kaynaklarda yer almaktadır. Bunun paralelinde onun gelişimine katkıda bulunacak ilk silahlı araç olarak nitelendirilebilen araç ise F.R. Simms tarafından 1899’da De Dion-Bouton® marka motorlu dört tekerlekli bir bisiklete Maxim makineli tüfek takılmasıyla tarihte yer almıştır. (Ogorkiewicz, 1968)



Şekil 3.1 Fowler B5 Zırhlı Karayolu Treni, 1901

Bu ilkleri takip edecek ve geliştirmenin bir sonraki aşaması, mobil muharebe aracını onu kullananlar için yeterli seviyede koruma sağlaması amaçlı zırhlı ve silahlı tek bir araçta toplama olarak tahmin edilebilir.

İlki 1902’de Vickers® tarafından üretilen tekne biçimli koruyucu gövdeye sahip üstü açık bir araç “Şekil 3.2 (Bartholomew, 1988)”, bu kombinasyonu bir araya getiren örnek olarak değerlendirilir. (Ogorkiewicz, 1968)



Şekil 3.2 Simms Motorlu, Vickers Zırhlı Askeri Araç

Birinci Dünya Savaşı sırasında, zeminin tamamen çamur ve mermi kovanlarından oluştuğu savaş alanını geçebilecek; dikenli tel tahkimatları ile çevrilmiş alanlara girebilecek ve siperleri aşabilecek bir araca ihtiyaç vardı. 1915 yılında buna bulunan çözüm Lincoln Machine'nin tekerleğe alternatif olarak ürettiği ilk paletli araç prototipiydi. (Follett et al., 2011)

Birinci Dünya Savaşı'nı takip eden süreçlerde bu gelişmeler artarak devam etti. Ancak paletli veya tekerlekli olarak tasarlanan zırhlı araçların koruyucularının gelişen teknoloji ile paralel artması da beklentiler arasına girdiği varsayılabilir.

Ağırlık bu araçların tasarımında ve koruyucu gövde tasarımında dikkate alınması gereken en önemli kriterlerden biridir. Yüksek teknolojiye sahip silahlarla donatılmış zırhlı bir askeri aracın, aynı doğrultuda savaş alanında hareket ve manevra kabiliyeti ağırlık faktörü düşünüldüğünde pek yüksek değildir.

Bu sebepten dolayı, zırhlı araçlar yeteneklerine ve işlevlerine göre veya ağırlıklarına göre sınıflandırılabilir. Ogorkiewicz'e göre en iyi sonucu elde etmek için tümü farklı amaçlarla kullanılan en az altı tip zırhlı araç vardır, bunlar;

- Ultra hafif zırhlı araçlar
- Tekerlekli zırhlı taşıyıcılar
- Paletli personel taşıyıcılar
- Hafif Tanklar
- Tekerlekli ve Silahlı araçlar
- Savaş tankları

olarak kategorilere ayrılabilir. (Follett et al., 2011)

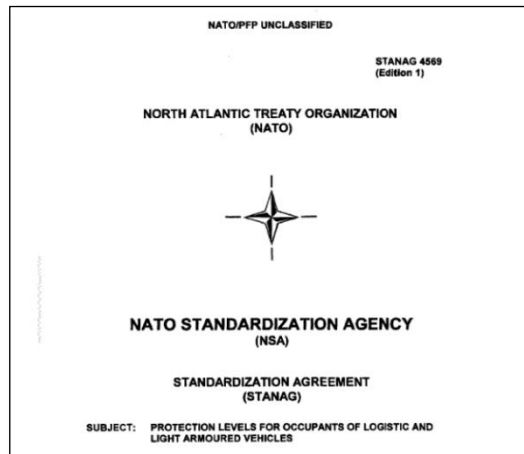
Askeri araçlarda kullanılan zırhın koruması gereken birçok farklı savaş alanı tehdidi vardır. Bu tehditleri anlamlı bir karşılaştırma için birleştirmek amacıyla, çeşitli yönetim organları belirli koruma seviyeleri önermiştir. NATO 2000'lerin başı itibariyle yayınladığı STANAG 4569, Lojistik ve Hafif Zırhlı Araç Yolcuları için Koruma düzeyleri isimli şartnameyi yayınlamıştı. Bu şartnamede, NATO kuvvetlerine karşı kullanılan yaygın tehditlere karşı ağırlık bakımından hafif olacak bir koruma istenmektedir. (Fecko et al., 2000)

Tablo 3.1 NATO EAP-55 STANAG 4569 Koruma Seviyeleri

Seviye	Atak Türü- Kinetik Enerji	Atak Türü- El Bombası ve Kara Mayını Patlaması	Hız (m/s)
5	25 mm x 137 APDS-T, PMB 073 500 metrede	-	1258
4	14.5 mm x 114 API/B32 200 metrede	10 kg AT Mayını- Mayın Patlaması basıncı	911
3	7.62 mm x 51 AP (WC core) 30 metrede	8 kg AT Mayını- Mayın Patlaması basıncı	930
2	7.62 mm x 39 API BZ 30 metrede	6 kg AT Mayını- Mayın Patlaması basıncı	695
1	7.62 mm x 51 NATO ball (M80) 30 metrede	Küçük personel karşıtı patlayıcılar	833
1	5.56 mm x 45 NATO Ball (SS109) 30 metrede	Küçük personel karşıtı patlayıcılar	900
1	5.56 mm x 45 NATO Ball (M193) 30 metrede	Küçük personel karşıtı patlayıcılar	937

Tablo 3.1’de (NATO, 2004) bu şartnamede test edilen atak türleri ve koruyuculuk seviyeleri tanımlanmıştır. Tabloda belirtilen hız, testte kullanılan mühimmatın minimum menzildeki beklenen hızıdır. Düşük tehdit seviyeleri, zırh delme yeteneği açısından en az ölümcül olanlardır ve tehdit seviyeleri sayısal olarak arttıkça artar. Bazı durumlarda, belirli bir seviye için birden fazla tehdit tanımlanmıştır. (Fecko et al., 2000)

Günümüzde zırhlı araçların ve bu zırhlı araçlarda kullanılan koruyucu gövdelerin tasarımı, NATO AEP-55 standardına uygun bomba ve mayın tehditlerine maruz bırakılan ve Tablo 1’de gösterilen STANAG 4569’a göre belirlenen koşullarda teste tabi tutularak yapılmaktadır. Çalışmamızda bu şartlar göz önünde bulundurularak sonlu elemanlar metodu yaklaşımıyla oluşturulan modelimize aktarılmış ve yine bu koşullarda simule edilmiştir.



Şekil 3.3 NATO STANAG 4569 Standartı

3.1 Zırhlı Askeri Araçlarda Koruyucu Gövde

Lester'in çalışmasına göre geleneksel kara mayını patlamalarında araçların korunmasına yönelik dört yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar; yardımcı vasıta (ekipman), donanım iyileştirmesi, gövde modifikasyonu ve monokok (aracın entegre olduğu şasi ile gerilimi paylaştığı yapı) yapı olarak sınıflandırılabilir. (Lester, 1996)

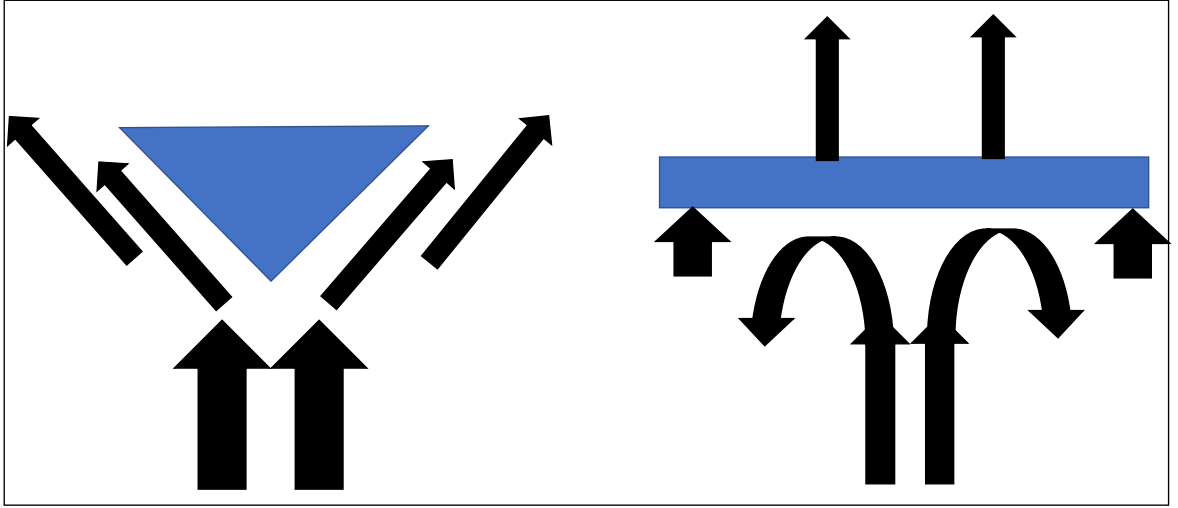
Aynı çalışma içerisinde yardımcı vasıta, kum torbaları ve ağır kauçuk gibi savaş alanına uygun eklenti malzemeler olarak tanımlanmıştır. Patlama sonucu ortaya çıkan toprak püskürmesini saptırma kalkanları ve bu eylemi emen güçlendirmiş mühendislik kitleleri ise donanım iyileştirmesi yaklaşımını açıklamıştır. Gövde modifikasyonu, aracın mevcut şasisine mayına dayanıklı bir malzeme ile imal edilmiş gövdenin eklenmesi ile tanımlanabilmektedir. Son olarak monokok koruyucu yapı ise tabirinden de anlaşılacağı üzere takviyesiz – şasisiz mayına dayanıklı bir yapının kullanılması yönünde önerilen yaklaşımı belirtmektedir.

Çalışmamızda, bu yaklaşımlardan, gövde modifikasyonu ile tanımlanabilecek bir yapının kullanımı halinde mayın patlamalarına karşı koruyuculuğunun incelenmesi araştırılmıştır.

Gövdenin şekli gereği "V-Şekilli Koruyucu Gövde" adını alan yapı 1970'lerde ilk olarak Rodezya İç Savaşında kullanılarak araçlarda konuşlandırılmıştır. (Lester, 1996) Günümüzde ise maliyet/performans değerlendirme oranı için avantajlı ve 20 kg'ı aşan patlayıcılara karşı koruyucuğu kanıtlanmış olması sebebiyle de çoğu zırhlı araçlarda bulunan bir tasarımla yer almaktadır.

V-Şekli, patlayıcı ürünlerin aracın gövdesinden saptırılarak bir mayın patlaması sırasında Şekil 1-b'de de görselleştirilmiş olan araca iletilen patlama dalgasının sebep olduğu darbenin, hafifletilmesine yardımcı olur. Böylelikle aracın maruz kaldığı toplam darbe miktarını azaltır.

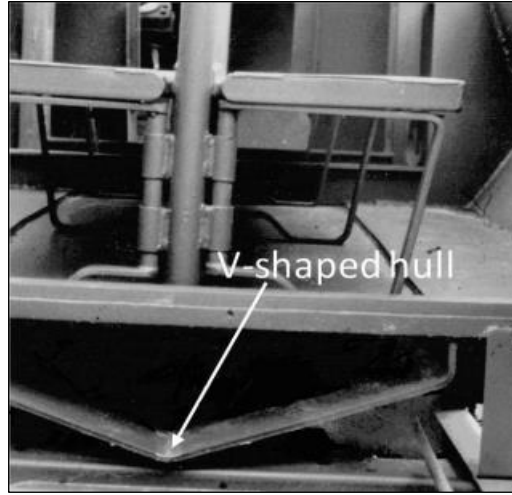
Tersi düşünüldüğünde, düz bir yüzey, yüzeyin altında önemli seviyede bir basınç yoğunlaşmasına neden olur ve basınç, araca önemli bir yükün aktarılmasıyla sıkışmasına sebebiyet verir. Sıkışma, en nihayetinde aracın yukarı doğru havaya fırlatılması anlamına gelmektedir. Mürettebatın bulunduğu bölme deformasyona uğramadan kalsa bile, aracın yukarı ivmelenmesi içerisinde bulunan yolcu ve yolcuların yaralanmaları hatta ölümlerine neden olacak hasar oluşturabilmektedir. (Follett et al., 2011)



Şekil 3.4 Patlama Ürünlerinin Akış Diyagramı

Şekil 3.4'te patlama sonrası ortaya çıkan gaz ve bu gazlarla birleşerek bir patlama ürünü oluşturan katı-sıvı bileşenlerin akışı, koruyucu gövdenin geometrisine bağlı olarak gösterdiği değişiklik görselleştirilmiştir.

V-Şekilli koruyucu gövde patlamada ortaya çıkan yükün dağılımında düz şekilli bir gövdeye kıyasla daha üstün olduğu gözlemlenebilmektedir. Düz bir yüzeye sahip koruyucu gövdenin altında, patlama dalgası bir ayna gibi yansıyacak ve ortaya



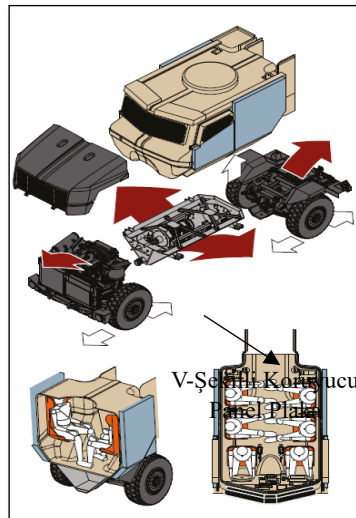
Şekil 3.5 V-Şekilli Koruyucu Panel Plaka Kesit Görünümü – Crocodile Zırhlı Aracı

çıkan basınç birçok kat daha yükselerek birleşecektir ve etkisi artacaktır. Şekil 3.5'te örneklendirilen (Ramasamy, Hill, et al., 2011) ve patlama ürünlerinin araçta bulunan

yolculardan uzaklaştıracak şekilde imal edilen V-şekilli gövdenin etkinliği tamamen sahip olduğu açıyla ilgilidir. Açının keskinliği, patlama sonrası enerji dağılımı ile ters orantılıdır. Ancak bu keskinliğin artışı, aracın taşıma kapasitesini etkilediği gibi potansiyel olarak aracı daha da dengesiz bir hale getirerek devrilme olasılığını arttırmaktadır. (Paykani et al., 2013b) V-Şekilli koruyucu tasarımında bu koşullar dikkate alındığında optimum bir açı değerine, koruyuculuğu yüksek olduğu gibi ağırlığının da düşük seviyede tutulduğu bir yapıda olmasına ihtiyaç doğmaktadır.

3'üncü bölümde bahsedilen NATO STANAG 4569 standartında yer alan koruyuculuk seviyelerine göre, şartnamede listelenen tehditleri yenmenin yolu, geleneksel olarak nitelendirebileceğimiz yekpare metalik zırh sistemlerinin kullanılmasıdır. Bu sistemler geliştirilmekte olan yeni araçlardan herhangi birine kolayca uyarlanabilir şekilde oldukça fazla uygulamada kullanılmıştır. Fakat, giderek daha ölümcül hale gelen modern tehditleri yenmek için muazzam miktarda geleneksel çelik zırh ihtiyacı ortaya çıkıyor. Bu miktardaki zırh, genellikle hafif zırhlı araçlardaki süspansiyon ve tahrik sistemlerini alt ederek yavaş, hantal ve güvenilmez hale getirmektedir (Fecko et al., 2000).

Ağırlık dezavantajını ortadan kaldırmak maksatlı, çalışmamızın ilerleyen bölümlerinde yer verdiğimiz simulasyon modelleri geleneksel yapıda imal edilen yalnızca çelikten oluşan veya kompozit-çelik kombinasyonu ile imal edilen koruyu gövdelere odaklanmamıştır. Yalnızca kompozit malzeme kullanımı halinde ortaya çıkacak koruyuculuklar kıyaslanmış, tamamen kompozit malzemelerden üretilen hafif çözümlerin bu alanda verimliliği tartışılmıştır.



Şekil 3.6 SPV 400 Supacat Zırhlı Aracı Patlatılmış Görünüm

Savunma sanayi alanında kompozit malzeme kullanımının yaygınlığı son yıllarda oldukça artmaktadır. Kompozit malzeme ile imal edilmiş parçaları bulunan araçlardan biri olan Supacat SPV 400 de buna örnektir.

Araçta kullanılan V-Şekilli panel plakası Şekil 3.6’da (Supacat, 2023) yer alan patlatılmış görünüme sahip görselde de yer almaktadır. Araçta yolcu kabini için kullanılan koruyucu kapsülün tamamen kompozit malzemeden üretildiği teknik dökümanlarda belirtilmesine rağmen, V-Şekilli panel plaka için aynı tür malzeme kullanılmamıştır.

Supacat aracına ait ve Şekil 3.7’de (Supacat, 2023) bulunan görselde V-şekilli panelin patlamaya karşı gösterdiği koruyuculuğu ve daha önce de bahsedilen enerji dağılım şemasını doğrulayacak şekilde açığa çıkan gaz bulutunun aracın etrafından yayılma şekli de gözlemlenebilir.



Şekil 3.7 SPV 400 Supacat Mayın Patlamasına Maruz Kalması

4. KOMPOZİT MALZEMELER

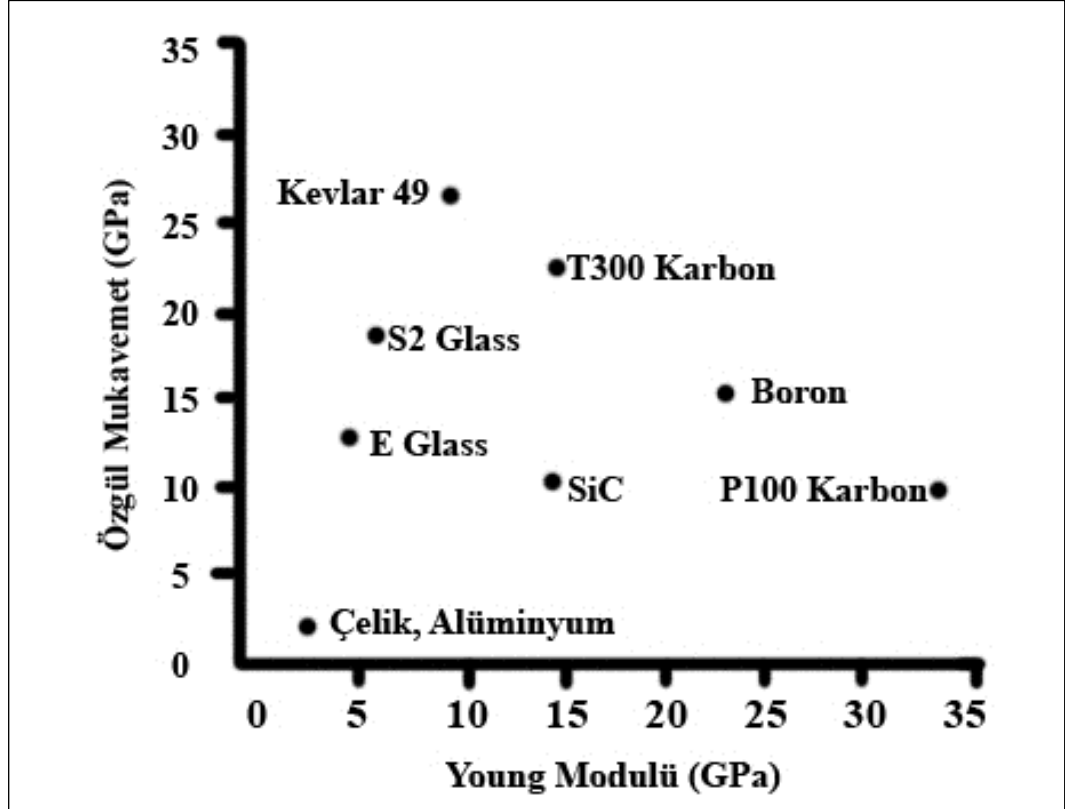
Kompozit malzemeler iki veya daha fazla farklı bileşenden oluşmaktadır. Mühendislikte kullanımına ilişkin örnekler, Mısırlılar tarafından bir yapı malzemesi olarak kilin içinde saman kullanımına kadar uzanmaktadır. Çeşitli tiplerde fiber takviyeli matrislerin kullanıldığı modern kompozitler, son yıllarda yüksek performanslı yapılarda bir devrim yaratmıştır. Gelişmiş kompozit malzemeler, geleneksel metalik malzemelere göre hafiflik ile güç ve sertlikte önemli avantajlar sunar. Bu yapısal performansın yanı sıra, optimum performans için liflerin yönünü seçme özgürlüğü de gelir. Modern kompozitler, yapının yanı sıra malzemenin de tasarlanabilmesi anlamında devrim niteliğinde olarak tanımlanmıştır. (Swanson, 1997)

Kompozit malzemeler, dayanım-ağırlık oranı diğer malzemelere kıyasla daha yüksek olması sebebiyle özellikle savunma sanayi uygulamalarında oldukça tercih edilen bir konumda bulunmaktadır. Dayanım-ağırlık oranı yaklaşık $250 \frac{\text{kNm}}{\text{kg}}$ olan zırh çeliğini, Kevlar® malzemesi ile kıyasladığımızda $2514 \frac{\text{kNm}}{\text{kg}}$ dayanım-ağırlık oranı olması sebebiyle on kat farklılıkla karşılaşmaktayız. Kullanım amacına göre seçim yapabileceğiniz pek çok farklı malzeme olduğundan, belirli bir amaca uyacak şekilde tasarlanıp üretilebilirler. (Follett et al., 2011)

Çoğu, fiberle güçlendirilmiş bir matris malzemeden oluşur. Fiber, 10^3 mertebesinde uzunluk-çap oranlarına sahip, ipliğe benzer bir malzeme demeti ile tanımlanır. Düşük veya orta mukavemet ve elastiklik sergileyen birçok malzeme toplu formdaki modüller, küçük çaplı lifler formundayken büyük ölçüde geliştirilmiş özellikler gösterir. Güçlü, sert lifler, soğuk çekilmiş metallerden (normalde teller veya filamentler olarak anılır), seramiklerden ve yüksek oranda yönlendirilmiş polimerlerden üretilir. Fiber takviyeli kompozitler oluşturmak için polimer, metal veya seramik matrislere dahil edilebilirler. Cam ve karbon fiberler, fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan başlıca malzemelerdir, ancak diğer polimerik fiberler giderek daha fazla kullanılmaktadır. (John, 1972)

Fiberin, çoğu durumda oldukça farklı mukavemet ve sertlik özelliklerine sahip olan bir matris ile kullanılacağı dikkate alınmalıdır. Bu sebeple farklı özgül mukavemet ve farklı özgül katsayıya sahip mühendislik malzemelerinin

değerlendirilmesi, kullanım amacına uygun olacak şekilde önem arz etmektedir. Şekil 4.1’de farklı malzemelerin özgül mukavemet-özgül katsayı grafikleri bulunmaktadır.(Swanson, 1997)



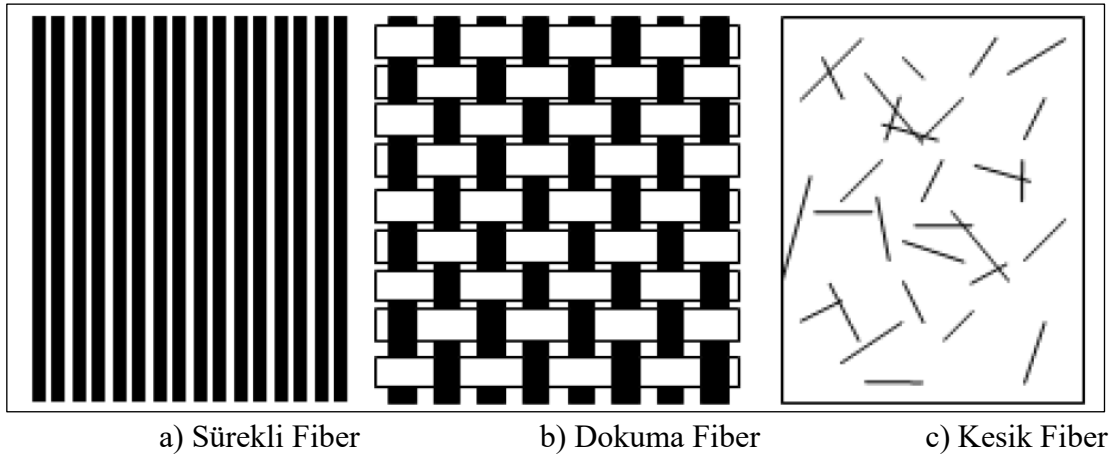
Şekil 4.1 Farklı Malzemelerin Dayanım-Özgül Katsayı Parametre Kıyaslama Grafiği

Bu grafikten yapılacak çıkarım ise farklı tiplerde malzemeler içeren ve homojen yapıya sahip kompozit olmayan malzemeler arasındaki farklılıklar özgül mukavemetin büyük oranda daha yüksek olduğu durumlarda bulunmaktadır. Dayanım açısından değerlendirecek olduğumuzda ise Tablo 4.1’de (John, 1972) yer alan parametreleri kıyasladığımızda çeliğe oranlı avantajlı konumda bulunan fiber kompozitler yer almaktadır.

Tablo 4.1 Bazı Fiber ve Malzemelerin Özellikleri

Malzeme	Young Modülü (E) (GPa)	Çekme Gerilimi (GPa)	Yoğunluk (kg/metreküp)
E-Glass Fiber	70	2.0	2500
S-Glass Fiber	84	4.6	2600
Tungsten	350	3.5	19000
Çelik	210	2.8	7800
Kevlar 49	130	3.6	1400

Kompozit malzemeler anizotropik malzemeler olması sebebiyle, hangi eksenin analiz edildiğine bağlı olarak farklı özelliklerin malzemeye atanabilmesi mümkündür. Kompozit malzeme kullanımının faydalarından biri de bu sebeple belirli bir amaca uygun tasarlanabilir, belirli bir amaca uygun özelliklerle bir yönde daha güçlü hale getirilebilirler. Fiber tiplerine göre kompozit malzemeler üç farklı tipte sınıflandırılabilir. Bunlar sürekli(kesintisiz) fiber kompozit, dokuma(kumaş) fiber kompozit ve kesik fiber kompozit olarak adlandırılmaktadır, Şekil 4.2’de görselleştirilmiştir. (Follett et al., 2011)

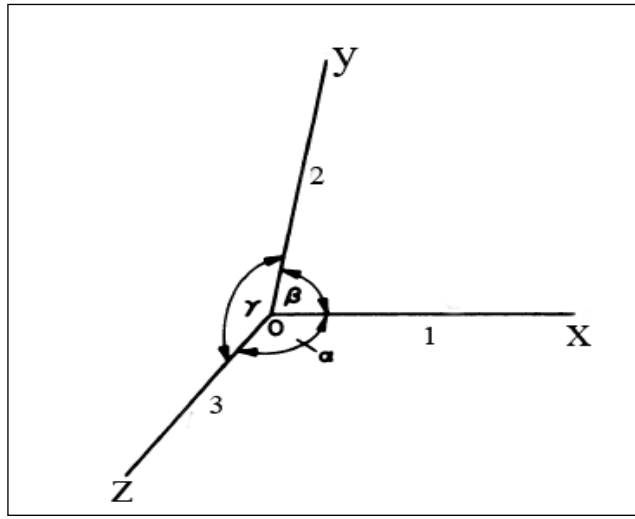


Şekil 4.2 Farklı Tipte Fiber Katkılı Kompozit Malzeme Görselleştirmesi

Şekil 4.2-a’da yer verilen sürekli fiber kompozit türü, fiberlerin yönünde yüksek dayanıma sahiptir ancak, tabakalar arası ve çapraz(enine) yönde dayanımları ile kıyaslandığında çok düşük olacaktır. Şekil 4.2-b’de görselleştirilen dokuma(kumaş) fiber kompozit türü sürekli fiber kompozite kıyasla daha yüksek tabakalar arası ve çapraz yönde dayanıma sahip olmasına karşın, fiberler düz bir şekilde sıralanmadığı için fiber boyunca dayanım azalacaktır. Son olarak Şekil 4.2-c’de gösterilen kesik fiber kompozitin üretimi diğer türlere göre daha ucuzdur fakat mekanik özellikleri açısından diğer iki tür ile kıyaslandıklarında en düşük değerlere sahiptir. Sıralanan bu üç tür fiber katkılı kompozit dışında hafif köpük ve honeycomb olarak adlandırılan ve bal peteğine benzer şekle sahip çekirdeğe bağlı kompozit levhalardan oluşan sandviç yapı gibi başka türler de mevcuttur. Lakin bu tez çalışmasında yer verilen E-Glass, S-Glass fiber tipli kompozitler için oluşturulan koruyucu panel plakalar için bağlantılı bir tür olmaması sebebiyle bahsedilmemiştir.

Tez çalışması kapsamında kompozit malzemelerle kıyasladığımız çelik malzemelerin tersine yani tamamen aynı mekanik özellikleri yönden bağımsız bir şekilde sabit olan çelik malzemelere göre kompozit malzemeler ortotropiktir. İzotropik olmayan anlamına gelen anizotropik kelimesinin tam karşılığı olarak değerlendirdiğimizde, kullanılan fiber yönüne bağımlı bir şekilde mekanik özelliklerin değişkenliği söz konusudur.

Standart notasyon fiberlerin 1 (x) ve 2 (y) yönleri boyunca ilerlediğini ve 3 (z) yönünde kalınlık kazandığı şeklindedir. (Follett et al., 2011) Şekil 4.3'te referans düzlem paylaşılmıştır. (John, 1972)



Şekil 4.3 3B Kartezyen Koordinat Düzlemi – Referans İçin

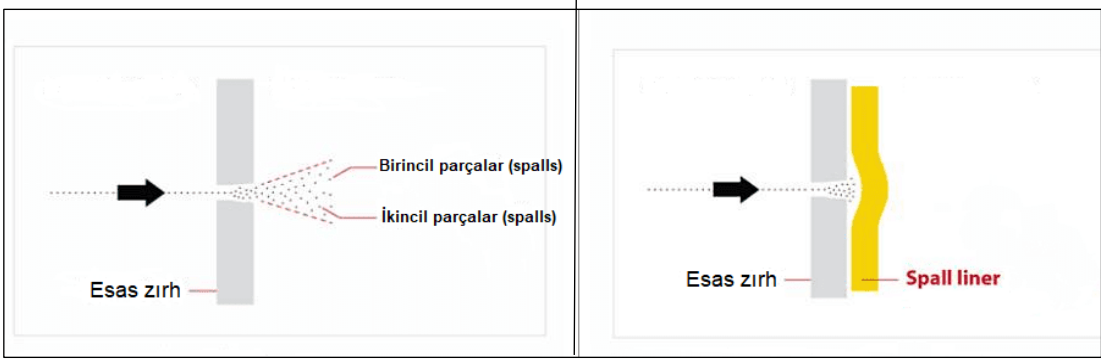
Bu bağlamda, sonlu elemanlar yazılımında kullanım için kompozitler modellenirken kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Biri tanesi malzemenin rijitlik (stiffness) matrislerinin girilerek modellenmesi veya diğeri, her üç yönde de mühendislik parametrelerin yazılıma girilmesidir. İlerleyen bölümlerde, bu yöntemler, LS-Dyna programına girilen değerler ile detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

4.1 Kompozit Malzemelerin Zırhlı Askeri Araçlarda Kullanımı

Kompozit malzemeler hem kişisel hem de araç zırh sistemlerinde balistik koruma için geniş çapta kullanılmaktadır. Kişisel zırh sistemlerinde kompozit

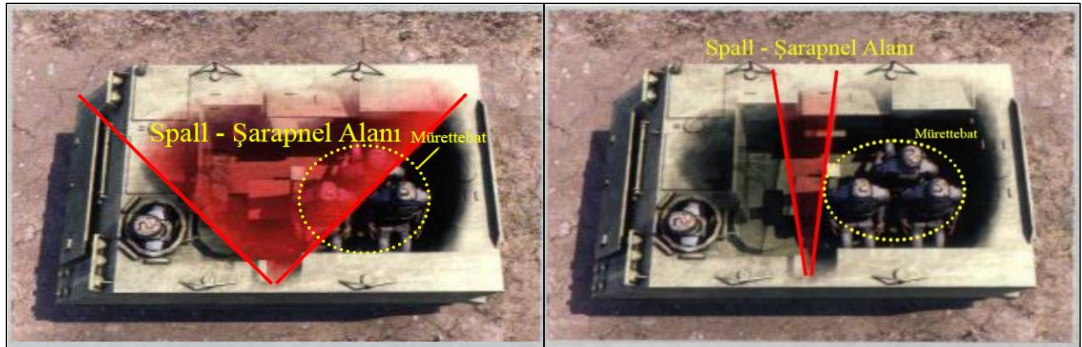
malzemeler, hafif olmaları ve küçük kalibreli mermi ve patlama şarapnellerinden kaynaklanan enerji etkisini emme yetenekleri nedeniyle kullanılır. İyileştirilmiş koruma için seramik plakalar da tüfek atışlarına karşı eklenmiştir.

Araç zırh sistemlerinde ise kompozit malzemeler uzun yıllardır şarapnel etkisi önleyici kaplamalar olarak kullanılmaktadır. Bir şarapnel etkisi önleyici kaplama, bir aracın iç kısmını kaplayarak patlamadan kaynaklanan parçacıkların tamamen içeride kalmasını veya en azından araç içindeki parçacıkların dağılmasını en aza indirerek maksimum sağ kalabilirliği sağlamaktadır. Şekil 4.4'te (Twaron T765[®] 2013 Teijen Aramid baz alınmıştır), bir Spall Liner olarak adlandırılan şarapnel etkisi önleyici kaplamanın balistik bir mermiden nasıl etkilendiğini göstermektedir. Bu hasar konisinin ve oluşturulan parçacıkların miktarının sınırlanmasıyla, saldırıya uğrayan daha fazla personelin hayatta kalma olasılığı artar. Bununla birlikte Şekil 4.5'te (Erbil et al., 2011) bu korumanın araç üzerinde temsil ettiği, personelin bulunduğu kabini koruyan koruyucuda kullanılması halinde etkisi görselleştirilmiştir.



Şekil 4.4 Spall Liner Etkisinin Kıyaslanması- solda, Spall Liner olmadan koruma sağda, Spall Liner ile koruma

Karşılaştırıldığında kompozit kaplamanın koruyuculuğu Spall Liner alanının kapsamının artışı neticesinde gözlemlenmektedir.



Şekil 4.5 Spall Liner – Şarapnel Etkisinin Araç Üzerinde Görselleştirilmesi

Eğer kompozit malzemeler çelik kadar iyi veya daha iyi bir şekilde patlamaya dayanabiliyorsa, çelikten imal edilen V-şekilli gövdeyi kompozit ile değiştirmek, aracın genel ağırlığını azaltabilir veya aynı ağırlık için daha iyi koruma sağlayabilir şeklinde çıkarım yapabiliriz.

Kompozit malzemeler üzerinde patlama etkisinin incelenmesiyle ilgili az çalışma yapılmıştır. Bunlar, düz levhalar kullanılarak ve sayısal simülasyon yazılımlarıyla karşılaştırmalar yaparak gerçekleştirilmiştir. Adamik ve arkadaşları(Adamik et al., 2005), kara mayını patlamasına maruz kalan çelik ve çelik-kompozit kombinasyonundan yapılmış levhalar üzerinde deneyler yapmış ve sonuçları sayısal simülasyonlarla karşılaştırmışlardır. Ancak iki levha arasında bir karşılaştırma yapılmamıştır. Grafiklerden çelik levhanın çelik-kompozite göre önemli ölçüde daha fazla şekil değiştirdiği görülebilmektedir.

Comtois ve arkadaşları ise (Comtois et al., 1999), patlayıcıların polimer matrisli kompozit lamineler üzerindeki etkisine bakmış ve kompozit ile çelik levhalar arasında önemli farklılıklar keşfetmişlerdir. Ayrıca, patlamanın uzak mesafede gerçekleşmesiyle oluşan etkileşimlerinin neden olduğu hasarın sadece zirve basınç değil, aynı zamanda impulsun (itme etkisi) bir fonksiyonu olduğunu da keşfetmişlerdir. Batra (Batra & Hassan, 2008), tek yönlü fiber kompozitlerin patlama direnci üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Ancak sonuçları doğrulamak için çok az deneysel çalışma yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında geçmişte yapılan araştırmalara sayısal ve yine deneysel olmayan bir çıkarım ile katkıda bulunulacaktır. Kara mayını patlamalarının ve zırhlı araçlarda kullanılmak üzere üretilen koruyucu panel plakaların imali ile test düzeneklerinin hazırlanması, Savunma Sanayi alanında uzmanlaşmış firmaların karşılayabileceği cinsten maliyetler ile oluşturulabilmektedir. Çalışmanın ilerleyen yıllarda geliştirilmesi maksatlı deneysel çalışmalar yapılması hedeflenmektedir. 6'ncı bölümde sayısal modellemenin oluşturulması için referans alınan deneysel çalışmalardan ayrıca bahsedilmiştir.

5. ANALİZLERDE KULLANILAN MALZEME TEORİSİ

Genel olarak malzemelerin dinamik yüklemeye karşı karmaşık bir tepkisi vardır ve sonuç olarak aşağıdaki olguların modellenmesi gerekebilir;

- Lineer olmayan basınç
- Pekleşme
- Pekleşme Katsayısı
- Basınç sertleşmesi
- Sıcaklığa bağlı ergime
- Sıkıştırma
- Ortotropi
- Çarpma Hasarı
- Kimyasal enerji çökeltisi
- Çekmeye bağlı hasar teorisi
- Faz değişimleri

Yukarda sayılan parametrelerin modellenmesi genellikle dört farklı bileşene ayrılabilir; durum denklemi (Equation of State- EOS), malzeme dayanımı modeli, malzeme hasar modeli, erozyon.(Follett et al., 2011)

Durum denklemi, malzemelerin yoğunluk, basınç ve özgül enerji arasındaki ilişkiyi ifade ederek bir malzemenin hidrodinamik tepkisini tanımlamaktadır.

$$p=f(v,T) \quad (5.1)$$

Tanımlanan denklemde, hidrostatik basıncı temsil eden p , spesifik hacim olan v ve T sıcaklık olarak geçerlidir. Sıvılar ve gazlar için bu, kayma dayanımına karşı direnç gösteremedikleri için malzemenin birincil tepkisidir ve sonuç olarak dinamik yüklemeye tepkileri kesinlikle hidrodinamiktir. Bu aynı zamanda, hidrodinamik basınç

malzemenin akma geriliminden çok daha büyük olduğunda, yüksek deformasyon hızına sahip katıların birincil tepkisidir. (Follett et al., 2011)

5.1 Johnson-Cook Malzeme Modeli

Metal işleme süreçleri ve plastik kararsızlık sorunları, malzemelerin şekil değiştirmede pekleşme davranışı tarafından etkilenmektedir. Büyük plastik şekil değişimlerinde pekleşme önemlidir. Birçok plastisite problemi için, malzemenin pekleşme davranışı tamamen malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile karakterize edilir. Plastisite teorisi, genellikle hız bağımlı veya bağımsız gibi hesaplama çözümlerinde kullanılır. Şekil değiştirme hızından etkilenen hız bağımlı bir model, dayanım yasasıdır. Bu, nominal sıcaklıkla ilgili birçok metal için geçerlidir.(Johnson, 1983)

Johnson-Cook malzeme modeli (Johnson, 1983), çarpma ve metal penetrasyonunda gözlemlenen birkaç önemli malzeme tepkisini çoğaltan fenomenolojik bir modeldir. Yani, geleneksel plastisite teorisine dayanmaz. Üç temel malzeme tepkisi şekil değiştirmede sertleşme, şekil değiştirme hızı etkileri ve termal yumuşama'dır. Bu üç etki, Johnson-Cook dayanım modelinde çarpanlı bir şekilde birleştirilir. (Denklem 5.3'te gösterilmiştir (Johnson, 1983)) Bu malzemede akma gerilimi eşdeğer gerilimden yüksek olduğunda, doğrusal bir elastik gibi davranır. Bununla birlikte, malzeme, daha yüksek stres değeri için bir plastik görevi görür. Bu malzeme teorisi tuğla, kabuk, kolon ve kiriş elemanlarını içerir.(Schwer, 2007)

Bu projede çeliği (AISI 4340) modellemek için doğrusal durum denklemi kullanılmıştır. Lineer hal denklemi en basit şeklidir ve basıncın iç enerjiden bağımsız olduğu ve malzeme yoğunluğundaki değişikliklerin küçük ve geri dönüşümlü olduğu varsayılarak belirlenebilir. Durum denklemi 'nın bulk modülü ve sürtünme katsayısı olarak tanımlanır.

$$p(\rho)=K\mu \quad (5.2)$$

Metaller için ampirik bir kurucu model olan Johnson- Cook(J-C) modeli, bilim camiasında geniş kabul görmüştür. Çeşitli metaller üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan geliştirildiğinden, daha düşük gerinim hızlarında ve hatta yarı statik

rejimlerde bile geçerliliğini korumuştur.(Murthy & Santhanakrishnan, 2020) Bu nedenle bu çalışmada simülasyonlar için J-C modeli seçilmiştir:

$$\sigma_Y = \left[A + B(\epsilon_{eff}^p)^N \right] (1 + C \ln \dot{\epsilon}) [1 - (T_H)^M] \quad (5.3)$$

ϵ_{eff}^p Denklem 5.3'te efektif plastik şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. A, B ve N katsayılarının tanımlanması için şekil değiştirme oranı $\dot{\epsilon}_0$ olarak gösterildiğinde aşağıdaki gibi gösterilmektedir;

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{\dot{\epsilon}_0} \quad (5.4)$$

Salt erime – benzeşik sıcaklık T_H bu modelde Denklem 5.5'te gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Kara mayını patlamaları, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen reaksiyonları içeren bir eylem ve bu eylemin etkilendiği koruyucu gövdenin yapıldığı malzeme neticesinde malzeme modelinde bu parametre dikkate alınmış, buna uygun şekilde modellenmiştir.

$$T_H = \frac{T - T_R}{T_M - T_R} \quad (5.5)$$

Denklemden tanımlanan T_M erime sıcaklığı ve T_R , A, B ve N katsayılarının tanımlanması için verilen referans sıcaklık olarak düşünülmüştür. Denklem 5.3 ifade edilen J-C malzeme modelinde ilk parantez içi terim akma geriliminin gerinim sertleşmesini temsil ederken, sonraki terim yüksek gerinim hızlarında akma gerilimindeki artışı modeller ve son parantez içi terim de yerel termal etkiler nedeniyle akma geriliminin yumuşamasını göstermektedir. Sıcaklık değişimi;

$$\Delta T = \frac{1}{\rho C_p} \int \sigma d\epsilon_{eff}^p \quad (5.6)$$

ρ kütle yoğunluğu ve C_p spesifik sıcaklık katsayısı olarak verilen denklemde tanımlanabilmektedir. Johnson-Cook modelinin yukarıdaki akma dayanımı kısmı beş parametreye sahiptir: A, B, N, C ve M katsayıları olmak üzere ayrıca ρ , C_p ve T_M katsayılarıyla üç farklı malzeme karakteristiğine sahiptir.

5.2 Cowper-Symonds Malzeme Modeli

Cowper-Symonds malzeme modeli (Cowper & Symonds, 1957), plastik deformasyonlar uygulandığında malzemelerin güçlendiği, basit bir elasto-plastik, gerinim sertleşmesi, gerinim hızı sertleşmesi modelidir. Bu davranış, çalışma sertleşmesi veya pekleşme olarak bilinmektedir. Cowper-Symonds malzeme modeli, akma dayanımı (σ_Y) iki faktörle ölçeklendirir bunlar Denklem 5.7’de gösterildiği gibi bir gerinim faktörü ve bir gerinim oranı faktörüdür.

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \right] \quad (5.7)$$

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}} \quad (5.8)$$

Bu denklemde σ_0 ilk akma gerilimi iken $\dot{\epsilon}$ yine gerinim hızı olarak tanımlanabilir, C ve P Cowper-Symonds gerinim hızı parametreleridir. β izotropik ve kinematik pekleşme katkısını temsil eden pekleşme katsayısıdır. Denklem 5.8’de tanımı yapılan E_p , elastisite modülü E ve teğet elastisite modülü E_{tan} cinsinden verilen plastik sertleşme modülüdür.

Cowper-Symonds modeli fenomenolojik bir malzeme denklemidir, dolayısıyla parametrelerin deneysel gözlemlerden belirlenmesi gerekir. Sonuç olarak, malzeme modelinin performansı, parametrelerin uydurulduğu deneysel verilere dayanır. (Holmquist, T.J ; Johnson, 1991)

Akma geriliminin sabit parametrelerle değiştirildiği gerinim hızına bağlı fenomenolojik modellerin olağan konfigürasyonunu gösterir. (Hernandez et al., 2013)

Bu sebeple Cowper-Symonds modeli, önerilen dinamik malzeme karakterizasyonunun performansını ve belirli bir malzeme modelinin malzeme parametrelerini belirleme yeteneğini göstermek için iyi bir örnektir.

5.3 Kompozit Malzeme Modeli

Kompozit malzemeler ortotropiktir, bu nedenle ana yönlerde farklı özelliklere izin veren bir malzeme modeli esastır. Ortotropik durum denklemi, bir dizi ortotropik oluşturucu ilişki aracılığıyla tam da bunu yapar. Bu malzemeler için bu kurucu ilişkiler, toplam gerilimin hidrostatik ve deviatorik bileşenlere bölünmesinin aksine, tamamen gerilime dayalı bir formülasyondur. (Follett et al., 2011) Artımlı gerilim-gerinim (şekil değiştirme) ilişkileri şu şekilde ifade edilebilir:

$$[\sigma]^{n+1} = [\sigma]^n + [C] [\dot{\epsilon}] \Delta t \quad (5.9)$$

$[C]$ rijitlik matrisini tanımlarken, $[\dot{\epsilon}]$ şekil değiştirme oranı tensörü ve Δt zaman değişimini göstermektedir. Ortotropik bir malzeme için doğrusal elastik yapısal ilişkiler şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Denklem 5.11’de gösterilen rijitlik matrisinin tersi uyum matrisi olarak bilinir ve şu şekilde ifade edilir:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

E_{ij} Young Modülü olduğu denklemde G_{ij} kayma modülü ve ν_{ij} Poisson oranı olarak verilmiştir, burada ν_{ij} , i yönünde gerildiğinde j yönündeki enine gerilme olarak tanımlanır:

$$\nu_{ij} = - \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (5.12)$$

Bu çalışma için uygulanan hata modeli, malzeme gerilim-gerinim modeliydi. Bu, kullanıcının aşağıdaki hata gerilimlerini ve gerinimlerini girmesine izin verir (Follett et al., 2011):

- Çekme hasarı gerilimi 11, 22 ve 33
- Maksimum kayma gerilimleri 12, 23 ve 31
- Çekme hasarı gerinimleri 11, 22 ve 33
- Maksimum kayma gerinimleri 12, 23 ve 31

Teoride ana malzeme gerilmelerinden veya gerinimlerinden herhangi biri bu değerleri aşarsa hata modu başlatılır. Çalışmanın Ls-Dyna üzerinden modellendiği bölümünde malzeme kartları ile birlikte detaylı parametreler de paylaşılmıştır.

6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), onlarca yıldır oldukça sık ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, otomotiv, havacılık ve uzay ile tüm mühendislik endüstrisinde tasarım ve geliştirme için son derece kullanılmaktadır.(Bathe, 2007)

Farklı mühendislik problemlerini çözmek için bu yöntemde ısı transferi, katı mekaniği, akıcı dinamiği, yapısal mekanik, akustik ve elektromanyetik problemler analiz edilebilir. Mühendisler ve bilim adamları, sistemlerini modellerken sonlu elemanlar yöntemini tercih ederler çünkü, karmaşık sistemin çözümünde verimli bir yaklaşım gerçekleştirmek için önemli bir matematiksel yaklaşımdır.(R.Cook, 1995)

Ayrıca, gerçek hayatta maliyet, güvenlik ve tasarım felaketlerini önlemenin yanı sıra genellikle tasarım parametrelerinde rol oynar. Sonlu elemanlar methodu, yapıdaki öğeler için polinom enterpolasyonu kullanırken, minimizasyon işlemi sırasında her düğüm (node) için denklemler kullanır. Denklem 6.1 (R.Cook, 1995), düğümler için kuvvet ve yer değiştirme denklemlerini göstermektedir. **D** düğümlerdeki davranış ve bilinmeyenlerin vektörü, **K** sertlik matrisi, **R** bilinen uygulanan kuvvetleri ve bilinmeyen reaksiyon kuvvetlerini içeren bir yük vektörüdür.

$$R=KD$$

(6.1)

Sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal, doğrusal olmayan, burkulma, dinamik, termal ve yorulma analizleri yapılabilir.(Altair, 2019)

Kafes elemanların eleman matrisleri, iki boyutlu düzlem gerilme-gerinim, aksenal simetrik elemanlar ve üç boyutlu elemanların değişken sayıda düğüm noktası vardır (Bathe, 2007). Eleman tipi seçimi üç farklı koşula bağlıdır. Bunlar geometri (boyut ve şekil), analiz türü, proje için ayrılan süre.(Altair, 2019)

Tablo 6.1 Eleman Tipleri

Özellikler	1B Eleman	2B Eleman	3B Eleman
Eleman Geometrisi	Çizgi- Line	Quad-Tria	Tetra, Penta, Hex
İlave Bilgi	Kesit Alanı	Kalınlık	-
Eleman Tipi	Takviye Çubuğu (Rod), Kiriş, Boru	Kabuk, Plaka, Membran, Tabaka Gerilmesi, Tabaka Gerinimi	Katı
Boyutlandırma	Bir Boyut Diğerlerinden Daha Büyüktür.	İki Boyut Üçüncüden Çok Daha Büyüktür.	Tüm Boyutlar Karşılaştırılabilir

6.1 Explicit Çözüm Teorisi

Esnek nesnelerin hareketi, katı nesnelerin aksine, nesne içinde noktadan noktaya değişebilir. Bu tür nesnelerin her noktadaki hareketi veya davranışı bir diferansiyel denklem ile tanımlanır.(Altair, 2019)

Explicit çözüm teorisi rijitlik matrisini hesaplanmaz, zamana bağlı problemlerin çözümü için hesaplamalar yapar. Düşük zaman aralıklarında gerçekleşen eylemler için (patlama, çarpma, devrilme vb.) sonlu elemanlar analizleri merkezi farklılık methodunu kullanarak hesaplama yapar. (Kaptanoğlu & Küçük, 2014)

LS-DYNA, akışkanlara bağlı yapılar dahil olmak üzere yapıların büyük deformasyon statik ve dinamik tepkisini analiz etmek için genel amaçlı bir sonlu eleman yazılımıdır. Ana çözüm metodolojisi, explicit zaman entegrasyonuna dayanmaktadır. Her eleman türü için çeşitli eleman formülasyonları mevcuttur. Hava yastıkları, sensörler ve emniyet kemerleri için özel yetenekler, LS-DYNA'yı otomotiv endüstrisindeki uygulamalar için uyarlamıştır. (Ls-Dyna, 2018)

Tablo 4'te zamana bağlı fonksiyon ile problem çözüm yaklaşımı explicit teorisi ve zamandan bağımsız fonksiyon ile analiz yaklaşımı olan implicit teorisi farkları gösterilmiştir. Çalışmamızda hem statik hem dinamik yükler altında analizler yapılmıştır.

Tablo 6.2 Explicit ve Implicit Çözüm Karşılaştırması

Explicit Çözüm	Implicit Çözüm
Duruma Bağlı Stabilité	Sürekli Stabil
Düşük Zaman Aralıkları	Yüksek Zaman Aralıkları
Diagonal Matris $([M])^{-1}$	Simetrik Olmayan Matris $([M] + \alpha[K])^{-1}$
Düşük Hafıza	Yüksek Hafıza
Dinamik ve şok problemler	Dinamik ve statik problemler
Lokal Çözüm	Her adımı doğrulama ihtiyacı
Yüksek Sistem Dayanıklılığı	Düşük Sistem Dayanıklılığı
Düşük Maliyet	Çok Yüksek Maliyet

Explicit bir dinamik teorisi tarafından çok sayıda küçük zamanlı artış gerçekleştirilir. Merkezi farklılık - zaman entegrasyonu teorisi, explicit analizde resmi olarak kullanılmaktadır. Geçici dinamik denge aşağıda gösterilmiştir. **K** rijitlik matrisidir, **M** kütle matrisidir ve **C** sönümleme(damper) matrisidir. (Ls-Dyna, 2018)

$$[M]\{\ddot{u}\}+C\{\dot{u}\}+K\{u\}=\{F_{ext}(t)\}$$

(6.2)

Eleman gerilmeleri, plastik gerinimler, temas kuvvetleri, kinetik, potansiyel ve genel enerji emilimi, yer değiştirme, hız ve ivme ile yeniden üretilebilir. (Ls-Dyna, 2018)

6.1.1 Explicit Yöntem Zaman Entegrasyonu

Dinamik problemler çözölürken dikkat edin sonlu elemanlar yöntemi sadece mekansal ayrıklaştırma için kullanılır. Zaman ayrıklaştırma, sonlu farklar yöntemiyle hesaplanır. Uzak-zaman sonlu eleman kavramı bir başarısızlık olduğu için bu teoriye yarı ayrık Galerkin adı verildi. Denklemler 6.3-15'te, zaman entegrasyon yöntemi gösterilmektedir. (Ls-Dyna, 2018)

6.1.1.1 Düğümler (Node) Üzerinde Döngü

$$\ddot{x}_n = \frac{f_{ext}(t_n) - f_{int}(t_n)}{m} \quad (6.3)$$

$$\dot{x}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{x}_{n-\frac{1}{2}} + \ddot{x}_n \Delta t \quad (6.4)$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t \quad (6.5)$$

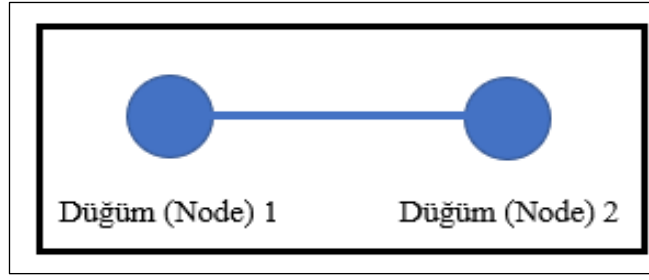
- f_{ext} = Dış Kuvvet, f_{int} = İç Kuvvet

6.1.1.2 Elemanlar Üzerinde Döngü (Gerilme Hesabı)

Gerinim aşağıdaki 6.6 ve 6.7 numaralı denklemlerle tanımlanabilir ve hesaplamanın görselleştirilmesi şekil 15'te yapılmıştır.

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (6.6)$$

$$\epsilon_{n+1} = \frac{x_2^{n+1} - x_1^{n+1}}{l_0} - 1 \quad (6.7)$$



Şekil 6.1 Eleman Üzerinden Döngü Hesaplaması

Gerilme ise 6.8, 6.9 ve 6.10 denklemlerinde gösterildiği üzere tanımlanmaktadır.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.8)$$

$$\sigma_{n+1} = E \cdot \varepsilon_{n+1} \quad (6.9)$$

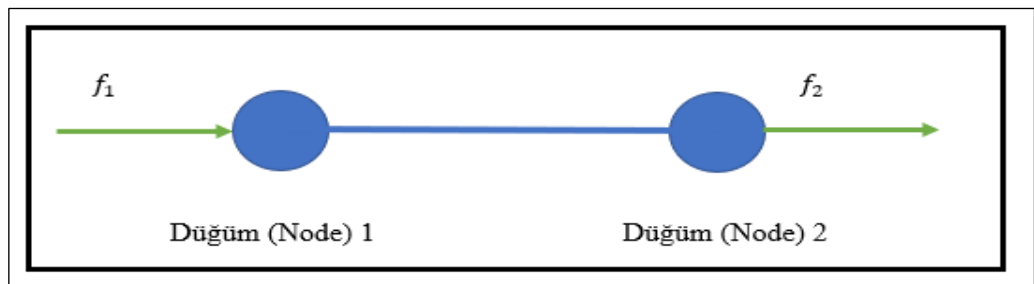
$$\sigma_{n+1} = E \left[\frac{x_2^{n+1} - x_1^{n+1}}{l_0} - 1 \right] \quad (6.10)$$

6.1.1.3 Düğüm Kuvvetleri

Düğüm (nodal) kuvvetler ise Denklem 6.11 ve 6.12 tanımlanıp, Şekil 16'da görselleştirilmiştir.

$$f_1^{n+1} = -A\sigma^{n+1} \quad (6.11)$$

$$f_2^{n+1} = -A\sigma^{n+1} \quad (6.12)$$

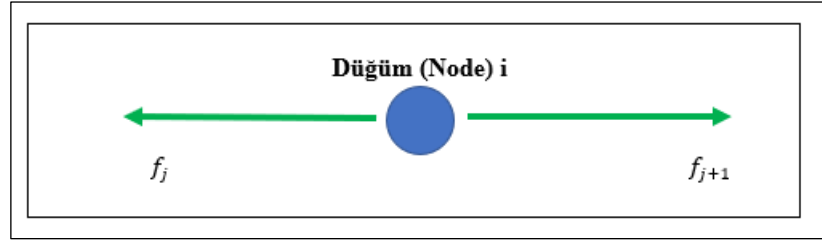


Şekil 6.2 Düğüm (Nodal) Kuvvetler

6.1.1.4 Düğümlerde Oluşan Bileşke Kuvvet

Bir  nceki başlık altında toplanan denklemler aracılığıyla bileşke kuvveti Denklem 6.13'te tanımlayabiliriz.

$$f_i(t_{n+1}) = \sum_j f_j(t_{n+1}) \quad (6.13)$$



şekil 6.3 Bileşke Kuvvetler

Bu denklemler ışığında, eleman zaman adımı ve düğüm zaman adımı tanımlandığımızda aşağıdaki denklemleri elde etmiş oluruz.

$$\Delta t_e = \frac{1}{c} = \frac{1}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (6.14)$$

$$\Delta t_n = \sqrt{\frac{2m}{k}} \quad (6.15)$$

Kontaklar, farklı yüzeyler arasında bir ilişki oluşturur. Kontaklar, sert yaylar gibi davranır ve simülasyon sırasında zaman adımı kontrol edebilirler. Explicit  z m için $\Delta t < \Delta t_{critical}$. Bu nedenle, Δt_{cr} , Denklem 6.16'de gösterilmektedir. (Ls-Dyna, 2018)

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (6.16)$$

6.1.1.5 Enerji Dengesi

Kabuk (shell) eleman özelliği gereği, eleman merkezinde tek bir entegrasyon noktasına sahiptir. Düşük entegrasyonlu elemanlar hesaplama maliyetini ve eleman sertliğini azaltır. Bu nedenle tahmin edilen gerilme değerleri daha hassas hesaplanır.(Stewart et al., 2006) Ek olarak eleman ile kum saati (hourglass) olarak adlandırılan problem ortaya çıkmaktadır. Bazı deformasyon modlarında elemanın düğüm noktaları deforme olmasına rağmen tek bir entegrasyon noktasında hesaplanan iç enerji ve toplam kuvvet sıfırdır. Bu durum sıfır enerji modu veya kum saati (hourglass) modu olarak adlandırılır. Simülasyon programı kum saati (hourglass) deformasyonunu telafi etmek için kuvvet uygular. Bu, sistemdeki iç enerji anlamına gelir ve sistem üzerinde yapay bir kuvvet artışı gözlemlenebilir. Toplam kum saati (hourglass) enerjisi, toplam enerjinin %10'undan daha düşük olmalıdır. Ancak bu değer %10'un üzerinde ise sonlu eleman modeli yeniden çalışılmalı veya eleman kalitesi ele alınmalıdır.(Ls-Dyna, 2018)

$$\frac{\text{Kum Saati (hourglass) Enerjisi} + \text{Kontak Enerjisi}}{\text{Toplam Enerji}} \leq \%15 \quad (6.17)$$

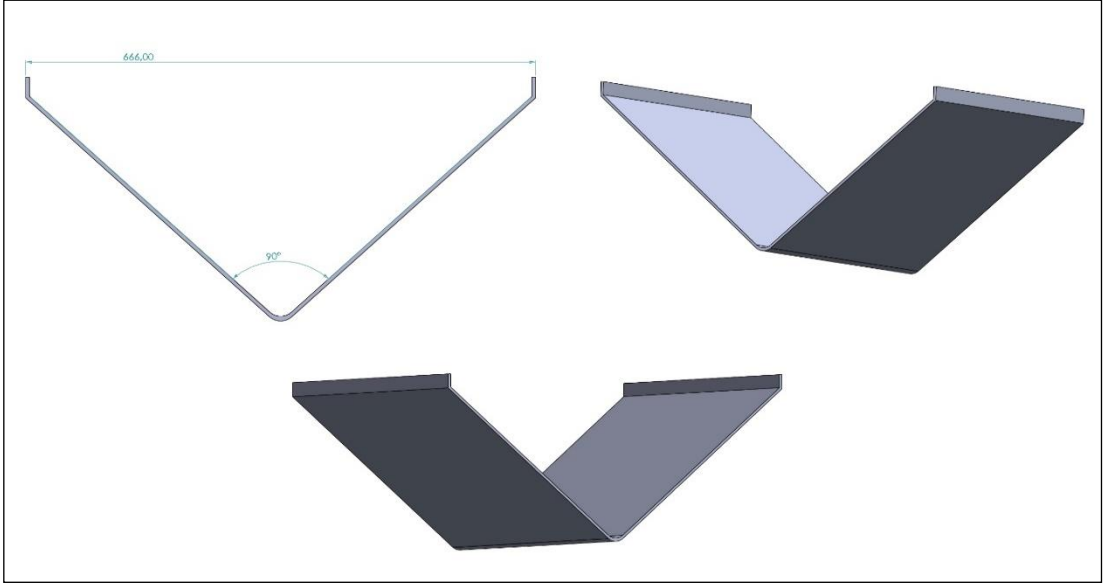
Yükleme sırasında simülasyona enerji eklenir. Bu harici iş anlamına gelir. Dış iş kinematik ve iç enerjiye dönüştürülür. Toplam enerji dış işe eşittir. Ls-Dyna programında, hesaplama denklemindeki enerji hatası bir yüzdendir. Enerji hatası negatif değerdeyse, bir miktar enerjinin yayıldığı anlamına gelir. Ancak, enerji hatası pozitif ise, sonlu elemanlar modelinde bir enerji oluşumu vardır. (Ls-Dyna, 2018)

$$\text{Hata} = 100 \left[\frac{E_k + E_{kr} + E_i}{E_{k1} + E_{kr1} + E_{wk} - E_{wk1}} - 1 \right] \quad (6.18)$$

$$-5\% < \text{Enerji Hatası} < 0 \quad (6.19)$$

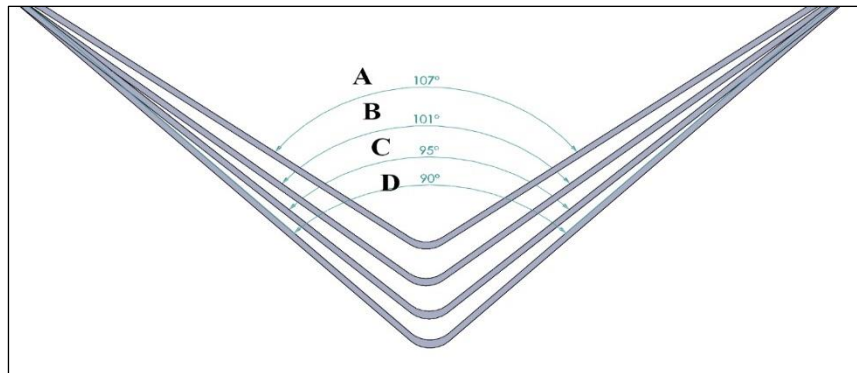
7. LS-DYNA PROGRAMI İLE NUMERİK MODELLEME

Numerik modelleme ve buna referanslı olarak çalıştırılan analizler öncesinde, tez çalışmasında kullanılan referans geometri Solidworks programında üç boyutlu modellenerek Ls-Dyna programına aktarılmıştır. Şekil 7.1’de referans alınan üç boyutlu geometrilerin görseli yer almaktadır.



Şekil 7.1 3B Model Görselleri (Görselde ilk açı referansı olan 90 derecelik modele yer verilmiştir)

Hem çelik hem de kompozit malzeme için aynı referans açı parametreleri kullanarak sırasıyla 90, 95, 101 ve 107 derece olacak şekilde Şekil 7.2’de görselleştirilmiştir.

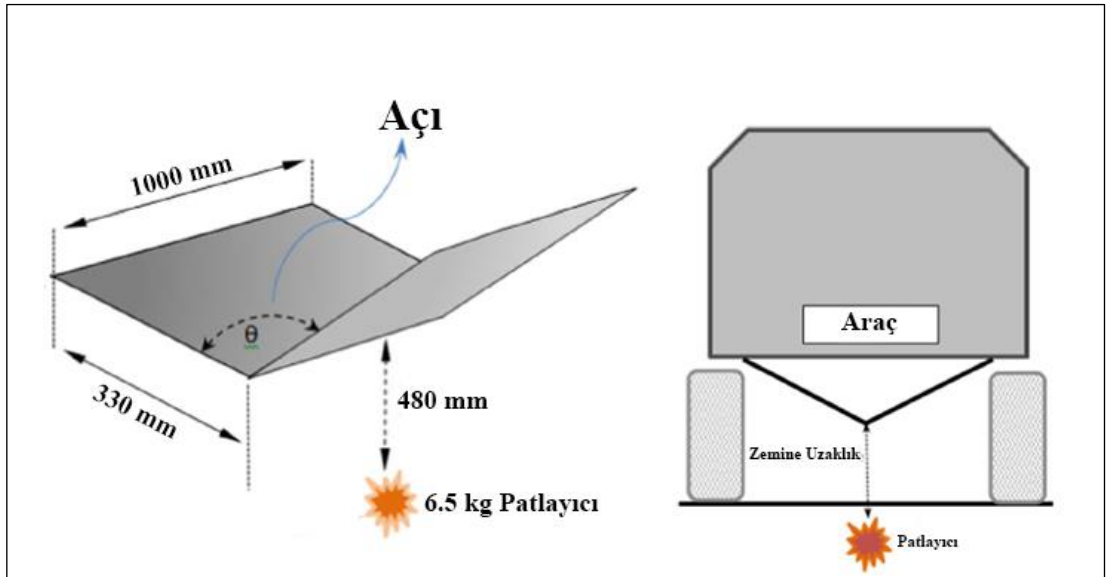


Şekil 7.2 Referans Açı Parametrelerini Gösteren 3B Model Karşılaştırması

Üç boyutlu modeller AISI 4340 çeliği, S2 Glass ve E Glass kompozit malzemelere uygulanacak şekilde modellenerek Şekil 7.3'te (Markose & Rao, 2017) yer alan simülasyon konsepti doğrultusunda modellenmiştir. Çelik malzeme için oluşturulan modelin 5 mm kalınlığa sahipken, kompozit malzemeler için oluşturulan model 22 mm kalınlık ile analiz koşullarında test edilmiştir. Tablo 7.1'de analizlerde kullanılan çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 7.1 Analizde simule edilen durum çalışmaları

Durum Çalışmaları			
Plaka Adı	Malzeme	Açı	Zemine Uzaklık [mm]
A	AISI4340	107	480
B	AISI4340	101	480
C	AISI4340	95	480
D	AISI4340	90	480
A	S2 Glass	107	480
B	S2 Glass	101	480
C	S2 Glass	95	480
D	S2 Glass	90	480
A	E Glass	107	480
B	E Glass	101	480
C	E Glass	95	480
D	E Glass	90	480



Şekil 7.3 Simülasyon konsepti ve parametreleri

7.1 Ağ Yapısı (Mesh) Doğrulama

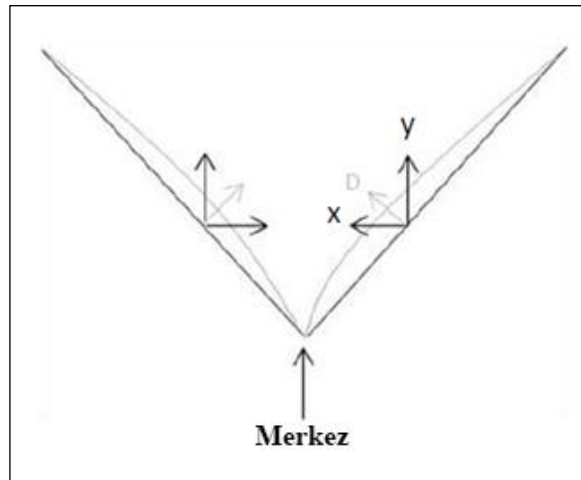
Sonlu elemanlar metodu doğrultusunda hesaplama yapan paket programlar, bu metod gereği hesaplama yapılacak üç boyutlu modeli belli eleman tiplerine göre parçalara ayırmaktadır. Bu ayırma işlemi sonrası üç boyutlu geometride oluşturulan düğümler (node) bir ağ yapısını (mesh) meydana getirmektedir.

Analizde kullanılmak üzere ağ yapısı (mesh) eleman boyutu, referans alınan deneysel çalışmadaki çelik malzeme sonuçları kullanılarak atanmıştır. Follet'in çalışmasında, modellemede kullanılan aynı yapıya ve malzemeye sahip çelik V-Şekilli Panel Plakanın, simülasyon ile aynı şartlarda meydana gelen patlama sonrası deney sonuçları Tablo 7.2'de verilmiştir.(Follett et al., 2011)

Tablo 7.2 Deney Çalışması Sonucu Vide Kesitinden Alınan Değerler

Video Kesitinden Alınan Değerler		
Plaka	Malzeme	Merkez yönü deformasyon [mm]
A	AISI4340	43
B	AISI4340	57
C	AISI4340	60
D	AISI4340	36

Bu değerlerden yola çıkılarak oluşturulan analiz modelinde sırasıyla 5,8,10 ve 20 mm boyutlarında elemanlar kullanılarak D plakası için patlama simüle edilmiştir.

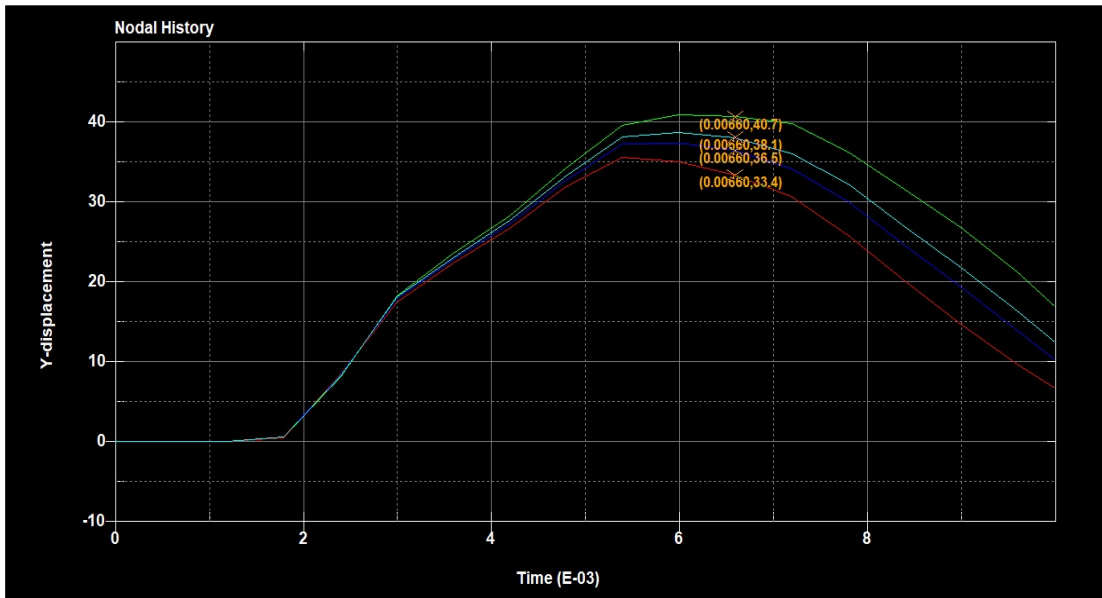


Şekil 7.4 Referans Düzlemler

Analiz sonucunda Şekil 7.4'te (Follett et al., 2011) verilen referans düzleme göre yine merkez yönünde elde edilen deformasyon değerlerine bakıldığında yaklaşık sonucun 5 mm eleman boyutuna sahip ağ yapısında elde edildiği gözlemlenmiştir. Tablo 7.3 analiz sonuçlarında elde edilen değerleri, Şekil 7.5 ise Zaman-Deformasyon grafiğini göstermektedir.

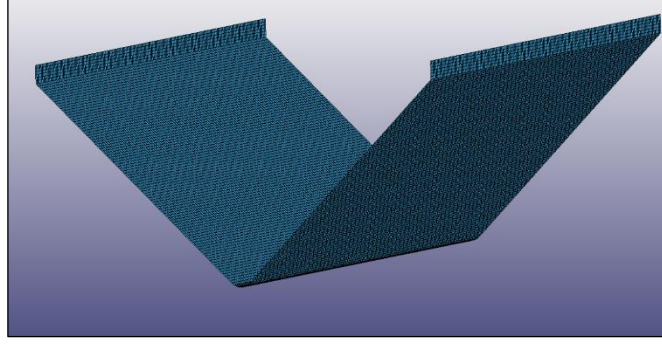
Tablo 7.3 D Plakasının Maruz Kaldığı Patlama Sonucu Elde Edilen Veriler

Ağ Yapısı (Mesh) Boyutu (mm)	Deformasyon (Merkez) (mm)
5	36.5
8	38.1
10	40.7
20	33.4



Şekil 7.5 Eleman Boyutuna Kıyasla Elde Edilen Zaman-Deformasyon Grafiği

Yapılan analiz sonucunda ağ yapısı (mesh) eleman boyutu doğrulaması gerçekleştirilerek diğer koşulları simule etmek maksatlı model üzerinde 5 mm eleman boyutu ile ilerlenmesine karar verilmiştir.



Şekil 7.6 5 mm Mesh Eleman Boyutuna Sahip Model

7.2 Malzeme Modelinin Oluşturulması

Ls-Dyna programında ağ yapısı (mesh) doğrulama için kullanılan model, çelik malzeme parametreleri uygulanarak analiz edilmiştir. 5'inci bölümde aktarılan Johnson-Cook malzeme teorisi, programın malzeme modeli oluşturmada kullandığı yöntemlerden biridir. Bu doğrultuda kullanılan parametreler Tablo 7.4'te (Murthy & Santhanakrishnanan, 2020) verilmiştir.

Tablo 7.4 AISI 4340 Çeliği için Johnson-Cook Parametreleri

Malzeme	A [MPa]	B [MPa]	n	c	m	
AISI 4340	792	510	0.26	0.014	1.03	
T_m (C)	T_r (C)	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
1519.9	22	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61

Parametreler 5'inci bölümde aktarıldığı şekilde A,B,n,c ve m spesifik denklem katsayıları iken, T_m erime sıcaklığı ve T_r oda sıcaklığına karşılık gelmektedir. Ayrıca, programada tanımlanan D katsayısına bağlı parametreler ise Denklem 7.1'de verilen gerinim kırılımını oluşturulan hata parametrelerini temsil etmektedir.

$$\varepsilon^f = \max. \left([D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*] [1 + D_5 T^*], EFMIN \right)$$

(7.1)

Denklemden yer alan σ^* değeri, basınç ve efektif gerilimin birbirine oranını temsil etmektedir. Efektif plastik gerinin değerinin değişiminin, gerinim kırılımına oranının

toplamı ise kırılımın gerçekleştiği durumda hata parametresini tanımlamaktadır. (Ls-Dyna, 2018)

Johnson/Cook gerinim ve sıcaklığa duyarlı plastiklik bazen gerinim oranlarının geniş bir aralıkta değiştiği ve plastik ısınmadan kaynaklanan adyabatik sıcaklık artışlarının malzemenin yumuşamasına neden olduğu problemler için kullanılır.(Ls-Dyna, 2018) Bu modelin Ls-Dyna programında karşılığı olan MAT_015 veya diğer adıyla MAT_JOHNSON_COOK malzeme kartı kullanılarak parametreler analizde tanımlanmıştır.

Çelik malzemeye ek olarak analizlerde kullanılan E-Glass ve S2-Glass fiber kompozit malzemeler için programda patlama şartlarına en uygun parametreleri kapsayan MAT_054-055 diğer adıyla MAT_ENHANCED_COMPOSIT_DAMAGE yani geliştirilmiş kompozit hasarı malzeme kartı kullanılmıştır.

MAT55 kartı ortotropik malzemeleri işlemek için, örneğin tek yönlü kompozit laminalar, özel olarak tasarlanmıştır. (Feraboli et al., 2011)

Tez çalışmamızda çoğu Ls-Dyna içeriğinden bahsedilirken kullanılan teori kılavuzu bu kart hakkında çok fazla açıklama içermemektedir. Bu sebeple Feraboli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan daha detaylı bir biçimde aktarılan parametreler Tablo 7.5’de gösterilmiştir.(Feraboli et al., 2011)

Tablo 7.5 MAT55 Malzeme Kartı Parametre Açıklamaları

Değişken	Açıklama
MID	Malzeme tanımlama sayısı
RO	Yoğunluk
EA	Boylamsal Eksen Yönü Young Modülü
EB	Enine Eksenel Yönlü Young Modülü
PRBA	Poisson Oranı 2-1 yönü
PRCA	Poisson Oranı 3-1 yönü
PRCB	Poisson Oranı 3-2 yönü
GAB	Kayma Modülü 1-2 yönü
GBC	Kayma Modülü 2-3 yönü
GCA	Kayma Modülü 1-3 yönü
KF	Bulk Modülü
AOPT	Malzeme eksenleri opsiyon parametresi = 2
A1 A2 A3	AOPT = 2 tanımlama için gerekli vektör parametreleri
MANGLE	Malzeme açısı
V1 V2 V3	AOPT = 3 tanımlama için gerekli vektör parametreleri
DFAILT	Fiber Gerilim maksimum deformasyon
DFAILC	Fiber Basma maksimum deformasyon
D1 D2 D3	Malzeme eksenleri opsiyon parametresi = 2
DFAILM	Matris gerinimi için Maksimum gerinim değeri
DFAILS	Maksimum Kayma Gerinimi
EFS	Efektif gerinim
XC	Boylamsal Eksen Yönlü Basma Dayanımı
XT	Boylamsal Eksen Yönlü Çekme Dayanımı
YC	Enine Eksenel Yönlü Basma Dayanımı
YT	Enine Eksenel Yönlü Çekme Dayanımı
SC	Kayma Dayanımı
CRIT	Hata kriteri (MAT55 Tsai Wu)

Elastik bölgede, MAT55'teki malzeme gerilme-gerinim eğrileri fiber (1-yönlü), matris (2-yönlü) ve kayma (1-2 yönü) tarafından verilmektedir:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} (\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2) \quad (7.2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2} (\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1) \quad (7.3)$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \sigma\tau_{12}^3 \quad (7.4)$$

Elastik bölgenin ötesinde MAT54, münferit tabaka (ply – kompozit malzeme modelinde 0.55 mm’lik 44 ply kullanılmıştır) hata değerini belirlemek için Chang-Chang hata kriterini (Chang & Chang, 1987)kullanır. XT fiber çekme dayanımı, XC fiber basma dayanımı, YT matris çekme dayanımı, YC matris basma dayanımı ve SC tek yönlü tabaka kesme dayanımıdır. Bu girdi parametreleri, tek yönlü laminanın test edilmesi yoluyla ölçülebilir. Tüm bu büyüklüklerin 1-yönünün elyaf yönü, 2-yönünün ise matris yönü olduğunu varsaydığı unutulmamalıdır. MAT54 ve MAT55 arasındaki tek fark, ikincisinin Tsai-Wu hata kriterini kullanmasıdır. Bu bağlamda analizde tanımlanacak S2 Glass kompozit malzeme için Tablo 7.6’da verilen MAT55 malzeme kartı parametreleri girilmiştir. (Berk et al., 2016)(Tasdemirci et al., 2012)

Tablo 7.6 S2 Glass MAT55 malzeme kartı parametreleri

Değişken	Açıklama
MID	2
RO	1.85 g/cm ³
EA	20260 MPa
EB	30310 MPa
PRBA	0.12
PRCA	0.18
PRCB	0.18
GAB	4300 MPa
GBC	2140 MPa
GCA	2140 MPa
XC	291 MPa
XT	604 MPa
YC	426 MPa
YT	590 MPa
SC	99 MPa
CRIT	55

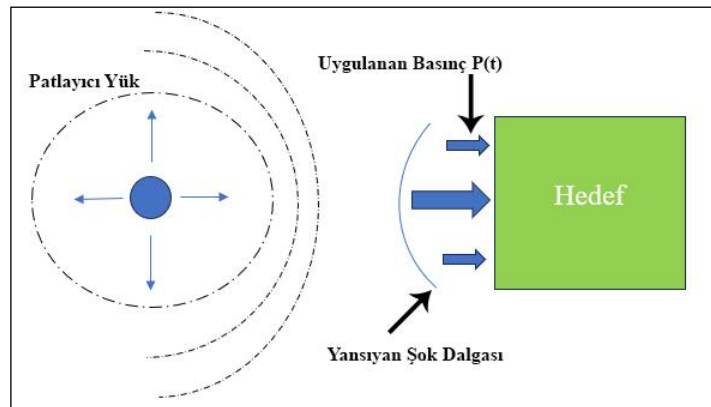
Aynı şekilde analizde simule edilen diğer malzeme olan E-Glass fiber kompozit için de MAT55 malzeme kartı parametreleri Tablo 7.7’de verilmiştir. (Jordan et al., 2014)

Tablo 7.7 E Glass MAT55 malzeme kartı parametreleri

Değişken	Açıklama
MID	2
RO	2.107 g/cm ³
EA	29151 MPa
EB	29151 MPa
PRBA	0.078
PRCA	0.109
PRCB	0.288
GAB	1540 MPa
GBC	1671 MPa
GCA	1671 MPa
XC	131 MPa
XT	131 MPa
YC	531 MPa
YT	531 MPa
SC	50
CRIT	55

7.3 Çözüm Yöntemi

Bir patlayıcının infilakı enerjiyi serbest bırakarak çevredeki havada bir şok dalgası tarafından yönetilen bir patlama dalgası sistemine dönüşen basınç bozulmalarına neden olur. Bu yansıyan basınç uygulanan patlama yükü haline gelir.(Slavik et al., 2012)



Şekil 7.7 Patlama Yükünün – Yansıyan Şok Dalgasına Etkisi

Ls-Dyna programında patlayıcı yükler 3 farklı sayısal çözüm yöntemi ile hesaplanmaktadır. Bunlar sırasıyla, CONWEP, ALE ve CONWEP-ALE yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. (Erdik et al., 2014)

Bunlardan ilki olan CONWEP çözüm yöntemi Ls-Dyna içersine doğrudan yerleştirilmemiş olmakla birlikte, Lagrange yöntemini kullanarak patlama basıncını yaklaşımsal olarak hesaplamaktadır. Küresel patlamaların ve yarım küre yüzey patlamalarının deneysel verilerine dayanan bu yöntemde patlama dalgası parametreleri ile ölçeklendirilmiş mesafe arasında bir ilişki geliştirilmiş ve kodda uygulanmıştır. Bu nedenle, belirli bir ölçekli mesafede belirli bir patlayıcı kütlesi için patlama dalgası parametrelerini elde etmek mümkündür. Ls-Dyna'daki CONWEP kodu iki durumda kullanılabilir: küresel bir yükün serbest hava patlaması ve yarım küre şeklindeki bir yükün yüzey patlaması. (FIŠEROVÁ, 2006)

Tamamen Lagrange bir yaklaşımda düğümler doğrudan malzeme ile birlikte hareket eder ve böylece elemanlar ve malzemeler birlikte ötelenir, döner ve deforme olur. Malzeme eleman sınırlarını geçmez ve bu nedenle her bir Lagrangian elemanı içindeki malzeme kütlesi asla değişmez. (Day, 2009)

Patlama basıncının hava patlaması modeli için kullanılan yaklaşımsal denkleme Friedlander Denklemi adı verilmektedir. Denklem 7.5'te belirtilen P_i etken basıncı; ortam basıncı ile arasındaki farkı tanımlayan ve P_s ile gösterilen anlık basıncın infilak noktasındaki pik değerini tanımlamaktadır. (Erdik et al., 2014)

$$P(t) = P_s \left[1 - \frac{t - T_a}{T_0} \right] \exp \left[\frac{-A(t - T_a)}{T_0} \right] \quad (7.5)$$

Euler yaklaşımında metal hedef tabaka Lagrange olarak tabir edildiği durumda onu çevreleyen sıvı ve çevresindeki boşluk ağı (mesh) uzayda sabit olarak tanımlanmaktadır. Bu sabit ağ içersinde sıvı, hareket edebilir ve deforme olabilir. Simulasyonun ilerlediği durumda sıvı ve boşluk eleman sınırlarını geçer, yani her zaman adımında her bir malzemenin küçük bir miktarı bir hücreden (veya elemandan) dışarı ve bitişik bir hücreye akabilir veya ilerleyebilir. Zamanın herhangi bir noktasında, her Eulerian elemanı su ve boşluğun bir karışımını içerebilir, bu nedenle eleman formülasyonunu tanımlarken "çoklu malzeme" terimi kullanılır. (Slavik et al., 2012)

Yine, metal hedefin Lagrange olarak tabir edildiği durumda su ve boşluk ağının sabit kaldığı, Euler yaklaşımından farklı olarak, ALE ağı çözüm ilerledikçe öngörülen bir şekilde hareket etmeye yönlendirilir. Dolayısıyla Euler, öngörülen referans ağ hızının sıfır olduğu ALE'nin özel bir durumudur. Daha sonra bu genel Eulerian/ALE yöntem sınıfına basitçe "ALE" olarak atıfta bulunabiliriz. LS-DYNA'daki ALE çözücüsü ağırlıklı olarak laminar akışa uygulanabilir. Ayrıca, ALE çözücü tam bir Navier-Stokes çözücü değildir ve bu nedenle sürüklenme gibi akışkan sınır tabaka etkilerini hesaba katmaz.(Slavik et al., 2012)

Son olarak, tez çalışmamızda yaptığımız analizlerin çözüm yöntemi olarak da kullandığımız bileşik CONWEP-ALE yöntemini ele alalım.

Bu modelde, çözüm yöntemi 1 eleman başına 2 saniye ile daha hızlı sonuç sağlayan CONWEP ve uygulanan yük doğrultusunda açığa çıkan şok basıncın sonuca etkisinin doğruluğunu arttıran ALE yönteminin karışımı karşımıza çıkmaktadır.(Erdik et al., 2014)

LOAD_BLAST_ENHANCED yük kartı ile tanımlanan parametreler ve bunlara dair açıklamalar Tablo 7.8'de verilmiştir.

LOAD_BLAST_ENHANCED, geleneksel kimyasal patlamalardan kaynaklanan ampirik basınç geçmişlerini sağlayan deneysel verilerden oluşan bir veritabanından yararlanır. CONWEP yazılım paketine benzer köklere sahiptir ancak CONWEP LS-DYNA'ya gömülü değildir. Hesaplama açısından pahalı olan ALE yöntemine göre basitleştirilmiş ve kanıtlanmış bir analiz yaklaşımı sağlamaktadır. LOAD_BLAST_ENHANCED ile patlayıcı yük ile hedefe net bir görüş hattı olduğu varsayılır. Araya giren bir nesne tarafından gölgelenmiş olsa bile hedefe tam patlama yükü uygulanır. (Slavik et al., 2012)

Tablo 7.8 LOAD_BLAST_ENHANCED yük kartı değerleri ve açıklamaları

Değişken	Açıklama	Değer
BID	Patlayıcı kimliği (Birden fazla patlayıcı için tanımlama sayısı)	1
m	TNT eşlenik ağırlığı	6.5 kg
XBO	Patlayıcı yük merkezine x uzaklığı	0
YBO	Patlayıcı yük merkezine y uzaklığı	480
ZBO	Patlayıcı yük merkezine z uzaklığı	0
TBO	Patlama Zamanı	0.001
UNIT	Birim	7 (Ton, mm, saniye, MPa)
BLAST	Patlama Kaynağı Tipi	2 (Zemin yüzeyi ile etkileşim nedeniyle ilk şok dalgasında amplifikasyon olmaz.)
DEATH	Patlama Sonlanma Zamanı	10^{20}
NEGPHS	Negatif Faz Davranışı	0 (Friedlander denkleminin belirlediği negatif.)

8. ANALİZ SONUÇLARI

Kurulan model üzerinden yapılan analizler sonucunda çelik ve kompozit malzemeler için farklı çıktılar elde edilmiştir. AISI 4340 çeliği ve S2 Glass fiber kompozit malzemeye sahip V-Şekilli panel plakanın sonuçları öm görüldüğü şekilde alınmıştır. Analiz sonuçları E Glass fiber malzeme için yeterli girdi olmaması sebebiyle tutarsız çıkmış, modelden gerekli veri çıktısı alınamamıştır.

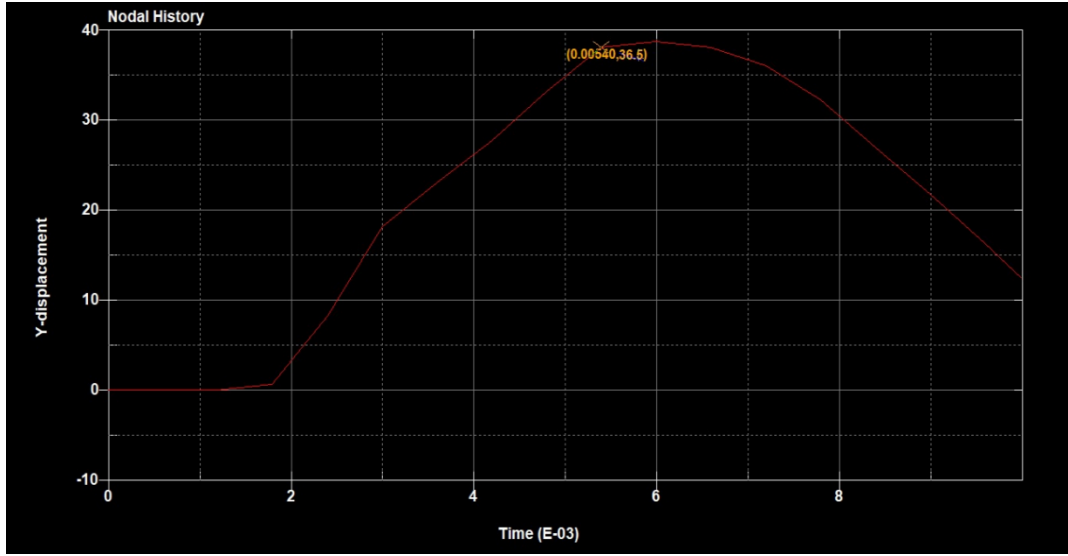
Tez çalışması kapsamında yapılan analizlerden çelik ve kompozit malzeme karşılaştırma referansları AISI 4340 ve S2 Glass fiber kompozit olarak kullanılmıştır.

8.1 Çelik V-Şekilli Panel Plaka Analiz Sonuçları

AISI 4340 çelik parametreleri kullanılarak modellenen V-Şekilli panel plaka 480 mm zemine uzaklık konumunda bulunması durumunda 6,5 kg TNT patlayıcının patlamasına maruz kaldığı ortamdaki deformasyon değerleri Tablo 8.1’de verilmiştir. Tabloya ek, her bir çelik plaka için yer değiştirme-zaman grafikleri de ilerleyen kısımda verilmiştir.

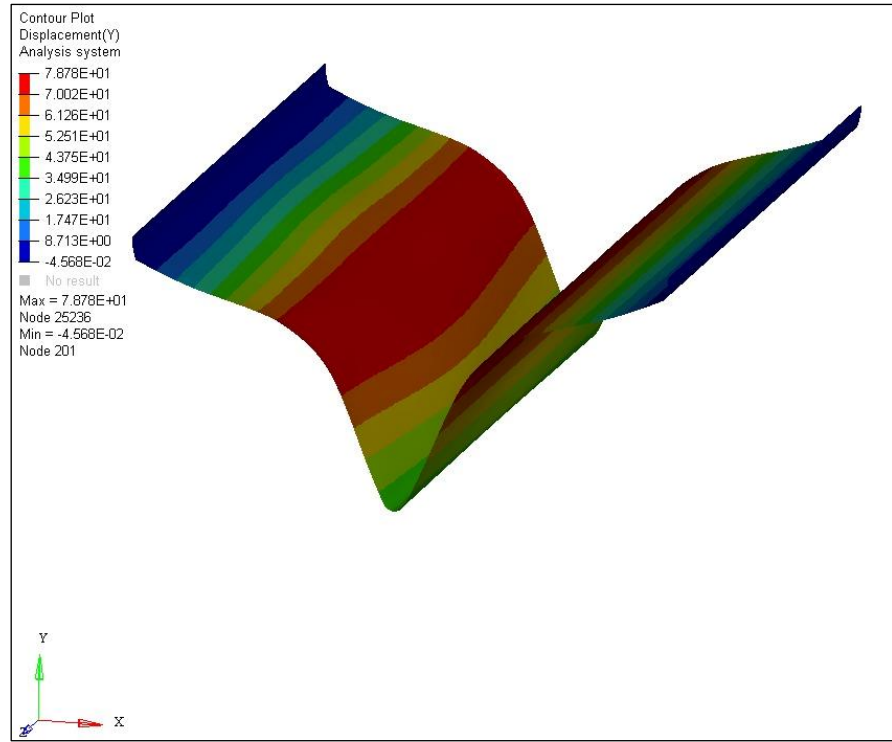
Tablo 8.1 Çelik Malzeme Deformasyon Sonuçları

Çelik V-Şekilli Panel Plaka Patlama Sonuçları			
Plaka	Malzeme	Açı	Merkez yönü deformasyon [mm]
A	AISI4340	107	109
B	AISI4340	101	72.3
C	AISI4340	95	50.2
D	AISI4340	90	36.5



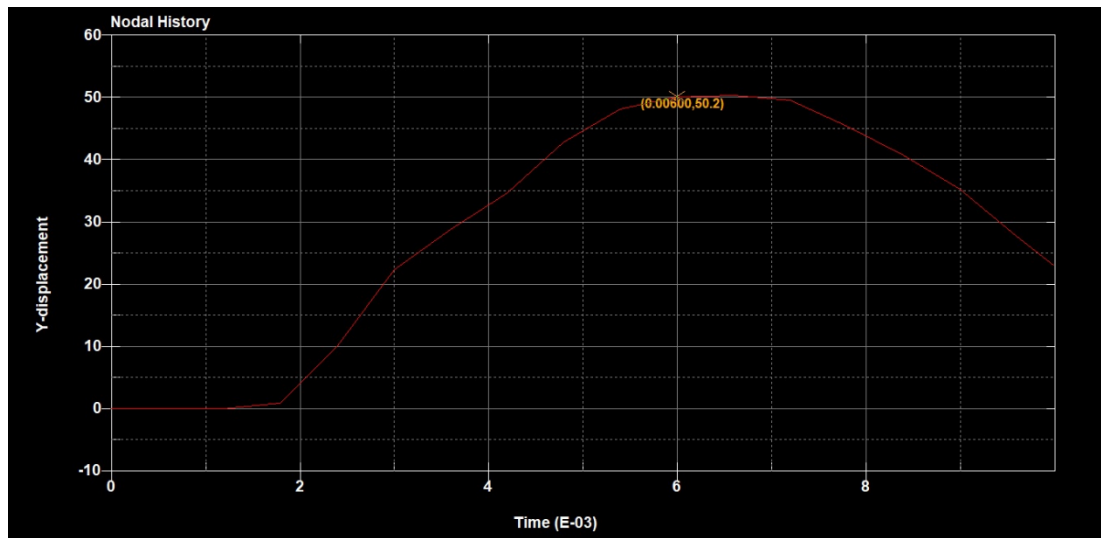
Şekil 8.1 Çelik D Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

D Plakası, 90 derecelik açıya sahip olması gereğiyle, V şekli ile, patlama sonucu oluşan şok dalgasının zırhlı araçtan yarma amacını en doğru şekilde uygulaması ön görülen örnektir. Bu sebeple daha büyük açılara sahip plakalara kıyasla en az deformasyon değeri olan 36.5 mm'yi analiz sonuçlarında D plakasında gözlemlemekteyiz. Teori gereği, plakanın kaynak dikişi bölgesinde V şekline sahip olmasını sağlayan birbirine paralel iki yakası arasındaki açı değerinin artışı, yani plakanın V şeklini kaybederek düzleşme konumuna yaklaşması halinde deformasyon değerinin artacağı ön görülmüştür.

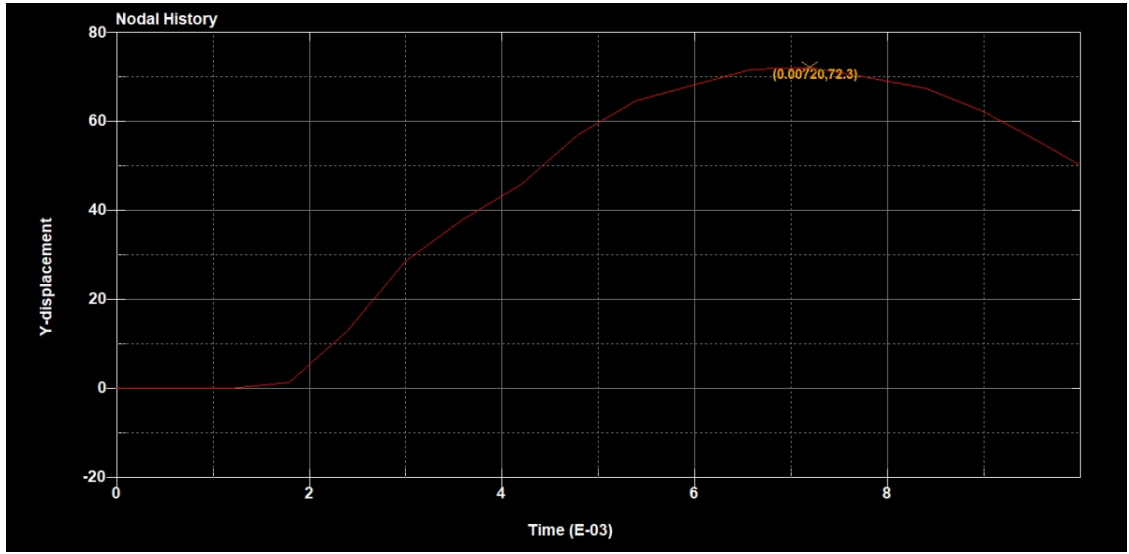


Şekil 8.2 Çelik D Plakası Analiz Sonucu Yer Değiştirme Görseli

Literatürdeki çoğu düz plaka ve V-Şekilli plaka kıyaslaması da bu çıktıyı vermektedir. Trajkovski ve arkadaşlarının çalışma çıktılarında verilen örnek, aynı şartlarda test edilen düz ve 90 derecelik V şekilli plaka arasındaki deformasyon değerlerinde de gözlemlenebilmektedir. (Trajkovski et al., 2018)

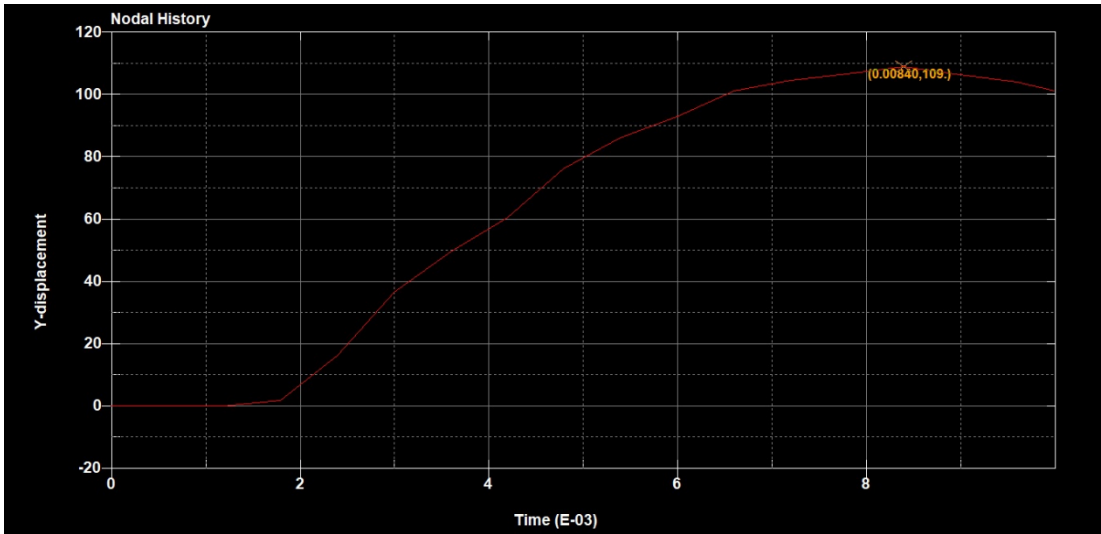


Şekil 8.3 Çelik C Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği



Şekil 8.4 Çelik B Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

B ve C plakalarında açının artışı ile doğru orantılı lineer bir deformasyon artışı olduğu gözlemlenirken, A plakası ile bu değerin en yükseğe çıktığı Şekil 8.5'te verilen yer değiştirme-zaman grafiğinden gözlemlenebilmektedir.



Şekil 8.5 Çelik A Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 8.6’da verilen enerji-zaman grafiğinde ise mavi renkli çizgi kinetik enerjiyi, mor renkli çizgi iç enerjiyi ve sarı renkli çizgi toplam enerjiyi göstermektedir. Deformasyonun başladığı zaman itibariyle kinetik enerji en yüksek değere ulaşırken toplam enerji bu süre itibariyle sabit değer seyretmektedir.



Şekil 8.6 Çelik Plaka Enerji-Zaman Grafiği

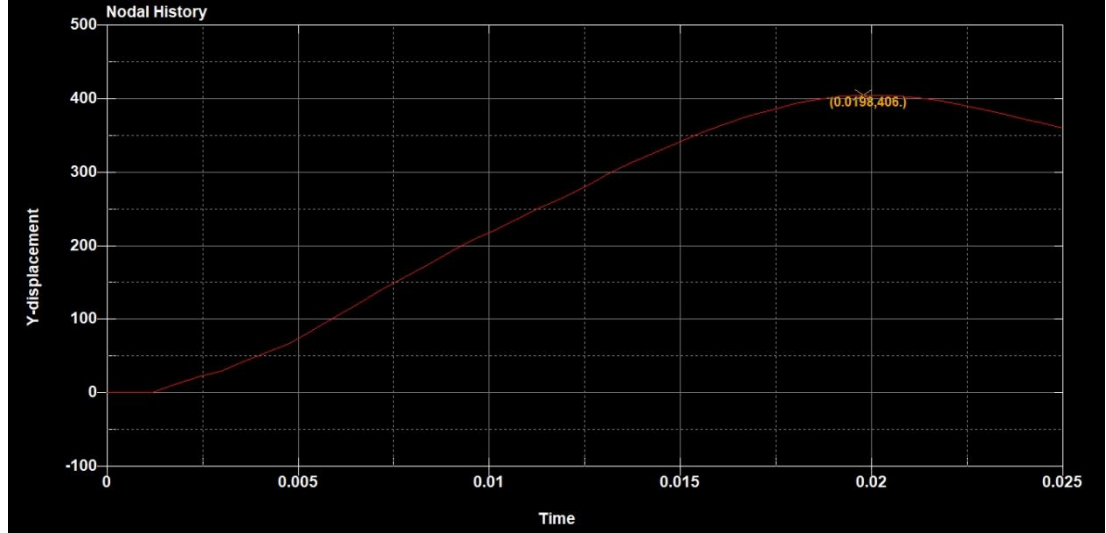
8.2 Kompozit V-Şekilli Panel Plaka Analiz Sonuçları

S2 Glass fiber kompozit malzeme parametreleri kullanılarak modellenen V-Şekilli panel plaka, çelik plakalar ile aynı şartlarda yani, 480 mm zemine uzaklık konumunda bulunması durumunda ve 6,5 kg TNT patlayıcının patlamasına maruz kaldığı ortamdaki deformasyon değerleri Tablo 8.2’de verilmiştir. Tabloya ek, her bir kompozit plaka için yer değiştirme-zaman grafikleri de ilerleyen kısımda verilmiştir.

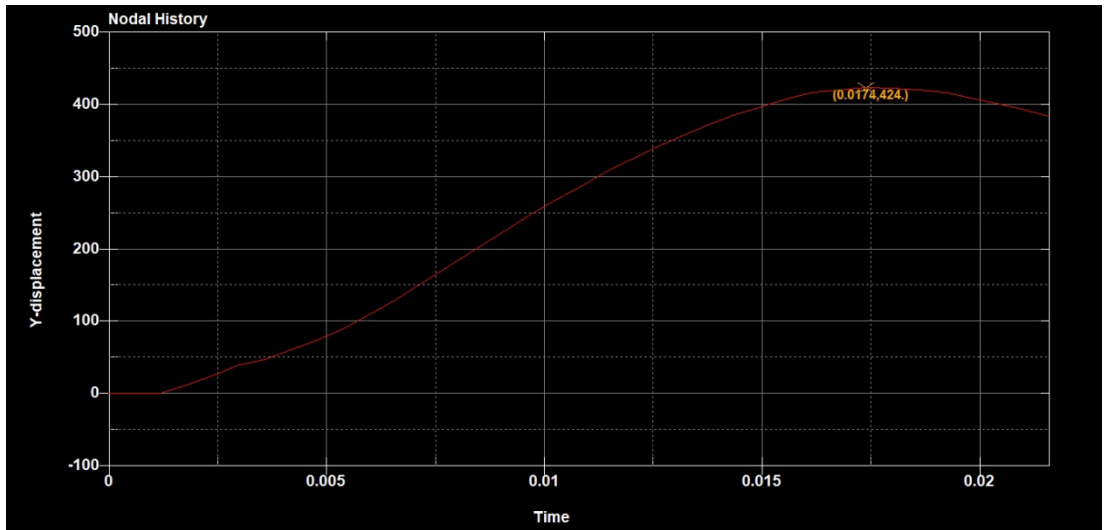
Tablo 8.2 Kompozit Malzeme Deformasyon Sonuçları

Kompozit V-Şekilli Panel Plaka Patlama Sonuçları			
Plaka	Malzeme	Açı	Merkez yönü deformasyon [mm]
A	S2 Glass	107	476
B	S2 Glass	101	432
C	S2 Glass	95	424
D	S2 Glass	90	406

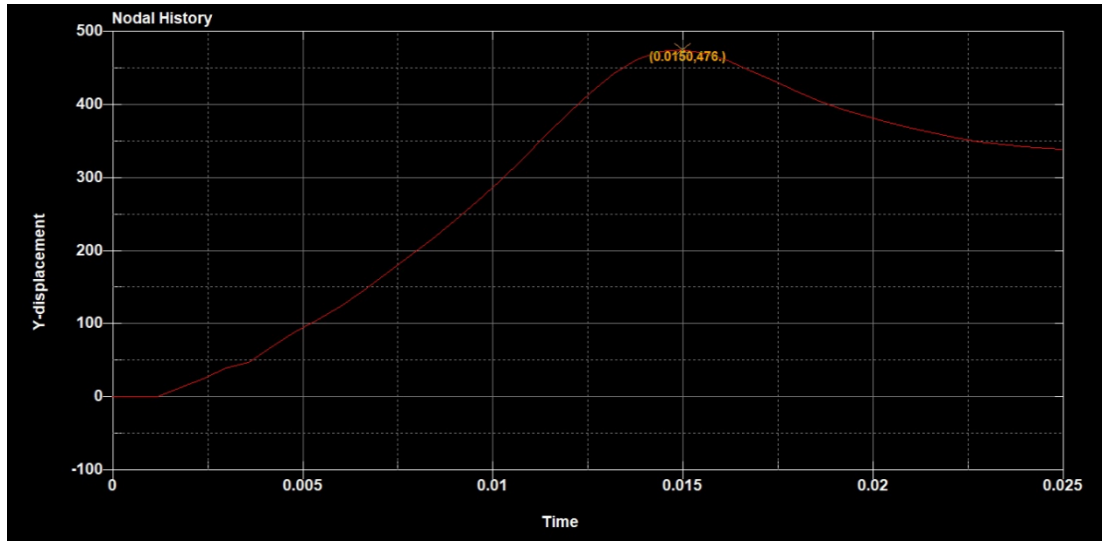
Çelik plaka sonuçlarına benzer şekilde en düşük deformasyon değeri 90 derece açıya sahip kompozit plakada elde edilmiştir. Aynı çıkarımla, açının artmasına bağlı olarak deformasyon değeri de aynı doğrultuda artış göstermiştir.



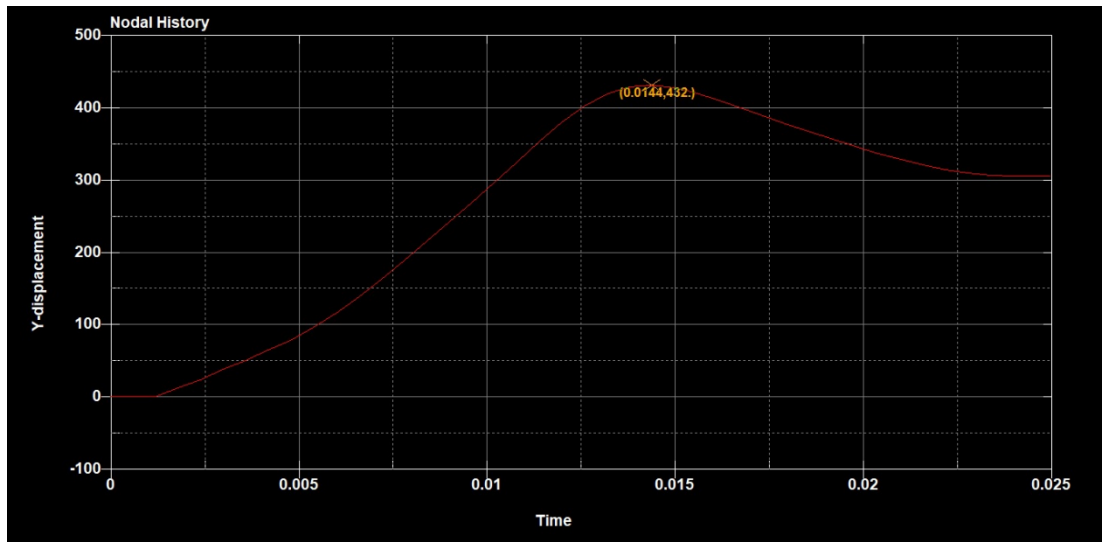
Şekil 8.7 Kompozit D Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği



Şekil 8.8 Kompozit C Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

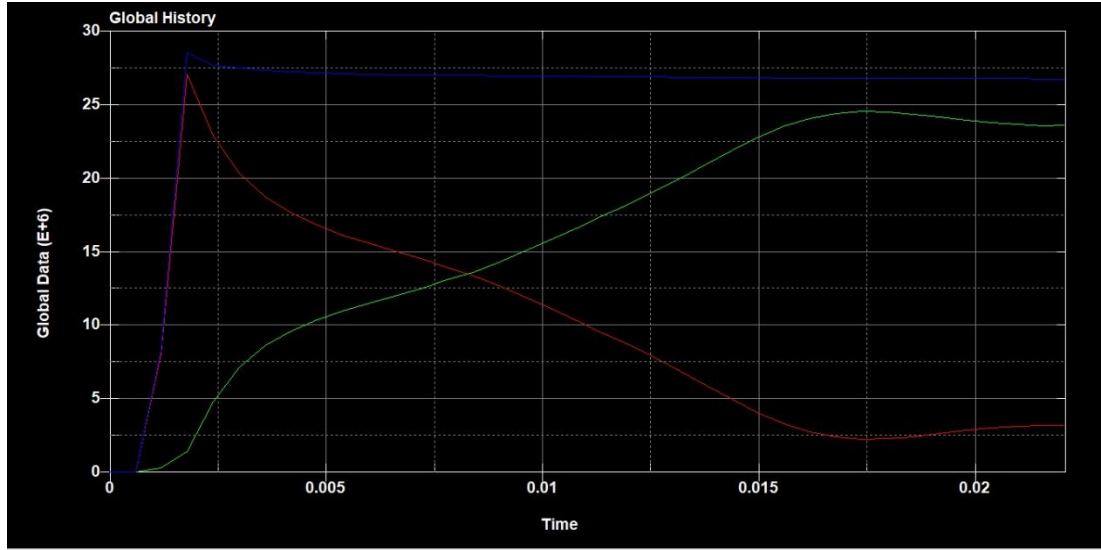


Şekil 8.9 Kompozit B Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği



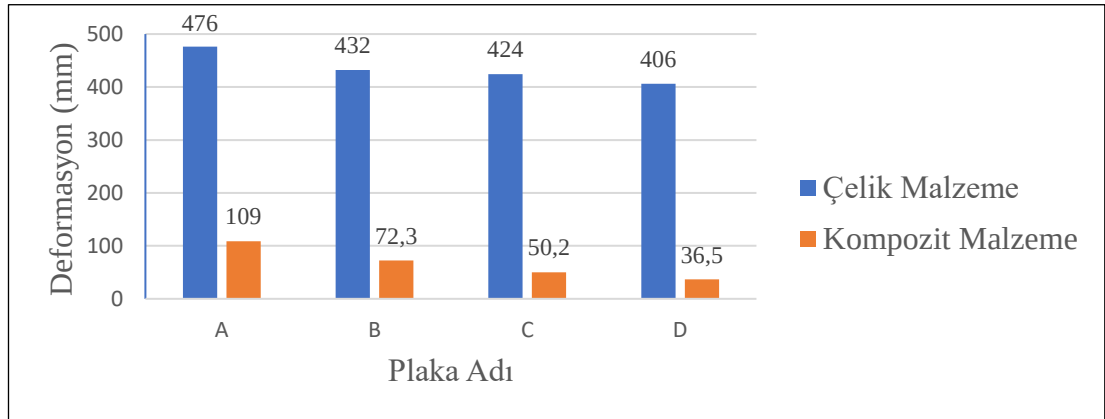
Şekil 8.10 Kompozit A Plakası Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 8.11’da verilen grafik ile çelik plakada olduğu gibi kinetik enerji-toplam enerji arasındaki ilişki gözlemlenebilmektedir. 4 farklı kompozit plakada aynı enerji davranışı gözlemlenmesi sebebiyle tek bir grafik paylaşılmıştır.



Şekil 8.11 Kompozit Plaka Enerji-Zaman Grafiği

Şekil 8.12’de paylaşılan grafikte çelik ve kompozit malzemelerin aynı şartlarda maruz kaldığı patlamalarda, plakalardaki deformasyon davranışı görülmektedir.



Şekil 8.12 Malzemelere Göre Deformasyon Karşılaştırma Grafiği

9. SONUÇ

Tez çalışmamızın amacı, savunma sanayisinde çokça örnekleri bulunan çeşitli çelik malzemelerden imal edilmiş mayından koruma amaçlı zırhlı personel taşıyıcı araçlarda kullanılan V-şekilli panel plakaların yerini tamamen kompozit malzeme ile imal edilen aynı yapıda bir plakanın alıp alamayacağını sorgulamaktır.

Tez amacı doğrultusunda yalnızca kompozit malzeme kullanımı, zırhlı aracın sahip olduğu ağır çelik malzeme yoğunluğunu bu noktada hafifletmek ve aynı zamanda araca manevra yapabilme yeteneğini bu hafifletme ile yükseltme düşüncesinden gelmektedir.

Bunun beraberinde, deneysel çalışmalarla koruyuculukları farklı şartlarda değerlendirilerek ortaya çıkarılan referans açısı varyasyonları kullanarak (Follett et al., 2011), benzer ortamlarda patlamaya maruz kalan plakaların deformasyon değerlerini karşılaştırmaktır.

Bu iki amaç doğrultusunda kurulan simülasyon ortamında çelik AISI 4340 ve S2 Glass fiber kompozit malzemelerinin koruyuculukları, patlama sonucu deformasyon değerleri göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır.

Çıktılar ışığında yapılan ilk yorum çelik malzeme deformasyon oranının kompozite kıyasla daha düşük seviyede kalması nedeniyle, koruyuculuklarının daha iyi olması yönündedir.

Tek başına kullanılan, tek yönlü fiber kompozit bir malzemenin çeliğe kıyasla aynı oranda koruyuculuk sağlayamadığı analiz sonuçlarında gözlemlenmiştir. 5 mm kalınlığa sahip bir çelik ile 0.55 mm kalınlığa sahip 44 tabakadan oluşan S2 Glass fiber kompozit panel plakada koruyuculuk 4-8 kat aralığında düşmüştür.

V şekline daha yakın konumda bir yapı elde edilmesini sağlayan 90 derecelik çelik ve kompozit panel plakalar, diğer açılarla kıyaslandığında aynı oranda en yüksek koruyuculuğu en düşük deformasyon çıktısı ile vermektedir.

Li'nin yaptığı çalışmada yalnızca kompozit panel plaka değil, katkılı olması amaçlı alüminyum köpük ile çift katmanlı bir yapı elde ederek patlamaya maruz bıraktığı sonuçların, tek başına kompozit kullanımına kıyasla daha iyi koruyuculuğa sahip olduğu çıkarımının yapılmasını sağlamaktadır.(Li et al., 2020)

John ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise benzer şekilde kompozit sandviç yapılara sahip plakaların koruyuculukları hem hava şok dalgası şartlarında hem de su altı patlamasına maruz kalacak şartlarda değerlendirilmiştir. (Dear et al., 2017)

Analiz sonuçları ve literatür araştırması kapsamında, tek başına kompozit malzemelerden imal edilen V-şekilli panel plakaların koruyuculuk açısından çeliklere ve çelik katkılı kompozit plakalara kıyasla yeterli olmayacağı kanısına varılmıştır.

Beraberinde değerlendirilen açı parametrelerinden 90 derece değerinin en yüksek koruma sağladığı gözlemlenirken; zırhlı araç yapısı düşünüldüğünde, zemin ile temas riskini arttırma olasılığı sebebiyle, düz bir yapı elde etmeden açı değerini yükseltmenin daha olumlu sonuçlar vereceği çıktısını elde edilmiştir.

90 derece ile 107 derece arasında kompozit malzemelerde yaklaşık %17'lik bir deformasyon artışı gözlemlenmesi sebebiyle, her iki çıkarımın bileşke sonucu koruyuculuk anlamında optimum performansa sahip olmamızı sağlayacaktır.

Numerik analizlere bağlı olarak yaptığımız çalışmalar ve çalışmalar ışığında elde ettiğimiz çıkarımlar, deneysel ortamda yapılan testlerle(Follett et al., 2011) kıyaslanarak verilere aktarılmıştır.

Bu bağlamda, gelecek çalışmalarda, aynı deformasyon aralığı göz önünde bulundurularak çelik katkılı kompozit sandviç yapıda imal edilen V-şekilli kompozit panel plakalar hem deneysel hem de numerik çalışmalarla incelenebilir. İncelemeler kapsamında minimum ağırlık maksimum koruyuculuk ilkesi kapsamında savunma sanayiye zırhlı araçlarda kullanımı yaygınlaştırılacak bir opsiyon sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Adamik, V., Trzciński, W. A., & Vagenknecht, J. (2005). Investigation of the behaviour of steel and laminated fabric plates under blast wave load. Part 2, Numerical approach. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 54(2–3), 17–30.

Altair. (2019). Practical Aspects of Finite Element Simulation, A Study Guide. *Altair University, 5th Edition*.

Bathe, K.-J. (2007). Finite Element Procedures. In *Prentice-Hall* (pp. 367–394). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384984-7.00010-5>

Batra, R. C., & Hassan, N. M. (2008). Blast resistance of unidirectional fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(3), 513–536.

Berk, B., Karakuzu, R., Murat Icten, B., Arikan, V., Arman, Y., Atas, C., & Goren, A. (2016). An experimental and numerical investigation on low velocity impact behavior of composite plates. *Journal of Composite Materials*, 50(25), 3551–3559. <https://doi.org/10.1177/0021998315622805>

Bird, R. (2001). Protection of Vehicles Against Landmines, JOURNAL OF BATTLEFIELD TECHNOLOGY. *JOURNAL OF BATTLEFIELD TECHNOLOGY*, 4(1), 14–17. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/BLSE%3ARN127986680>

Chang, F.-K., & Chang, K.-Y. (1987). A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of Composite Materials*, 21(9), 834–855.

Comtois, J. L. R., Edwards, M. R., & Oakes, M. C. (1999). The effect of explosives on polymer matrix composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(3), 181–190.

Cowper, G. R., & Symonds, P. S. (1957). *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. Brown Univ Providence Ri.

Day, J. (2009). *Guidelines for ALE Modeling in LS-DYNA*. July.

Dear, J. P., Rolfe, E., Kelly, M., Arora, H., & Hooper, P. A. (2017). Blast Performance of Composite Sandwich Structures. *Procedia Engineering*, 173, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.065>

Erbil, Y., Ekşi, A. K., & Bircan, D. A. (2011). Spall Liner: From Fiber to Protection. *6th International Advanced Technologies Symposium. IATS'11*, 378–382.

Erdik, A., Kilic, N., & Ak, H. (2014). *Mayın patlama simülasyonlarında üç farklı yöntemin incelenmesi : CONWEP , MM-ALE ve birleşik CONWEP-ALE*. June.

Fecko, D., Lyle, D., & Gambert, X. (2000). *Composite Armor Solutions For STANAG 4569 Ballistic Protection Levels*.

Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M., & Byar, A. (2011). LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(11), 1809–1825. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.08.004>

FİŞEROVÁ, D. (2006). *Numerical Analyses of Buried Mine Explosions With Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading*. 212.

Follett, S., Analysis, L., Composite, O. F., Hulls, S., Experimental, N., & Approach, N. (2011). *Defence College of Management and Technology*. July

.

Grujicic, M., Pandurangan, B., Zhao, C. L., & Cheeseman, B. A. (2007). A Computational Investigation of Various Water-Induced Explosion Mitigation Mechanisms. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 3, 185–212

.

Hernandez, C., Maranon, A., Ashcroft, I. A., & Casas-Rodriguez, J. P. (2013). A computational determination of the Cowper-Symonds parameters from a single Taylor test. *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), 4698–4708. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.010>

Holmquist, T.J ; Johnson, G. R. (1991). *Determination Of Constants And Comparison Of Results For Various Constitutive Models. 1.*

International Campaign to Ban Landmines. (2022). Landmine Monitor 2022. 2022, 146. http://www.the-monitor.org/media/3352351/2022_Landmine_Monitor_web.pdf

John, V. (1972). *Introduction to Engineering Materials.*

Johnson, G. R. (1983). A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. *Proc. 7th Int. Sympo. Ballistics*, 541–547.

Jordan, J. B., Naito, C. J., & Haque, B. Z. (2014). Progressive damage modeling of plain weave E-glass/phenolic composites. *Composites Part B: Engineering*, 61, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.037>

Kania, E. (2009). Developmental tendency of landmine protection in vehicle. *Modelling and Optimization of Physical Systems.*

Kaptanoğlu, M., & Küçük, Ö. (2014). Rollover crashworthiness of a multipurpose coach. *Proc. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, OTEKON 2014*, 48.

Lester, C. (1996). *Protection of light skinned vehicles against landmines: a review.*

Li, Y., Lv, Z., & Wang, Y. (2020). Blast response of aluminum foam sandwich panel with double V-shaped face plate. *International Journal of Impact Engineering*, 144(July), 103666. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103666>

Ls-Dyna. (2018). *LS-Dyna Theory Manual* (Vol. 18).

Markose, A., & Rao, C. L. (2017). Mechanical response of V shaped plates under blast loading. *Thin-Walled Structures*, 115(February), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.02.002>

Mitchell, D. W. (1964). Russian mine warfare: the historical record. *Royal United Services Institution. Journal*, 109(633), 32–39.

Murthy, V. C. A. D., & Santhanakrishnanan, S. (2020). Isogrid lattice structure for armouring applications. *Procedia Manufacturing*, 48, E1–E11. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.099>

NATO. (2004). *Procedures For Evaluating The Protection Levels Of Logistic And Light Armoured Vehicles For Ke And Artillery Threats* (Issue January).

NATO - TR-HFM-090 Task Group 25. (2007). Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants against Anti-Vehicular Landmine Effects. In *RTO Technical Report - TR-HFM-090* (Vol. 323, Issue April).

Ogorkiewicz, R. M. (1968). *Design and Development of Fighting Vehicles*. Macdonald. <https://books.google.com.tr/books?id=bLTkXwAACAAJ>

Paykani, A., Khosravi, M. I., Saeimi-Sadigh, M. A., & Mahmoodi-Kaleibar, M. (2013a). Dynamic analysis and design of V-shape plates under blast loading. *Journal of Vibroengineering*, 15(2), 971–978.

Qi, C., Yang, S., Yang, L.-J., Han, S.-H., & Lu, Z.-H. (2014). Dynamic Response and Optimal Design of Curved Metallic Sandwich Panels under Blast Loading. *The Scientific World Journal*, 2014, 853681. <https://doi.org/10.1155/2014/853681>

Radonić, V., Giunio, L., Biočić, M., Tripković, A., Lukšić, B., & Primorac, D. (2004). Injuries from antitank mines in Southern Croatia. *Military Medicine*, 169(4), 320–324.

Ramasamy, A., Hill, A., Hepper, A. E., Bull, A., & Clasper, J. (2009a). Blast Mines: Physics, Injury Mechanisms And Vehicle Protection. *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 155, 258–264. <https://doi.org/10.1136/jramc-155-04-06>

Ramasamy, A., Hill, A. M., Masouros, S. D., Gordon, F., Clasper, J. C., & Bull, A. M. J. (2011). Evaluating the effect of vehicle modification in reducing injuries from landmine blasts. An analysis of 2212 incidents and its application for humanitarian purposes. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1878–1886.

Ramasamy, A., Masouros, S. D., Newell, N., Hill, A. M., Proud, W. G., Brown, K. A., Bull, A. M. J., & Clasper, J. C. (2011). In-vehicle extremity injuries from improvised explosive devices: Current and future foci. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1562), 160–170.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0219>

Rasbash, D. J. (1984). Explosion hazards and evaluation: by W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulestz and R. A. Strehlow, published by Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1983; 807 pp; price U.S. \$159.50, Dfl. 375.00, ISBN 0-444-42094-0. *Fire Safety Journal*, 7(2), 203–204.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0379-7112\(84\)90044-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0379-7112(84)90044-4)

R.Cook. (1995). *Finite Element Modeling For Stress Analysis*.

Schwer, L. (2007). Optional Strain-Rate Forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon _ 0. *6th European LS-DYNA Users' Conference*.

Slavik, T. P., Software, L., & Corporation, T. (2012). *Blast Loading in LS-DYNA ® Explosion in Air - Incident Shock Wave*.

Stansfield, I. (1982). A paper on mine protection of military vehicles. *Salisbury, Rhodesia: Mine Warfare Committee* 1982.

Stewart, J. R., Gullerud, A. S., & Heinsteins, M. W. (2006). Solution verification for explicit transient dynamics problems in the presence of hourglass and contact forces. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(13–16), 1499–1516.
<https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.05.043>

Supacat. (2023). *Supacat Protected Vehicle Technical Data Sheet*. https://supacat.com/wp-content/uploads/sites/3/2015/07/Supacat_SPV-400_Data-Sheet_V1.0.pdf

Swanson, S. R. (1997). *Introduction to design and analysis with advanced composite materials*. Prentice Hall.

Tasdemirci, A., Tunusoglu, G., & Güden, M. (2012). The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*, 44, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.12.005>

Trajkovski, J., Perenda, J., & Kunc, R. (2018). Blast response of Light Armoured Vehicles (LAVs) with flat and V-hull floor. *Thin-Walled Structures*, 131(July), 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.040>

Wright, A., & French, M. (2008). The response of carbon fibre composites to blast loading via the Europa CAFV programme. *Journal of Materials Science*, 43(20), 6619–6629. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2787-7>

ÖZGEÇMİŞ

Harun Selim Adıbelli, 2018 Haziran'da Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Mevcutta Ford Otomotiv Sanayi A.Ş şirketinde Tasarım ve Yayınlama Mühendisi olarak çalışmaktadır. Gebze Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.

EKLER

EK 1:

Adıbelli H.S, Bedir F. Investigation of Protection of V-Shaped Composite Panel Plates During Landmine Explosions By Finite Element Analysis (2023) Tokyo Summit – 7 International Innovative Studies & Contemporary Scientific Research Congress Tokyo/JAPAN (Oral Presentation)