



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Patlayıcı Etki Analizi Simülasyon Yazılımının Geliştirilmesi ve Basınç Dalgası Parametrelerinin Derin Öğrenme ile Tahmin Edilmesi¹

 Resul SİLAY^{a,*},  Abdulkadir KARACI^a

^a Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: resulsilay@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1014063

ÖZ

Bu çalışmadaki amaç patlama sonucunda meydana gelen yüksek basınç dalgasını modelleyen bir simülasyon yazılımı geliştirmek ve bu simülasyon yazılımından elde edilen veri setini kullanarak derin sinir ağı ile basınç dalgası parametrelerini tahmin etmektir. Geliştirilen simülasyon yazılımı ile askeri alanda gerçekleştirilecek ana unsuru patlayıcı olan faaliyetlerin insan ve yapılar üzerindeki çevresel etkileri ortaya konulmaktadır. Kullanıcı tarafından belirlenen patlayıcı tipi, patlayıcı ağırlığı ve mesafe parametreleri girilerek basınç dalgası parametreleri hesaplanmaktadır. Basınç dalgası parametreleri hesaplanırken yazılım üzerinde matematiksel model veya derin sinir ağı modeli seçimi yapılabilmektedir. Üç boyutlu gösterim alanı veya harita üzerinde seçilen konum üzerinde basınç etkileri, basınç etki alanları, insan ve yapılar üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Ayrıca geliştirilen yazılım birçok amaç için kullanılabilir niteliktedir. Bunlardan bazıları; (i) askeri alanda stratejik bilginin hızlı ve kolay bir şekilde sağlanması, (ii) ideal patlayıcı yükünün bulunması, (iii) terör faaliyetlerinde kullanılan patlayıcı yüklerinin çevresel etkilerinin analiz edilmesi ve önlemlerin alınması, (iv) askeri operasyonlarda kullanılan patlayıcıların insan ve yapılar üzerindeki etkilerin tahmin edilmesi, (v) askeri alanda gerçekleştirilecek operasyonlarda belirlenen hedefe atılacak patlayıcı yükünün optimum seviyede belirlenmesi. Geliştirilen 3 boyutlu simülasyon ortamının patlama sonrası meydana gelen aşırı basınç dalgası parametrelerini doğru bir şekilde tahmin ederek, insan ve yapılar üzerindeki etkilerini etkili bir şekilde simüle ettiği gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, çalışmada basınç verisi Derin Sinir Ağı ile de tahmin edilmiştir. Yazılım tarafından oluşturulan sentetik veri setleri ile derin sinir ağı modelinin eğitim ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen patlayıcı tipine göre oluşturulan derin sinir ağı modeli ile yarı küresel patlamalar sonucu ortaya çıkan blast dalgası (aşırı basınç dalgası) parametreleri başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Basınç dalgası, Basınç dalgası parametreleri, Derin sinir ağı, TNT Eş değeri, Simülasyon

Development of Explosive Impact Analysis Simulation Software and Prediction of Pressure Wave Parameters with Deep Learning

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a simulation software for modeling the high-pressure wave that occurs as a result of the explosion and to estimate the pressure wave parameters with a deep neural network using the data set obtained from this simulation software. With the developed simulation software, the environmental effects of activities on people and structures are revealed, the main element of which is explosives, which will be carried out in the military field. The pressure wave parameters are calculated by input the explosive type, explosive weight and distance parameters determined by the user. When calculating the pressure wave parameters, a formula or a deep neural network model can be selected via the software. Pressure effects on the selected

location on the three-dimensional display area or on the map, pressure impact areas, effects on people and structures are shown. In addition, the developed software can be used for many purposes. Some of them are; (i) to provide strategic information quickly and easily in the military field, (ii) to find the ideal explosive load, (iii) to analyze the environmental effects of explosive loads used in terrorist activities and to take precautions, (iv) to predict the effects of explosives on people and structures that are used in military operations, (v) determination of the explosive load to be thrown at the determined target in the operations to be carried out in the military field at the optimum level. As a result of the experiments, it was observed that the software developed in the 3D simulation environment accurately predicts the extreme pressure wave parameters that occur after the explosion and effectively simulates its effects on people and structures. Besides, the pressure data were also predicted using Deep Neural Network. Training and testing of the deep neural network model was carried out with the synthetic datasets created by the software for explosives. With the deep neural network model created according to the selected explosive type, the blast wave (extreme pressure wave) parameters resulting from hemispherical explosions were successfully predicted.

Keywords: Pressure wave, Pressure wave parameters, Deep neural network, TNT equivalent, Simulation

¹ ICAIAME 2021 konferansında sunulmuş olup, özet metin olarak basılmıştır.
Geliş: 24/10/2021, Düzeltme: 05/12/2021, Kabul: 10/12/2021

I. GİRİŞ

Savaş, politikaları, amaçları ve çıkarları doğrultusunda karşı karşıya gelmiş taraflar arasındaki barışçıl olmayan yöntemlere dayanan üstünlük arayışını ifade etmektedir. Savaşların toplum ve çevre üzerindeki yıpratıcı ve yok edici etkileri tartışılmaz bir gerçektir [1]. Gelişen teknoloji ile birlikte askeri alanda geliştirilen silahların toplum ve çevre üzerindeki etkileri toplumlara, şehirleri yok etme noktasına gelmiştir. Savaşlarda orduların vazgeçilmez unsurları olan patlayıcılar, savaşın seyrini değiştiren en önemli askeri unsur olarak öne çıkmaktadır.

Patlayıcılar, yüksek basınç dalgaları oluşturma özelliklerinden dolayı askeri ve endüstride birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Patlama esnasında ortaya çıkan yüksek basınç ve ısı, patlayıcıların askeri alanda yaygın olarak kullanılmasında önemli bir etken olmuştur. Yer altı sığınakları, mağaralar, yüksek korunaklı yapılar ve zırhlı araçların etkisiz hale getirilmesi ve canlılar üzerinde yüksek tahribatı ile askeri alanda kullanılan en önemli argümanlardan biridir [2]. Patlama dalgası, patlama merkezinden dışarıya doğru yayılan basınç darbesinin etrafındaki havayı itmesiyle oluşan dalgadır [3]. Birincil patlama yaralanmalarının temel sebebi olan aşırı basınç dalgaları (blast dalgası), canlılar ve yapılar üzerinde ciddi hasarlar meydana getirmektedir. Tablo 1'de, basınç dalgasının insanlar ve yapılar üzerindeki etkileri verilmiştir.

Tablo 1. Patlama basınçlarının ve patlama maksimum rüzgarının, insanlar ve yapılar üzerindeki etkileri [4, 5].

En Yüksek Basınç (kPa)	Mak. Rüzgâr Hızı (mph)	Yapılar Üzerindeki Etki	İnsanlar Üzerindeki Etki
0-6,9	38	Pencere camlarının kırılması.	Şarapneller tarafından meydana gelen hafif yaralanmalar.
6,9-13,8	70	Evlerde orta dereceli hasarlar.	Cam ve enkaz yaralanmaları.
13,8-20,1	102	Konut yapılarının çökmesi.	Ciddi yaralanmalar. Sık görülen ölümler.
20,1-34,5	163	Binaların çoğunun çökmesi.	Evrensel yaralanmalar ve yaygın ölümler.
34,5-69	294	Betonarme yapılar üzerinde ciddi hasarlar.	İnsanların çoğunun ölmesi.
69-137,1	502	Ağır inşaat yapılarının ciddi hasar görmesi veya yıkılması.	100% ölümler.

Bu çalışmanın amacı, patlayıcıların çevreye olan etkilerinin analiz edilmesine olanak sağlayan bir simülasyon yazılımı geliştirmek ve bu yazılımdan elde edilen blast dalgası verileri ile patlama sonrası ortaya çıkan aşırı basınç dalgası (blast dalgası) parametrelerini, derin sinir ağı ile tahmin etmektir. Bu amaçla, bir simülasyon yazılımı geliştirilmiş ve patlayıcıların çevreye olan etkilerini analiz etmek için bu yazılımdan basınç dalgası verileri elde edilmiştir. Bu veriler vasıtasıyla derin sinir ağı eğitilerek tahmin işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

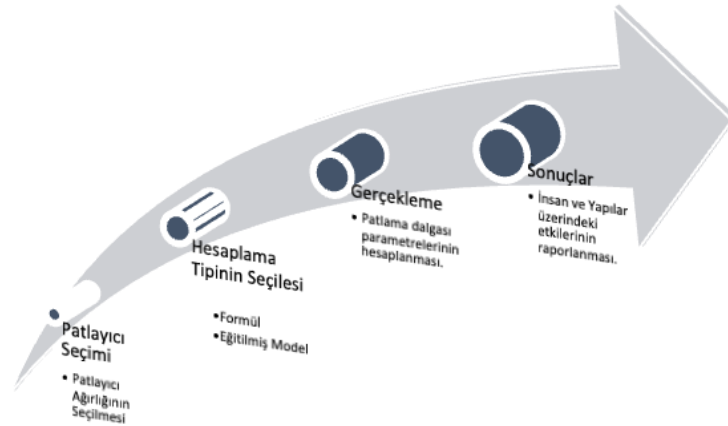
Geliştirilen simülasyon yazılımı ile askeri alanda gerçekleştirilecek ana unsuru patlayıcı olan faaliyetlerin çevresel etkileri ortaya konulmaktadır. Patlayıcıların insan ve çevresel yapılar üzerindeki etkileri tartışılmaz bir gerçektir. Patlayıcı kullanımında; güvenli alanının belirlenmesi ve patlayıcı imha işlemlerinde etki alanının doğru bir şekilde tahmin edilmesi askeri alanda aşağıdaki ana katkıları sağlayacaktır.

- Askeri alanda stratejik bilginin hızlı ve kolay bir şekilde sağlanması.
- İdeal patlayıcı yükünün belirlenmesi.
- Terör faaliyetlerinde kullanılan patlayıcı yüklerinin çevresel etkilerinin analiz edilmesi
- Askeri operasyonlarda kullanılan patlayıcıların insan ve yapılar üzerindeki etkilerinin tahmin edilmesinde.
- Askeri alanda gerçekleştirilecek operasyonlarda belirlenen hedefe atılacak patlayıcı yükünün optimum seviyede belirlenmesinde.

II. PATLAYICI ETKİ ANALİZİ SİMÜLASYON YAZILIMI VE DERİN SİNİR AĞI MODELİ

A. GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON YAZILIMI VE GELİŞTİRME ORTAMLARI

Geliştirilen simülasyon yazılımı C#.NET programlama dili ve WPF (Windows Presentation Foundation) teknolojisi kullanılarak geliştirilmiştir. WPF yüksek kalitede grafik çizimleri için kullanılmıştır. Geliştirilen yazılımın çalışma prensibi Şekil 1’de gösterilmiştir. Yazılım üzerinden patlayıcı türü, patlayıcı ağırlığı, hesaplama tipi seçilerek patlama dalgası parametreleri elde edilmektedir. Elde edilen parametreler değerlendirilerek insan ve yapılar üzerindeki etkileri geliştirilen simülasyon yazılımı üzerinde hem görsel hem de yazılı bilgi olarak raporlanmaktadır. Bunun yanı sıra, yazılım içerisinde bulunan harita ve 3B modülü ile insan ve yapılar üzerindeki etkiler simüle edilebilmektedir.



Şekil 1. Simülasyon yazılımı çalışma prensibi.

A. 1. HARİTA MODÜLÜ

Harita modülünde, patlamanın gerçekleştirileceği konum bilgisi işaretlenir, patlayıcılar listesinden patlayıcı seçimi yapılır ve patlayıcı ağırlık bilgisi girilerek patlayıcı etki alanı simüle edilir. Şekil 2, harita modülü üzerinde GBU-12 ve H6 patlayıcıları seçilerek oluşturulan senaryo için patlayıcı etkilerini göstermektedir. Bu analiz için seçilen parametreler aşağıda açıklanmaktadır.

Distance/Scale: Fare imlecinin işaret ettiği konumu hesaplayarak merkeze olan uzaklık ve harita ölçeğini göstermektedir.

Pressure (kPa): İmleç ile işaretlenen konuma etki eden basınç bilgisini ifade etmektedir.

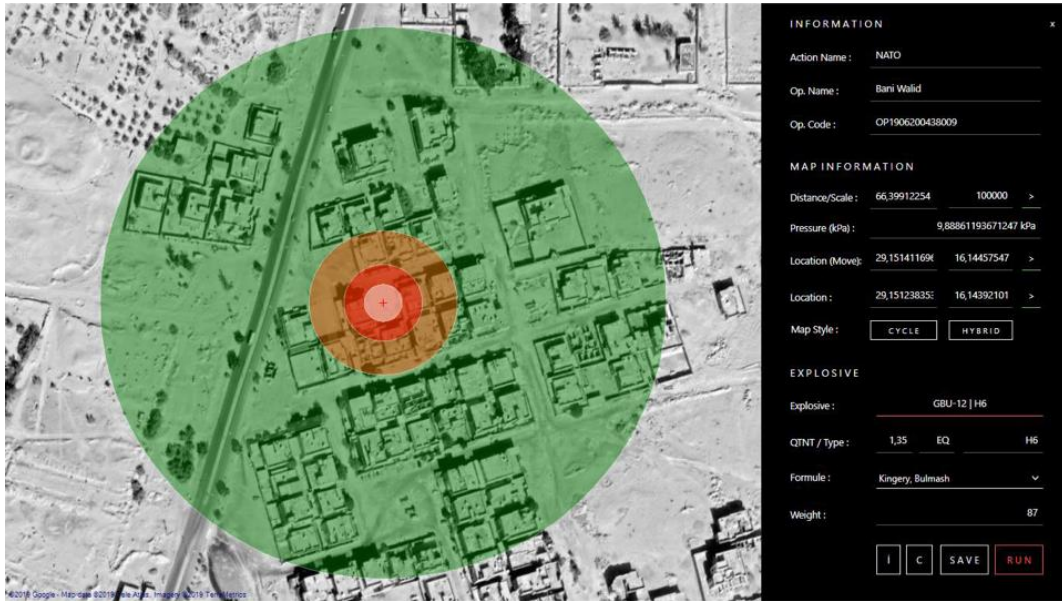
Lokasyon: Hesaplanan lokasyon bilgisini göstermektedir.

mapStyle: Bu parametre ile harita görünümü değiştirilebilmektedir.

Explosive: Patlayıcı türü seçimi yapılmaktadır.

QTNT/Type: Seçilen patlayıcının TNT eşdeğerini ve patlayıcı tipini göstermektedir.

Formül: Basınç dalgası hesaplamaları matematiksel model veya DSA modeli ile belirlenebilmektedir. Seçilen matematiksel model ve girilen ağırlık verisi ile harita üzerinde belirlenen alan için basınç dalgası hesaplamaları gerçekleştirilmektedir.

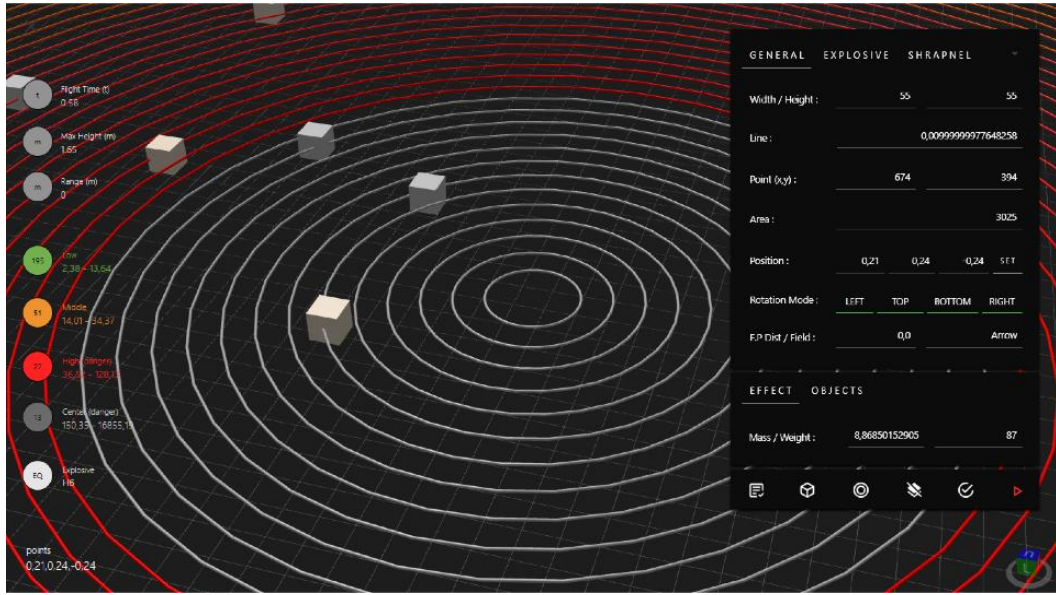


Şekil 2. Harita modülü.

A. 2. ÜÇ BOYUTLU GÖSTERİM MODÜLÜ

Üç boyutlu (3B) gösterim modülü, konum ve haritadan bağımsız olarak patlama dalgalarının simüle edilmesi için tasarlanmıştır. Modül üzerinden patlayıcı tipi ve ağırlığı girilerek blast dalgaları oluşturulmaktadır. Modül üzerine eklenmiş insan ve yapı objeleri ile ilgili mesafe için patlama senaryoları gerçekleştirilerek insan ve yapılar üzerindeki etkileri simüle edilebilmektedir. Şekil 3'de, 3B modülüne ait ekran görüntüsü gösterilmektedir. Bu modülün sağ tarafında bulunan panel üzerinden patlayıcı bilgileri seçimi yapılmaktadır. Simülasyon alanını şekillendirmek için genişlik, yükseklik ve alan parametreleri girilmektedir. Bunun yanı sıra, Explosive sekmesinden patlayıcı parametreleri

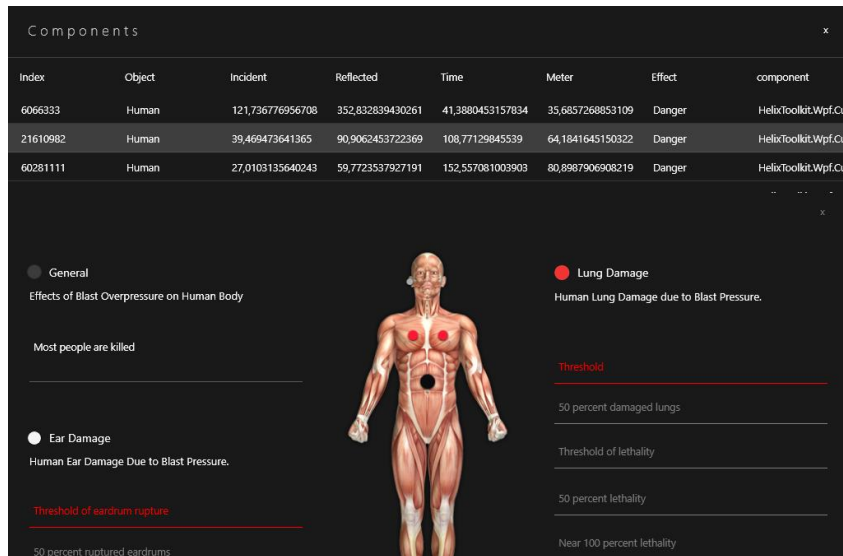
seçilirken, Effect parametresi ile patlayıcı ağırlığı belirlenerek simülasyon çalıştırılmaktadır. Patlayıcı etkileri, sol tarafta bulunan göstergeler üzerinde dört farklı kategoride (merkez, yüksek, orta ve düşük) listelenmektedir.



Şekil 3. 3B Gösterim modülü üzerinde yapılan simülasyon.

B. İNSAN VE YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Patlama sonrası meydana gelen basınç dalgasının insan ve yapılar üzerindeki etkileri 3B Modülü üzerinde izlenebilmektedir. Bu etkileri simüle edebilmek için Tablo 1’de verilen parametreler kullanılmıştır. Basınç dalgasının insanlar üzerindeki etkilerinin raporlandığı ekran Şekil 4’de gösterilmektedir. Bu ekranda, modül üzerinde istenilen mesafeye yerleştirilen insan objesine etki eden basınç dalgası ve basıncın insan vücudu üzerindeki etkileri simüle edilmektedir. Index numarası ile etiketlenen insan objesi için ayrı ayrı basınç dalgası parametreleri hesaplanmaktadır. Etki eden basınç dalgası, yansıyan basınç, şok süresi ve objenin merkeze olan uzaklığı gibi bilgiler metre cinsinden hesaplanarak rapor şeklinde kullanıcıya sunulmaktadır. Ayrıca obje için tehlike düzeyleri normal, orta ve tehlikeli şeklinde hesaplanarak kullanıcıya raporlanmaktadır.



Şekil 4. 3B modülü ile patlayıcıların insanlar üzerindeki etkilerinin raporlandığı ekran.

Basınç dalgasının yapılar üzerindeki etkilerinin simüle edildiği ekran ise Şekil 5’de gösterilmektedir. Bu şekilde de görüleceği üzere yapı objesi için, insan objesinde olduğu gibi etki eden, yansıyan basınç dalgası bilgileri ve tehlike seviyeleri hesaplanmaktadır.

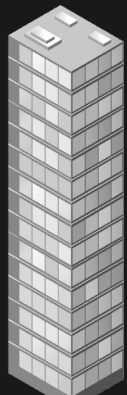
Index	Object	Incident	Reflected	Time	Meter	Effect	component
6066333	Human	121,736776956708	352,832839430261	41,3880453157834	35,6857268853109	Danger	HelixToolkit.Wpf.Cu
21610982	Human	39,469473641365	90,9062453722369	108,77129845539	64,1841645150322	Danger	HelixToolkit.Wpf.Cu
60281111	Human	27,0103135640243	59,7723537927191	152,557081003903	80,8987906908219	Danger	HelixToolkit.Wpf.Cu

Struct Damage
Blast wave pressure effect struct.

Window glass shatters

Moderate damage to houses (windows and doors blown out ar

Residential structures collapse



Most buildings collapse

Reinforced concrete buildings are severely damaged or demolit

Heavily built concrete buildings are severely damaged or demo

Şekil 5. 3B modülü ile patlayıcıların yapılar üzerindeki etkilerinin raporlandığı ekran.

3B modülü genel olarak değerlendirildiğinde, patlayıcıların insan ve yapılar üzerindeki etkilerini aşağıdaki amaçlar için başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir.

- Askeri operasyonlar
- Güvenli alan çemberinin oluşturulması
- Patlama etkilerinin hesaplanması

III. PATLAMA DALGASI HESAPLAMA

Yarı küresel patlamalar, zemin yüzeyinde gerçekleşen patlamalardır. Çalışma kapsamında yarı küresel patlamalar için blast parametrelerinin hesaplanmasında Kingery-Bulmash formülü kullanılmıştır [6]. Bu formül Eşitlik 1’deki gibi ifade edilmektedir.

$$Y = C_0 + C_1U + C_2U \dots \dots \dots + C_nU \quad (1)$$

Burada, Y = Blast parametresinin logaritması, $C_{0,1,2,3}$ = sabit,

$U = K_0 + K_1 * \text{Log}(Z)$, patlama ölçeğidir, K = sabit

Kingery-Bulmash [7] formülünün temeli, 1966 yılında 5-500 ton TNT ile dört yüzeyde gerçekleştirilen patlamadan alınan verilere dayanmaktadır. İlgili yüzey patlamaları ile ilgili bilgiler Tablo 2’de gösterilmektedir. Bu tabloda da görüleceği üzere Kingery tarafından farklı yıllarda yarı küresel TNT patlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda Kingery tarafından Blast Dalgası formülü ortaya konmuştur. Tablo 3’de patlama sonrası ortaya çıkan blast dalgasına ait parametreler verilmiştir. Patlama sonrası ortaya çıkan aşırı basınç dalgası, dalganın varış zamanı, yansıyan basınç, şok hızı gibi parametreler elde edilmektedir.

Tablo 2. TNT ile gerçekleştirilen küresel ve yarı küresel patlama deneyleri [8].

Patlama Numarası	TNT (ton)	YIL
1	5	1959
2	20	1960
3	100	1961
4	500	1964

Tablo 3. Blast dalgası sonucu ortaya çıkan parametreler.

Parametre Numarası	Parametre
1	Tepe Aşırı Basıncı (Peak Overpressure)
2	Ölçekli Varış Zamanı (Scaled Time Of Arrival)
3	Ölçekli Pozitif Faz Süresi (Scaled Positive Phase Duration)
4	Ölçekli Pozitif Faz Darbe (Scaled Positive Phase Impulse)
5	Yansıyan basınç (Reflected Pressure)
6	Yansıyan Darbe (Reflected Impulse)
7	Şok Ön Hız (Shock Front Velocity)

Çalışma kapsamında, patlayıcıların TNT eşdeğeri hesaplanarak aşırı basınç parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan formülün, diğer patlayıcı çeşitleri için de kullanılması sağlanmıştır. Patlama ölçeklendirmesi için Hopkinson [9], Cranz [10] ve Sachs [11] tarafından geliştirilen ölçeklendirme yasaları kullanılmıştır. Hopkinson [9], Cranz [10] ve Sachs [11] tarafından ortaya konulan patlama ölçeklendirme formülü Eşitlik 2’de verilmiştir.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[2]{W}} \quad (2)$$

Burada R patlama kaynağından belirtilen noktaya kadar olan mesafedir ve birimi metredir (m), W patlayıcının kütesidir birimi kg’dır.

Patlama sonucu çevreye salınan enerji miktarının ölçülmesinde kullanılan birime TNT eşdeğeri denir. Patlayıcıların enerji salınımları TNT eşdeğeri ile ifade edilmektedir. TNT eşdeğeri Eşitlik 3’deki gibi hesaplanmaktadır. 1 kg TNT patlayıcısının çevreye salmış olduğu enerji miktarı 4.19 MJ/kg olarak hesaplanmıştır [12].

$$\text{TNT EŞDEĞERİ} = \frac{\text{patlayıcı enerjisi}_{\text{MJ/kg}}}{4.19 \text{ MJ/kg}} \quad (3)$$

Hopkinson [9], Cranz [10] ve Sachs [11] tarafından ortaya konulan patlama ölçeklendirme formülündeki W parametresi Eşitlik 4’deki gibi hesaplanmaktadır. Bu parametre, TNT eşdeğerinin patlayıcı kütlesi ile çarpımı olarak ifade edilir.

$$W = \text{TNT Eşdeğeri} * \text{Patlayıcı Kütlesi (kg)} \quad (4)$$

A. PATLAMA PARAMETRELERİNİN VE TNT EŞDEĞERİNİN HESAPLANMASI

Patlayıcıların canlılar ve yapılar üzerindeki etkilerinin hesaplanmasında kullanılan birden fazla formül vardır. Bu çalışmada daha öncede belirtildiği üzere patlama sonrası oluşan aşırı basınç parametrelerinin hesaplanmasında Kingery ve Bulsman tarafından ortaya konulan formül kullanılmıştır. Aşırı basınç parametrelerinin tüm patlayıcılar için hesaplanabilmesi için patlayıcı etkileri, TNT eşdeğeri kullanılarak patlama ölçeklendirmesi ile ortaya konulmaktadır. TNT eşdeğeri

patlamada salınan enerji miktarının ölçülmesinde kullanılan bir birimdir. Yapılan ölçümlerde standart haline getirilmiştir. TNT patlayıcısının birim temelli enerji katsayıları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. TNT patlayıcısının patlama sonrası ortaya çıkan enerji salınımı.

Birim (gram)	Sembol	Birim (ton)	Simge	Enerji	Enerji (Wh)
TNT gram	G	TNTN Mikroton	µt	4.184×10 ³	1.162 Wh
TNT kilogram	Kg	TNT Militon	Mt	4.184×10 ⁶	1.162 kWh
TNT megagram	Mg	TNT Tonu	T	4.184×10 ⁹	1.162 MWh

TNT eşdeğeri, patlayıcılar tarafından patlama esnasında salınan enerji miktarının, sabit olarak belirlenen TNT patlayıcısının infilak etmesi sonucu ortaya çıkan enerji miktarına bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

Enerji Formülü

$$\text{TNT EŞDEĞERİ} = \frac{\text{patlayıcı enerjisi}}{\text{tnt enerjisi}} \quad (5)$$

$$\text{TNT EŞDEĞERİ} = \frac{\text{patlayıcı enerjisi}_{\text{Mj/kg}}}{4.19 \text{ MJ/kg}} \quad (6)$$

Tablo 5, TNT eşdeğerleri hesaplanan bazı patlayıcı türleri için TNT, yoğunluk, ısı ve basınç değerlerini göstermektedir.

Tablo 5. Bazı patlayıcı maddeler için hesaplanmış tnt eşdeğerleri.

Patlayıcı Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Mol (n)	Isı (kJ/kg)	P (kBar)	D (m/s)	TNT (q)	TNT (p)	TNT (ortalama)	Ortalama Sapma
TNT	1,64	25,9	5569	190	6950	1,00	1,00	1,00	0,00
Pentrite	1,77	32	6400	335	8300	1,15	1,76	1,34	16,04
Tetryl	1,68	27,5	5920	245	7560	1,06	1,29	1,13	7,52
C-4	1,66	33,8	6650	257	8370	1,19	1,35	1,26	1,24
COMP. B	1,72	30,6	6000	281	8052	1,08	1,48	1,22	10,41
Octogen	1,9	33,8	6538	393	9100	1,17	2,07	1,46	20,55
COMP. A-3	1,67	33,4	6780	286	8470	1,22	1,51	1,31	7,63

A.1. Derin Sinir Ağı ile Aşırı Basınç Değerinin Tahmin Edilmesi

Bu kısımda, DSA modelinin patlama basıncı tahmini üzerindeki başarısı değerlendirilmeye çalışılmıştır. Ağırlık ve belirtilen mesafelerdeki basınç verileri, DSA modeline giriş olarak verilerek basınç verisi tahmini çıkış olarak alınmıştır. İlgili mesafelerde tahmin edilen basınç değerleri ağırlık bilgilerine göre üstel bir fonksiyon olarak ifade edilmiştir. Üstel fonksiyon ile basınç dalga grafiği elde edilerek mesafe parametresine göre basınç tahmini yapılmıştır. Model, Python dilinde yazılmıştır ve açık kaynaktır. Bu nedenle model üzerinde geliştirmeler yapılabilir. Geliştirilen DSA modeline ait parametreler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. DSA modelinin parametreleri.

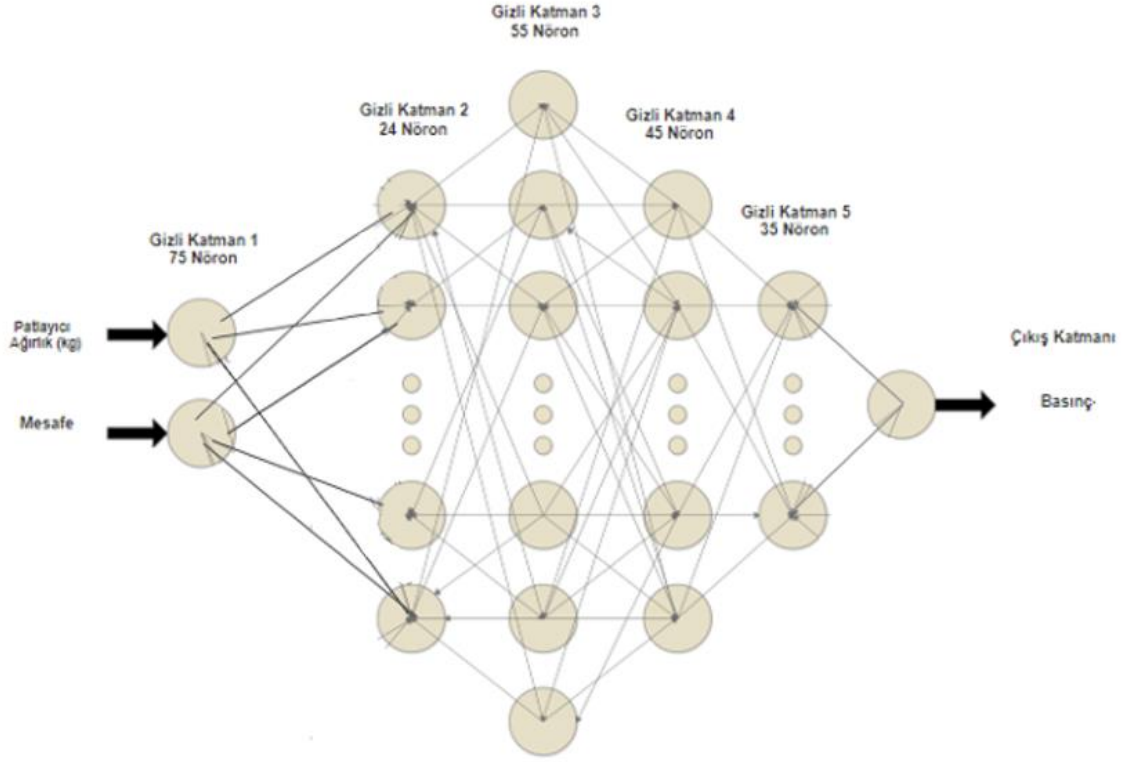
Parametreler	Değerler
Giriş katmanı nöron sayısı	2
Gizli katman sayısı	5
Gizli katman-1'deki nöron sayısı	75
Gizli katman-2'deki nöron sayısı	24
Gizli katman-3'deki nöron sayısı	55
Gizli katman-4'deki nöron sayısı	45
Gizli katman-5'deki nöron sayısı	35
Çıkış katmanındaki nöron sayısı	1
Gizli katman Aktivasyon fonksiyonu	relu
Çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonu	relu
Öğrenme Döngüsü	5000 Epochs
Kayıp Fonksiyonları	Mean square error
Optimizasyon (Öğrenme Algoritması)	Adam

DSA modelinin eğitim ve test işlemleri, çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon yazılımı aracılığı ile üretilen sentetik veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6, sentetik veri seti oluşturma modülünü göstermektedir. Bu modül ile 1-30 kg ağırlık ve 1-25 metre mesafe aralığı için veri seti üretilmiştir. Bu veri seti %70 eğitim ve %30 test olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Model, eğitim veri seti ile eğitilmiş ve test veri seti ile test edilmiştir. DSA modelinin eğitiminde patlayıcı ağırlığı ve mesafe giriş olarak verilerek basınç değeri çıkış olarak alınmıştır. Derin Sinir ağı modelinin mimarisi Şekil 7'de gösterilmektedir.

The screenshot shows a web-based interface for generating a dataset. At the top, there is a navigation bar with a back arrow, the title 'GENERATOR', and 'SAVE' and 'START' buttons. Below this is a table of parameters for the 'Kingery-Bulsman' equation. The parameters are: Weight Start (1), Weight End (30), Weight Increase (1), Distance (start) (1), Distance (end) (25), Distance (Increase) (1), and TNT Equ (1,0). Below the parameter table is a 'Dataset Directory' section with a text input field containing 'dataset.csv' and 'SELECT' and 'EXPORT' buttons. There is a checkbox for 'Distance Vertical Table' which is currently unchecked. Below this is a 'Dataset' section with a 'Total Count' of 750. The dataset is displayed in a table with columns: weight, pressure, distance, and time. The data rows are as follows:

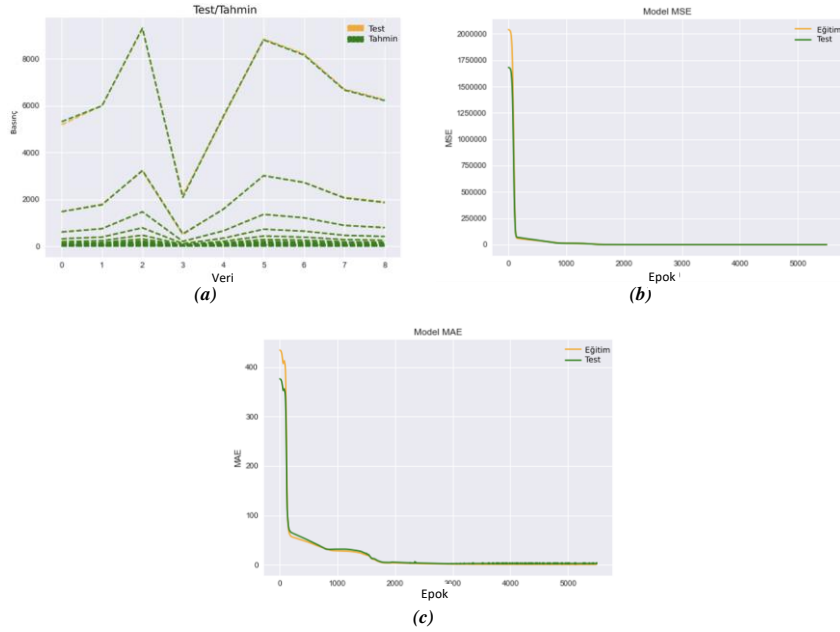
weight	pressure	distance	time
1	1356,739	1	0,468
1	283,758	2	1,696
1	115,667	3	3,544
1	64,907	4	5,783
1	43,184	5	8,245
1	31,749	6	10,83

Şekil 6. Derin Sinir Ağı (DSA) modeli üzerinde eğitim için kullanılan örnek sentetik veri seti için, LAB modülü içerisinde bulunan sentetik veri set oluşturma eklentisi.



Şekil 7. Derin sinir ağı modelinin mimarisi.

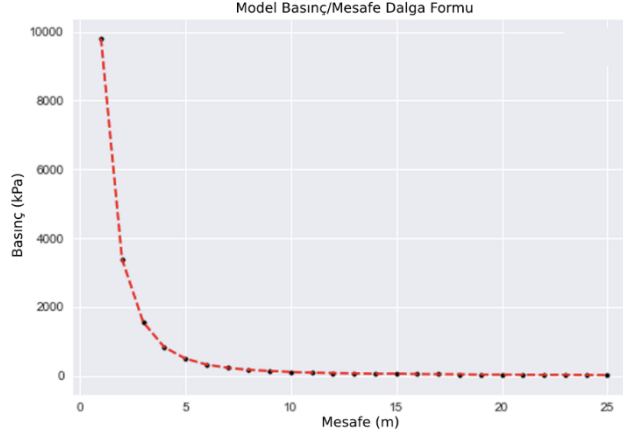
Şekil 8’de eğitim ve test verileri için DSA modelinin performans metrik eğrileri verilmiştir. Şekil 8.a DSA modelinin eğitim ve test datası üzerindeki basınç tahmin grafiğini göstermektedir. Şekil 8.b ve 8.c ise, MSE ve MAE değerlerinin değişimini göstermektedir.



Şekil 8. (a) DSA Modeli Test/Tahmin eğrisi, (b) DSA Modeli MSE/Epok eğrisi, (c) DSA modeli MAE/Epok eğrisi.

Ayrıca, eğitilmiş DSA modeli üzerinde 33 kg TNT patlayıcısının 1-25 metre arası basınç değerleri tahmin edilmiş ve Eşitlik 8’de ifade edilen üstel fonksiyon kullanılarak basınç dalga eğrisi hesaplanmıştır. Böylece 33 kg TNT patlayıcısı için DSA modeli tarafından tahmin edilen basınç/mesafe grafiği elde edilmiştir. Hesaplanan basınç dalgası eğrisi Şekil 9’da sunulmuştur.

$$y = c * r^b \quad (8)$$



Şekil 9. 33kg TNT patlayıcısının DSA modeli ile tahmin edilen basınç dalgası.

Bunun yanı sıra, Tablo 9’da da görüleceği üzere Kingery-Bulmash formülü ile basınç dalgası kPA değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler ile DSA modeli tarafından tahmin edilen basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucuna göre değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 9. 33 kg TNT patlayıcısının 1-5 metre arasındaki formül ile hesaplanan basınç değerleri ile DSA modeli ile tahmin edilen basınç değerlerinin karşılaştırılması.

Basınç	Tahmin	Basınç	Tahmin	Basınç	Tahmin	Basınç	Tahmin	Basınç	Tahmin
9668	9810	3375	3390	1557	1557	836	829	503	496
1m		2m		3m		4m		5m	

Tablo 10’da DSA modeli için performans metrikleri sunulmuştur. R², MSE ve RMSE metriklerinin değerleri sırasıyla 0.93, 20.84 ve 4.56 şeklindedir.

Tablo 10. Eğitimi tamamlanan DSA modelinin test edilmesi sonucu hesaplanan metrik değerler.

R ²	MSE	RMSE
0.93	20.84	4.56

IV. SONUC

Bu çalışmada hem DSA modeli hem de Kingery-Bulmash formülü ile basınç dalgası parametrelerinin tahmin edilmesi için bir çerçeve sunulmuştur. Ayrıca, TNT haricindeki diğer patlayıcıların etkilerinin de hesaplanabilmesi için Hopkinson-Cranz [7][8] ve Sachs [9] tarafından ortaya konulan patlayıcı ölçekleme formülü kullanılmıştır. Bunun yanı sıra patlayıcıların insan ve yapılar üzerindeki etkisini simüle edebilmek ve zararlarını ortaya koyabilmek için çok amaçlı bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen simülasyon yazılımı ile ana unsuru patlayıcı madde olan operasyonlarda yazılım üzerinde gerekli simülasyonlar yapılarak operasyonların etkin ve başarılı sonuçlanmasına katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra terör saldırılarında patlayıcı etkilerinin simüle edilmesi, şüpheli

durumlarda güvenlik çemberinin belirlenmesinde de aktif olarak kullanılması çalışmanın en önemli hedeflerindedir. Bu hedefler doğrultusunda geliştirilen simülasyon yazılımı ile ana unsuru patlayıcı olan eylemlerde meydana gelen aşırı basınç dalgasının çevreye olan etkilerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca patlamamış bomba, mühimmat gibi patlayıcı maddelerin imha edilmesinde tetikleyici olarak kullanılan patlayıcı yükleri için basınç dalgası parametrelerinin hesaplanması sağlanmıştır. Bu sayede patlayıcı imha edilmeden önce gerekli olan patlayıcı yükü tahmin edilerek güvenlik çemberinin belirlenmesi ve analiz edilmesi sağlanmaktadır.

DSA modelinin eğitiminde simülasyon yazılımından elde edilen sentetik veriler kullanılmış ve yeterli düzeyde bir tahmin performansı elde edilmiştir. Ayrıca, gerçek zamanlı patlama sonrası ortaya çıkan aşırı basınç dalgası parametreleri kayıt altına alınarak, DSA modelinin bu verilerle eğitilmesiyle model başarı oranının, tahmine dayalı formüllerin başarı oranının üzerine çıkması sağlanabilir. Bu sayede blast dalgası parametrelerinin tahmin oranı artış göstererek optimum düzeye çıkmasının önü açılacaktır. Ancak gerçek zamanlı veri elde etmek bir hayli zor ve tehlikeli bir süreçtir. Askeri alanda patlayıcı unsuru bulunan operasyonların etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi, bomba imha emniyet mesafesinin belirlenmesi, bomba imha için kullanılan patlayıcıların etki ettiği toplam basınç dalgası alanının hesaplanması gibi birçok alanda sabit formüller yerine patlama verileri ile tahmin yeteneğinin optimum düzeye çıkarılması amaçlanan DSA modellerinin kullanılması hedeflenmelidir.

Blast dalgası parametrelerinin yüksek oranda doğru tahmin edilebilmesi için gerekli olan veri setlerinin geliştirilmesinde, devletler tarafından gerçekleştirilen askeri ve test amaçlı eylemlerde elde edilen verilerin kayıt altına alınması önemli bir kriterdir. DSA modelleri sayesinde, askeri operasyonlarda, operasyon için optimum patlayıcı etkisinin hesaplanması, bomba, füze gibi askeri unsurların modüler sisteme geçirilmesi (operasyon öncesi analizler ile patlayıcı yükünün belirlenmesi) operasyonların başarısını artıracaktır.

V. KAYNAKLAR

- [1] E. Çıtak, “Silahsız savaş sahası: yeni savaş anlayışında istihbaratın yeri,” *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, c. 8, s. 2, ss. 191-213, 2019.
- [2] Icrc (2015, June 15). *Explosive weapons in populated areas humanitarian* [Online]. Available: <https://www.icrc.org/en/document/explosive-weapons-populated-areas-humanitarian-legal-technical-and-military-aspects>.
- [3] S. Saatçı (2010, 15 Nisan). *Darbe ve patlama yüklerine karşı yapı tasarımı* [Çevrimiçi]. Erişim:https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/4b43c082500a6fb_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16
- [4] S. Glasstone and P.J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed., USA: U.S. Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, 1977, pp. 1-644.
- [5] L. Sartori, “The effects of nuclear weapons,” *Physics Today*, vol. 36, no. 3, pp. 32-41, 1983.
- [6] Iatg (2016, March 11). *Formulae for Ammunition Management*. [Online]. Available: <https://s3.amazonaws.com/unoda-web/wp-content/uploads/2019/05/IATG-01.80-Formulae-for-Ammunition-Management-V.2.01.pdf>
- [7] C. Kingery and G. Bulmash, “Air blast parameters from tnt spherical air burst and hemispherical surface burst,” Aberdeen Proving Ground, Army, USA, Rep. 02555, 1984.
- [8] C. N. Kingery, “Air Blast Parameters versus distance for hemispherical tnt surface bursts,” Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground, Maryland, USA, Rep. 1344, 1966.

- [9] B. Hopkinson, "British ordnance board minutes," British Ordnance Office, London, UK, Rep. 13565, 1915.
- [10] C. Cranz, *Lehrbuch der Ballistik*, 2 rd ed., Berlin, Germany: Verlag von Julius Springer, 1926, pp. 1-292.
- [11] R. G. Sachs, "The dependence of blast on ambient pressure and temperature," Ballistics Research Laboratory, USA, Rep. AT1039393, 1944.
- [12] R. Panowicz, M. Konarzewski, M. Trypolin, "Analysis of criteria for determining a tnt equivalent," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 11, pp. 666-672, 2017.