

MAYIN PATLAMASI ETKİLERİNİN KORELATİF YAKLAŞIM İLE LS-DYNA'DA SİMULASYONU VE GERÇEK TESTLERLE DOĞRULANMASI

İzzet Özcan¹, Buğra Işiker²

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, patlayıcı modelini doğrulamak amacıyla çelik pot içerisine yerleştirilen patlayıcılarla serbest alan patlama testleri gerçekleştirilerek basınç verileri toplanmış, aynı sınır koşulları altında LS-DYNA® yazılımında Structured Arbitrarily Lagrangian -Eulerian (SALE) yöntemi kullanılarak patlama analizi gerçekleştirilmiş ve testten elde edilen basınç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Doğrulanmış patlayıcı modeli göz önünde bulundurularak çelik pot içerisine yerleştirilen patlayıcı ile plaka testi gerçekleştirilerek, elastik ve plastik deplasman ölçümleri alınmıştır. Plakanın malzemesi için Split-Hopkinson bar testlerinden elde edilen Johnson-Cook malzeme modeli

kullanılarak SALE yöntemiyle analizler gerçekleştirilmiştir. Plaka ve patlayıcı arasındaki ilişki ile patlayıcının davranışı plaka testinin sonucu olarak incelenmiştir.

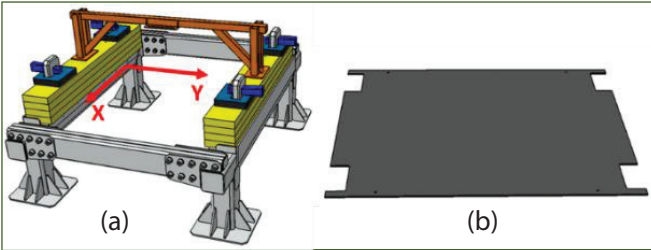
Askeri araçların mayın tehditlerine karşı etkili önlemler alınması temel beklentilerdendir. Bu amaçla, bu araçlar, NATO üyesi ülkelerin askeri alandaki standartlarını belirleyen bir bildirim olan STANAG (Standardization Agreement), standartları tarafından belirlenen koruma düzeylerine göre sertifikalandırılırlar. Araçların üretim sürecinin ardından mayın testleri, mayın tehditlerine karşı koruma düzeylerini belirlemek için gerçekleştirilir. Ancak, mayın testlerinin tehlikeleri ve yüksek maliyetleri nedeniyle günümüzde simülasyon tekniklerine daha çok ilgi

¹ Makina Yüksek Mühendisi, Nurol Makina Sanayi A.Ş. Uzman Analiz Mühendisi - izzet.ozcan@nurolmakina.com.tr

² Makina Mühendisi, Nurol Makina Sanayi A.Ş. Uzman Test ve Doğrulama Mühendisi - bugra.isiker@nurolmakina.com.tr

gösterilmektedir. Araç düzeyinde mayın simülasyonları yapmadan önce, patlayıcı malzemenin fiziksel özelliklerini ve yapısal elemanlar ile etkileşimini doğru bir şekilde anlamak son derece önemlidir.

Bu çalışmada, serbest alan patlama testi ile plaka testi gerçekleştirildi. Serbest alan patlama testi, patlayıcı malzemenin fiziksel özelliklerini incelemek için önemli veriler sağlamıştır. Patlayıcı malzeme ile plaka arasındaki etkileşim, plaka testi yoluyla irdelenmiştir. Şekil 1, test kurulumunu ve plakaların tasarımını göstermektedir. Bu testin sonucu, aynı sınır koşulları altında gerçekleştirilen simülasyon ile karşılaştırılarak, simülasyonların doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanıldı.



Şekil 1. Test Fikstürü (a), Düz Plaka (b)

2. PATLAYICI VE PATLAMA TEKNİKLERİ

Patlayıcılar genellikle kullanım alanlarına ve patlama özelliklerine göre farklı tiplere ayrılır. Askeri uygulama-

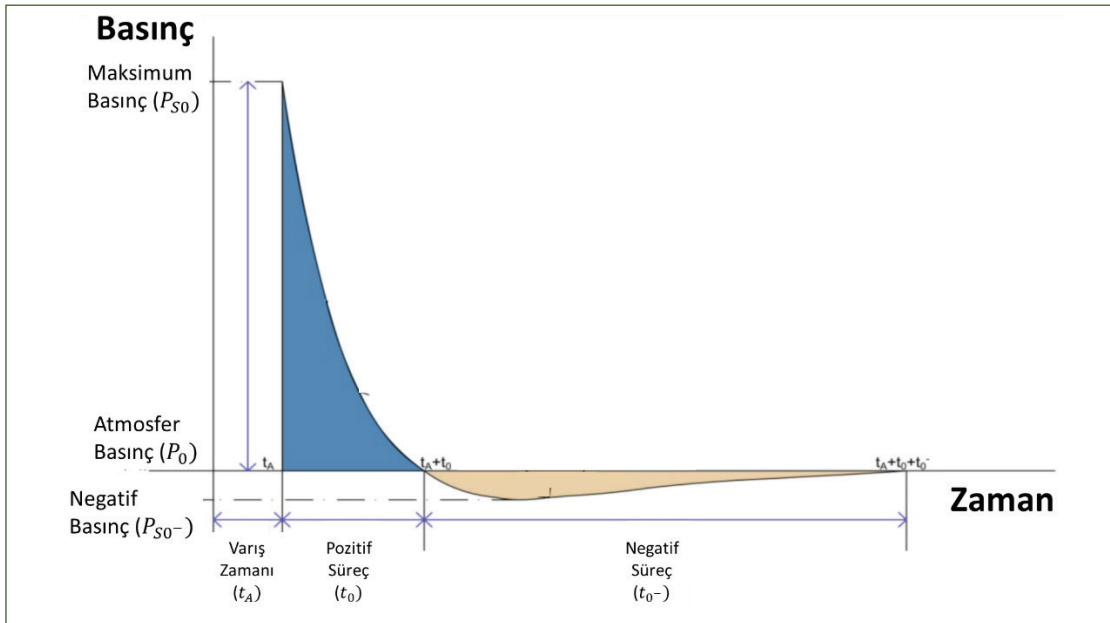
lar için genellikle TNT, C4 veya PETN-B patlayıcıları tercih edilmektedir.

2.1 Patlayıcı Özellikleri

Patlama, enerjinin ani ve son derece hızlı bir şekilde serbest bırakılmasıyla ortaya çıkan fiziksel bir olaydır. Bu olay genellikle yalnızca birkaç milisaniye sürer ve bu kısa süre içinde çok yüksek sıcaklık ile basınç üretir. Patlama olduğunda, patlamanın ürettiği sıcak gazlar hızla alanı doldurmak üzere genişler ve çevre ortamına hiçbir sınır kısıtlaması olmadan küresel olarak yayılan, dalga benzeri bir yayılma oluşturur.

Patlama durumunda, sadece üretilen gazlar genişlemekle kalmaz, aynı zamanda patlamanın çevresindeki hava da benzer bir süreçten geçer. Havanın molekülleri birikir, patlama dalgası ve şok oluşumuna yol açar. Patlama dalgası, patlama sırasında serbest bırakılan enerjinin önemli bir kısmını taşıyarak ve ses hızından daha hızlı hareket eder [1].

İlk şokun varışından önce atmosfer basıncı P_0 'dir. İlk varış zamanı t_A 'de, basınç oldukça ani bir şekilde zirve değeri P_{50} 'a yükselir. Basıncın pik değerine ulaşması için gereken süre çok kısadır ve tasarım amaçları için bu, sıfır kabul edilir. Tepe basıncı P_{50} , aynı zamanda aşırı basınç (overpressure) olarak bilinir. Basınç daha sonra t_A+t_0 toplam süresinde azalarak atmosfer basıncına geri döner. Ardından kısmi olarak vakumlanarak P_{50-} basıncına düşer ve sonrasında atmosfer basıncına geri döner. Başlangıçtaki



Şekil 2. İdeal Patlayıcının Dalga Profili [3]

atmosfer basıncı üzerindeki alan pozitif faz, altındaki alan ise negatif faz olarak adlandırılır. Çoğu patlama çalışmasında, patlama dalgasının negatif fazı göz ardı edilir ve sadece pozitif faz ile ilişkilendirilen patlama parametreleri düşünülür [2].

2.2 Patlama Teknikleri

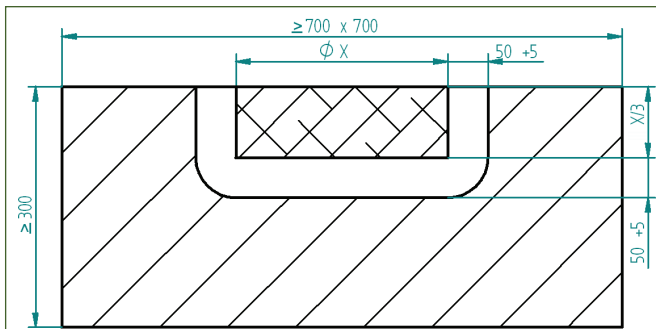
NATO AEP-55 STANAG 4569, "Lojistik ve Hafif Zırhlı Araçların Personel Koruma Seviyeleri" için standartları kapsayan bir NATO Standartlaştırma Anlaşmasıdır. AEP-55 Volume 2, mayın tehdidi ile ilgili zırhlı araçların koruma düzeyini değerlendirmek için gerekli prosedürleri içerir. Bu standart, patlama testi için iki teknik önermektedir [4].

1. Suya doymuş kum-çakıl karışımı altına yerleştirilen patlayıcı
2. Çelik pot içerisine yerleştirilen patlayıcı

Teknik 1 için TNT patlayıcı önerilir. Standart tarafından önerilen koşullara göre hazırlanan, su doymun, kumlu çakıl toprak kullanılır.

Teknik 2 için C4 veya PETN-B patlayıcılar için önerilir. Çelik pot yöntemi kullanılarak testlerin kontrolü daha kolaydır ve tekrarlanabilir test koşulları sunar. Bu çalışmada çelik pot yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 3, patlayıcı ve çelik pot'un geometrik özelliklerini göstermektedir. Geometrik ayrıntılar, istenen tehdit düzeyi gerekliliklerine göre belirlenir.



Şekil 3. Patlayıcı ve Çelik Pot'un Geometrik Özellikleri [4]

3. GERÇEK TEST KAMPANYALARI VE LS-DYNA®'DA PATLAMA SİMÜLYASYONU

Serbest alan patlama testleri, patlayıcı maddeye ait fiziksel özelliklerini elde etmek için değerli veriler sağlamıştır.

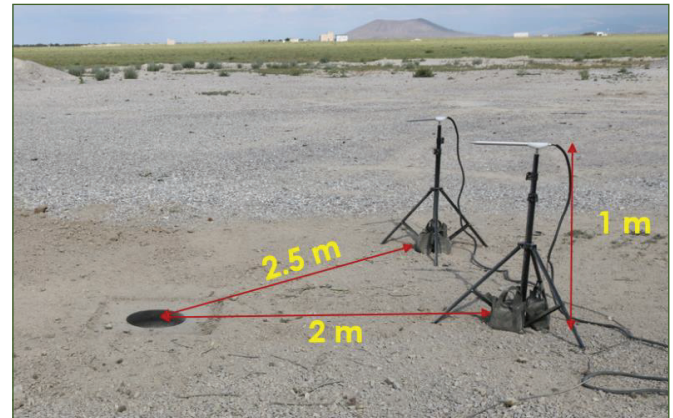
Ayrıca, patlayıcı malzeme ile yapısal eleman arasındaki etkileşim düz plaka testi gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Bu testlerden elde edilen basınç ve deplasman verileri irdelenerek, simülasyonu doğrulama amacıyla kullanılmıştır.

LS-DYNA® yazılımı, mayın patlamalarını simüle etmek için Conweb, ALE, S-ALE, SPH, CESE ve DEM yöntemlerini kullanarak çeşitli yöntemleri sunmaktadır. Bu çalışmada, serbest alan patlama testi için iki boyutlu S-ALE yöntemi, plaka testi için ise üç boyutlu S-ALE yöntemi kullanıldı.

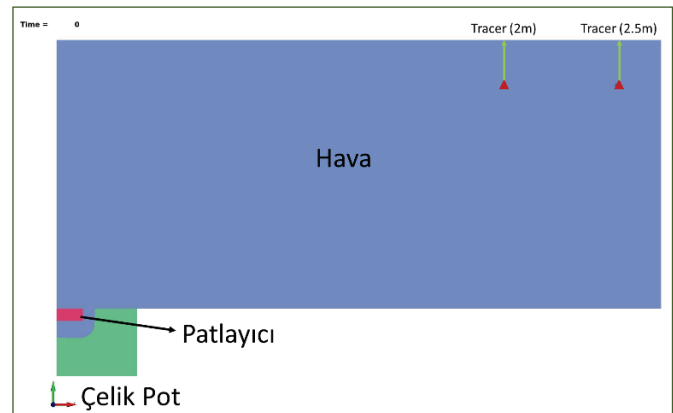
3.1 Serbest Alan Patlama Testi

Patlayıcının davranışını gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çelik pot içine yerleştirilen C4 patlayıcı 2 m ve 2,5 m uzaklıklarda konumlandırılan kalem tipi basınç sensörleri kullanılarak patlayıcının yarattığı basınç ölçülmüştür. Patlama testinin koşulları Şekil 4'te gösterilmiştir.

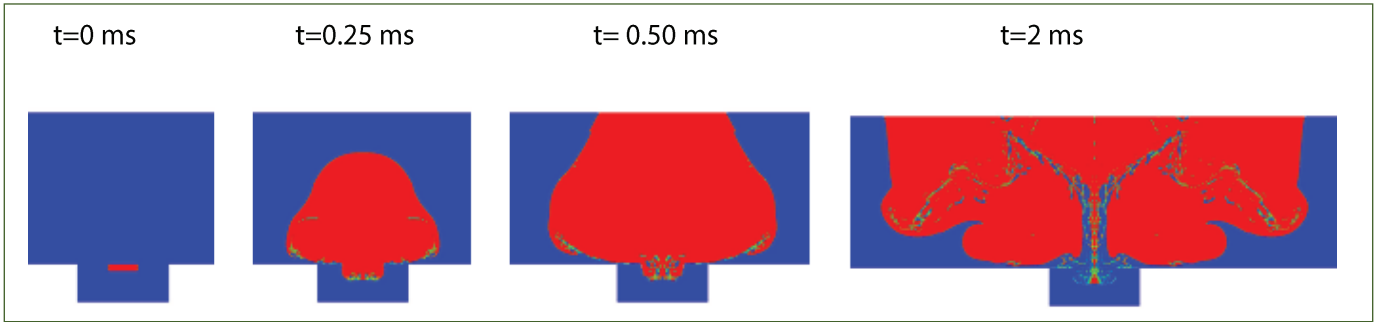
Test sınır koşulları, LS-DYNA® yazılımı içinde iki boyutlu aksiyel simetrik (aksisimetrik) S-ALE yöntemi kullanılarak



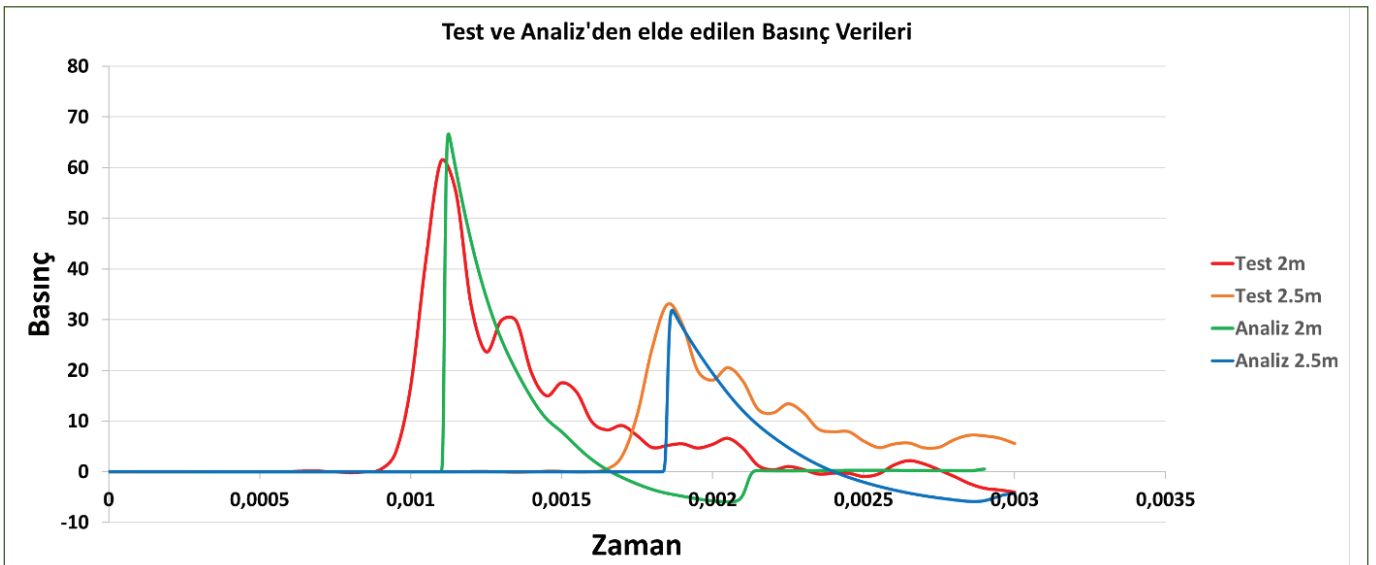
Şekil 4. Serbest Alan Patlama Testi Kurulumu



Şekil 5. LS-DYNA®'da Serbest Alan Patlama Analiz Modeli



Şekil 6. Serbest Alan Patlaması Sırasında Patlayıcının Zamana Göre Hacimsel Dağılımı



Şekil 7. Zamana Göre Test ve Analiz Basınç Eğrilerinin Karşılaştırılması

rak simüle edildi. İki boyutlu aksisimetrik S-ALE yöntemi, daha küçük mesh (ağ) modelini kullanarak daha az hesaplama süresi ile sonuç elde etmemizi sağlamıştır. Analizde, patlama sırasındaki basınç değerlerini elde etmek için testte konumlandırılan basınç sensörlerinin konumlarına izleyiciler (tracers) eklendi. Daha sonra, test verileri ile analiz sonuçlarını karşılaştırarak patlayıcı malzemenin sonlu eleman modeli doğrulanmıştır.

Tablo 1. Gelen Basınç ve Varış Zamanı İçin Test ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması

		Test	Analiz	Hata [%]
2 m	Gelen basınç	61.25	66.64	8
	Varış zamanı	0.0011	0.00122	-
2.5 m	Gelen basınç	33.05	31.87	3
	Varış zamanı	0.00185	0.00186	-

Patlayıcı için "*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN" ve "*EOS_JWL" malzeme modelleri kullanıldı [5]. Hava için ise "*MAT_NULL" ve "EOS_LINEAR_POLYNOMIAL" malzeme modelleri kullanıldı.

2D S-ALE modeli, "*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY" kullanılarak oluşturuldu. Patlama senaryosuna göre S-ALE elemanları "*CONTROL_ALE" kartı kullanılarak kontrol edildi.

Test ve simülasyon basınç sonuçları Şekil 7'de karşılaştırılmıştır.

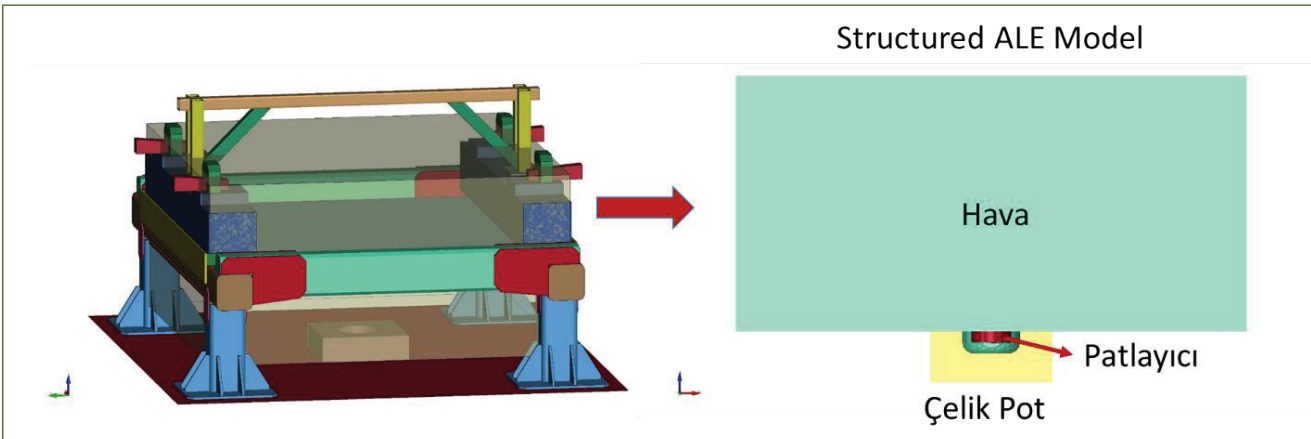
Analiz çalışması sonucunda, LS-DYNA® ile tanımlanan izleyicilerden (tracers) ölçülen gelen basınçlar, testten elde edilen basınç değerleri ile yüksek oranda doğrulanmıştır.

3.2 Düz Plaka Patlama Testi

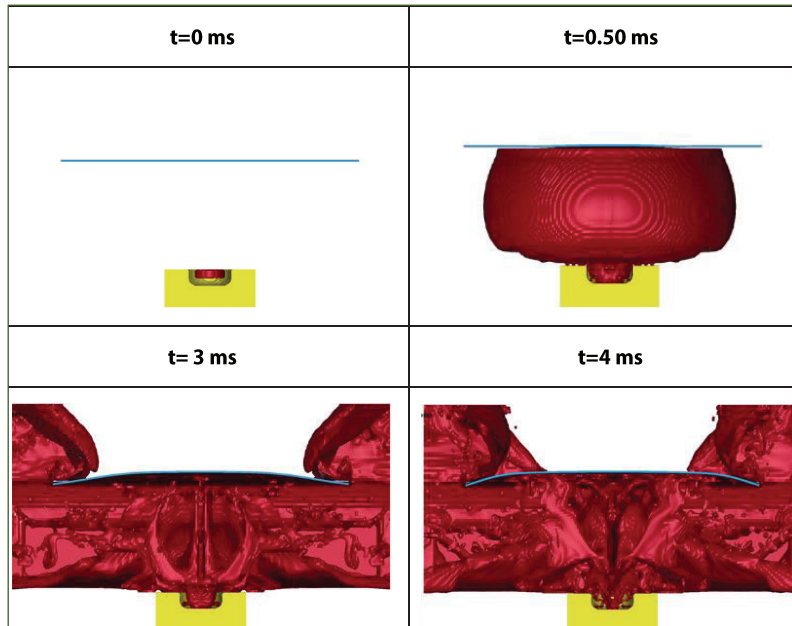
Düz plaka patlama testi, patlayıcı ile plaka arasındaki etkileşimi simüle etmek için gerçekleştirilmiştir. Patlama



Şekil 8. Düz Plaka Testi (a) Test Öncesi (b) Test Sonrası



Şekil 9. Düz Plaka Analiz Modeli ve Ayrıntılı Structured ALE Modeli

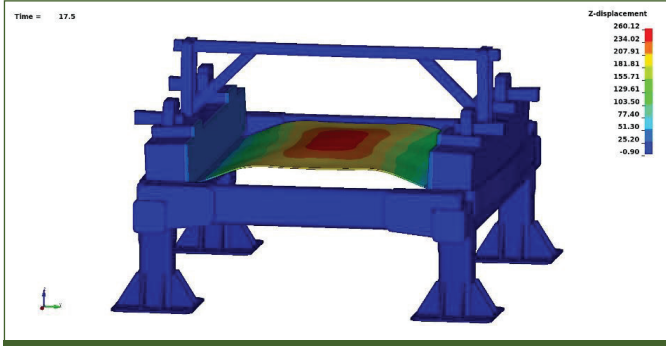


Şekil 10. Patlama Simülasyonunun Aşamaları / Patlayıcı ve Düz Plakanın Etkileşimi

sırasında plakanın deplasmanı test seh-pasına ve plakanın merkezine konumlan-dırılan deplasman konisi ile ölçülmüştür.

Patlama simülasyonu, LS-DYNA® yazılı-mında S-ALE yöntemi kullanılarak ger-çekleştirildi. Çelik pot, patlayıcı ve hava, S-ALE modeli ile modellenirken diğer ya-pısal elemanlar Lagrange eleman modeli kullanılarak modellenmiştir. Analiz mo-delisi Şekil 9'da gösterilmektedir.

Patlama simülasyonu gibi kısa süreli olayları ve yüksek deformasyonları içe-ren açık (explicit) analiz çalışmalarında, malzemenin doğru tanımlanması, simü-lasyon sırasında malzeme davranışını gözlemlemek için büyük önem taşır. Bu çalışmada, plaka için Split-Hopkinson



Şekil 11. Analizde Düz Plakada Oluşan En Yüksek Deformasyon

Tablo 2. Test ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması

	Test	Analiz	Hata [%]
Elastik Deformasyon	235 mm	251 mm	6.8

bar testlerinden elde edilen "*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK" malzeme modeli, test sehpası için ise "*MAT_PLASTIC_KINEMATIC" malzeme modeli kullanıldı. Langrange olarak modellenen yapısal elemanlar ile S-ALE modeli arasındaki ilişki, "*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID" kartı kullanılarak kurulmuştur.

Test sehpası ile düz plaka arasında "*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE" kontak tipi tanımlanmıştır.

Simülasyon sırasında herhangi bir sızıntı sorunu gözlenmemiştir.

Elastik deformasyon, düz plakanın merkezi ile deplasman konisinin montajlandığı üst destek çubuğu arasındaki bağıl deplasman ile elde edilmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, test edilen ve LS-DYNA® yazılımında analizleri gerçekleştirilen iki farklı patlama testi irdelendi. Bu testlerin temel amacı patlama simülasyonunu doğrulamaktır.

Serbest alan patlama testi, patlayıcının genel davranışını ve fiziksel özelliklerini anlamamıza yardımcı olmuş; test ve analizden elde edilen basınç verileri ile başarılı bir doğrulama çalışması yapıldığı gözlemlenmiştir.

Serbest alan patlama testlerinden elde edilen doğrulanmış patlayıcı özellikleri, plaka analizinde kullanıldı. Plaka testi, patlayıcı ile plaka arasındaki etkileşimleri incelemek için gerçekleştirildi. Plaka analizlerinde herhangi bir sızıntı görülmedi. Düz plaka testinin analizi ile karşılaştırıldığında % 6.8 deplasman farkı ile doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın uzun vadedeki amacı, araç seviyesinde gerçekleştirilecek olan patlama simülasyonları için doğru malzeme davranışları ile doğru modelleme yöntemlerine erişerek gerçekleştirilecek olan simülasyonların test verileri ile karşılaştırıldığında yakınsama derecesini artırmaktır. Bu sayede test maliyetleri olabildiğince düşürülmesi, ilerleyen dönemde de test maliyetlerinin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma sayesinde elde edilen verilerle gelecekteki çalışmalar için referans bilgiler oluşturulması için çalışılmaktadır.

5. TEŞEKKÜRLER

Test düzeneklerini bizimle paylaşmalarından dolayı Nuro Holding bünyesindeki FNSS Savunma Sistemleri A. Ş firmasına ve özellikle de değerli destekleri için İlker Kurtoğlu'na teşekkürlerimizi sunarız

KAYNAKÇA

1. **Baker, W.E.** Explosions in Air; University of Texas Press: Austin, TX, USA, 1973.
2. **Baker, W.E.; Cox, P.A.;** Westine, P.S.; Kulesz, J.J.; Strehlow, R.A. Explosion Hazards and Evaluation; Elsevier Scientific Publishing Company: New York, NY, USA, 1983
3. **Filice, A.; Mynarz, M.; Zinno, R.** Experimental and Empirical Study for Prediction of Blast Loads. Appl. Sci. 2022, 12, 2691.
4. AEP-55, Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles Volume 2. November 2010.
5. **Dobratz B. M., Crawford P. C.,** LLNL Explosives Handbook – Properties of Chemical Explosives and Explosive Stimulants, Lawrence Livermore National Laboratory, California, USA, 1985.
6. LS-DYNA® Keyword manual R13.1