

YÜKSEK MERMİ ÇARPIŞMA DURUMUNDA ZIRH KOMBİNASYONLARININ NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Güralp Başaran¹
Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Ercan Gürses²
Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Balistik çarpışma gibi ekstrem yükleme koşulları içeren durumlarda iyileştirilmiş sayısal modeller gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu çalışma zırhlı araçlarda meydana gelmesi muhtemel balistik çarpışma durumunun sonuçlarının sayısal çözümler ile tahmin edilebilmesi amacıyla yapılmıştır. Sayısal araştırma, tek katmanlı veya çift katmanlı çelik-alüminyum zırhların 7.62-mm APM2 mermisi ile 820m/s hızda çarpıştırılması sonucu zırh performanslarının incelenmesi üzerinedir. Sayısal model LSDYNA® açık çözücüsü kullanılarak geliştirilmiştir. Analiz sonuçlarında, APM2 mermi çıkış hızının, farklı metalik zırh kombinasyonları kullanıldığında ne mertebelerde değiştiği incelenmiştir. Farklı kalınlıklarda zırhlar 3 değişik kombinasyonda modellenmiştir. Kullanılan sayısal modelde zırhlar ve mermi şekil değiştirebilir malzemeler olarak, literatürde bulunan Değiştirilmiş Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Hazırlanan sayısal model mermi çıkış hızları ve literatür sonuçları arasında iyi derecede korelasyon yakalanmıştır.

GİRİŞ

Balistik koruma savunma sanayi özelinde oldukça önemli hale gelmiştir. Zırhlı araçların koruma seviyesi kapsamında zırhların mermilere karşı dirençleri, malzeme davranışı, zırh kalınlığı, çarpışma açısı, merminin biçimi ve büyüklüğü gibi birçok parametreye bağlıdır. Bütün bu parametrelerin dışında kullanılan zırh kombinasyonlarının da balistik limitlerin belirlenmesi konusunda oldukça önemli bir yeri vardır. Yapılan çalışmada, Weldox700E ve Al7075 zırh kombinasyonlarına 7.62mm zırh delici mermi ile delinmesinin bilgisayar ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Malzeme seçimi zırh alanında spesifik olarak kullanılan malzemeler arasından seçilmiş, malzeme mekanik özellikleri literatürden alınmıştır [3].

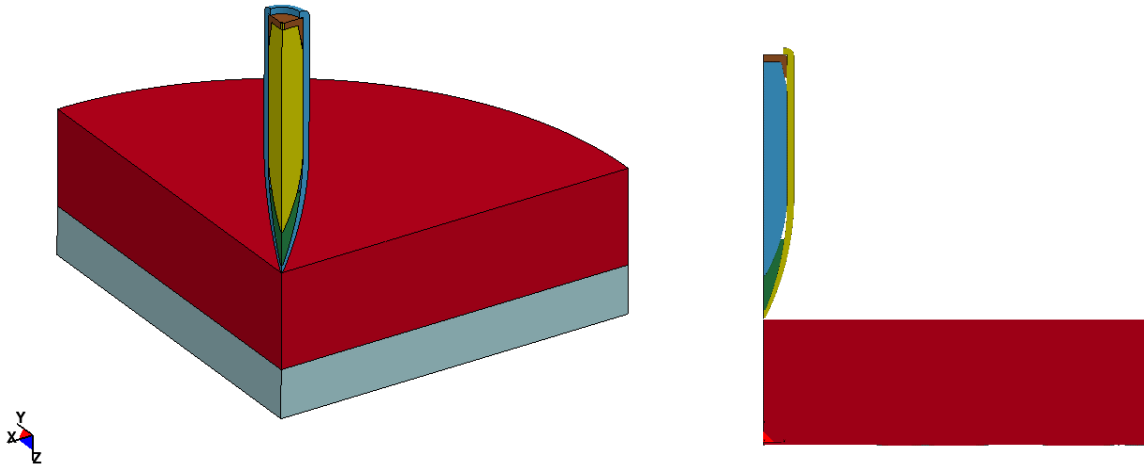
YÖNTEM

ANALİZ MODELİ

Kurulan zırh ve mermi modeli LSDYNA® açık çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. LSDYNA®'nın 7.1.3 versiyon çözücüsü kullanılarak 820m/s 'lik hız *INITIAL_VELOCITY_NODE kartı kullanılarak uygulanmıştır.

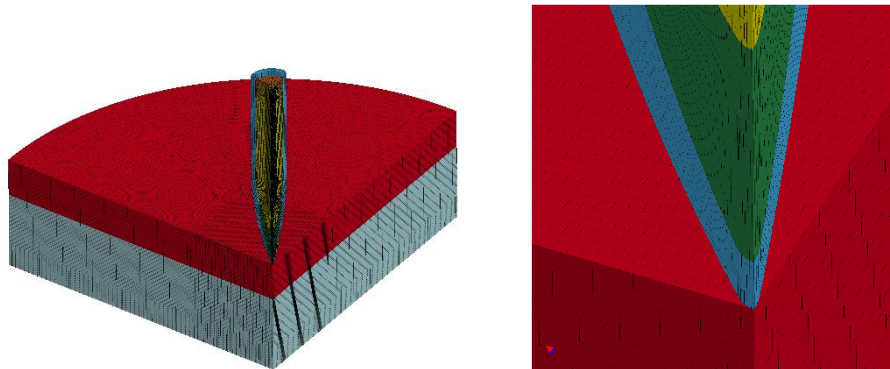
¹ Güralp Başaran Havacılık ve Uzay Müh. Böl., Eposta: guralp.basaran@metu.edu.tr

² Doç. Dr Ercan Gürses, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: egurses@metu.edu.tr



Şekil 1 Çeyrek model Görünümü [1]

Çeyrek model analiz süresini azaltmak adına tercih edilmiştir. Katı Model üzerinde 8 düğüm noktalı sabit gerilme elemanı (ELFORM=1) ve 6 numaralı katılık tabanlı kum saati sönümleme (hourglass damping) modeli kullanılmıştır. Model üzerinde farklı kum saati sönümleme formülasyonları arasında kıyaslama da yapıp çıkış hızına etkileri ayrıca ele alınmıştır. [2] Hedef zırh yapısı 50mm yarıçaplı silindir olarak Şekil 1’de gösterildiği gibi modellenmiştir. Sayısal modelin doğrulama analizleri sadece 16mm tek katmanlı Weldom700E zırh için yapılmıştır.



Şekil 2 Çeyrek analiz modelinin ağ yapısı görünümü [1]

Çarpışma bölgesindeki ağ yapısı zırhın diğer bölgelerine göre daha küçük eleman boyutları kullanılarak modellenmiştir. Bu bölge eleman boyutları 0.2x0.3mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde elemanlar ile modellenmiştir. Eleman boyutları analiz süresini kısaltmak adına çarpışma bölgesinden uzaklaştıkça büyütülmüştür. Analizleri doğrulamak adına sayısal model üzerinde ağ yapısının hassaslığı analiz edilmiştir. Bu çerçevede farklı eleman boyutları kullanılarak analiz sonuçlarını değiştirmeyen en uygun ağ yapısı bulunmuş ve zırh kombinasyonlarının kıyaslanması yapılmıştır.

MALZEME MODELİ

LS-DYNA içerisinde bulunan Değiştirilmiş Johnson-Cook malzeme modeli hem mermi parçaları hem de zırh modellemesi için tercih edilmiştir. Genelde balistik analizlerde kullanılan Johnson-Cook malzemesinden farklı olarak, Değiştirilmiş Johnson-Cook malzemesinin en temel farklılığı, gerinme oranı ve hasar kriteri modellenmesi kısmıdır [1]. Cockcroft-Latham hasar kriteri modeli Değiştirilmiş Johnson-Cook malzeme modeli tarafından kullanılan hasar kriteridir. Bu kriter normal Johnson-Cook

malzemesinin hasar kriterinin çok daha basitleştirilmiş halidir ve malzeme tanımında herhangi bir ek durum denklemi tanımına ihtiyaç duymaz. Malzeme girdi parametrelerinin tanımlanması kısmında Johnson Cook malzeme modeli D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 gibi hasar kriteri parametrelerine ihtiyaç duyarken Değiştirilmiş Johnson-Cook malzeme modeli bir tek Cockcroft-Latham (W_{cr}) parametresi ile malzemenin kayba uğradığı durumu modelleme de kullanır. [5] Analizlerde kullanılan malzeme parametrelerinin değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

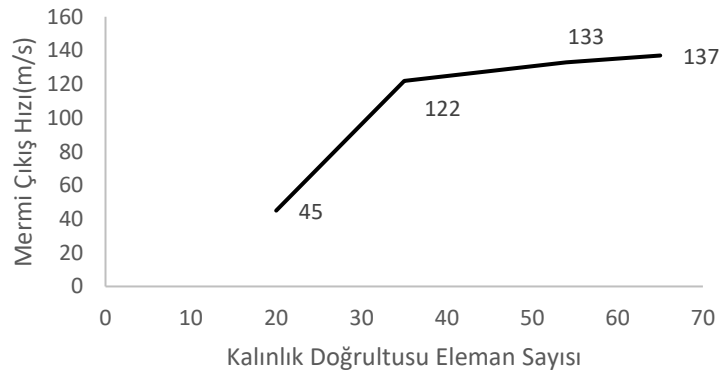
Tablo 1 Analizlerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri [1]

Parametreler	Weldox700E	Mermi Çekirdeği	Mermi Başlığı	Mermi Ceket	Al7075-T651
E (Young Modülü) [GPa]	210	210	1	115	70
ν (Poisson oranı)	0.33	0.3	0.42	0.31	0.3
ρ (Yoğunluk) (kg/m ³)	7850	7850	10660	8520	2700
A (Akma dayanımı) [MPa]	819	1200	24	206	520
B (Gerinme Sertleşme Parametresi)	308	50000	300	505	477
n (Strain hardening parameter)	0.64	1	1	0.42	0.52
ϵ_0 (Gerinme Sertleşme Parametresi) [1/s]	5e-4	5e-4	5e-4	5e-4	5e-4
C (Gerinme Oranı hassaslık parametresi)	0.0098	0	0.1	0.01	0.001
Tr (Oda Sıcaklığı) [K]	293	293	293	293	293
Tm (Erime Sıcaklığı) [K]	1800	1800	760	1189	893
m (Termal Yumuşama Parametresi)	1	1	1	1	1.68
Cp (Özgül Isı Kapasitesi) [J/kg/K]	452	910	124	385	910
X (Taylor-Quinney katsayısı)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
α (Termal Genleşme Katsayısı) [1/K]	1.2e-5	1.2e-5	2.9e-5	1.9e-5	2.3e-5
W_{cr} (Cockcroft-Latham parametresi) [MPa]	1486	-	175	914	106

UYGULAMALAR

Ağ Yapısı Hassasiyeti Çalışmaları

Zırh kombinasyonları için analizler yapılmadan önce sayısal modelin yeterliliğini tayin etmek adına analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak ağ yapısının hassasiyetini belirleme çalışmalarına öncelik



Şekil 3 Ağ Yapısı Hassasiyeti Analizleri

verilmiştir. Farklı boyutlarda elemanlarla modellenen hedef üzerinde merminin çıkış hızlarındaki değişim ağ yapısının uygun olup olmadığı ile ilgili fikir verecektir. Analiz sonuçlarının literatür üzerinden alınan test verileriyle oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

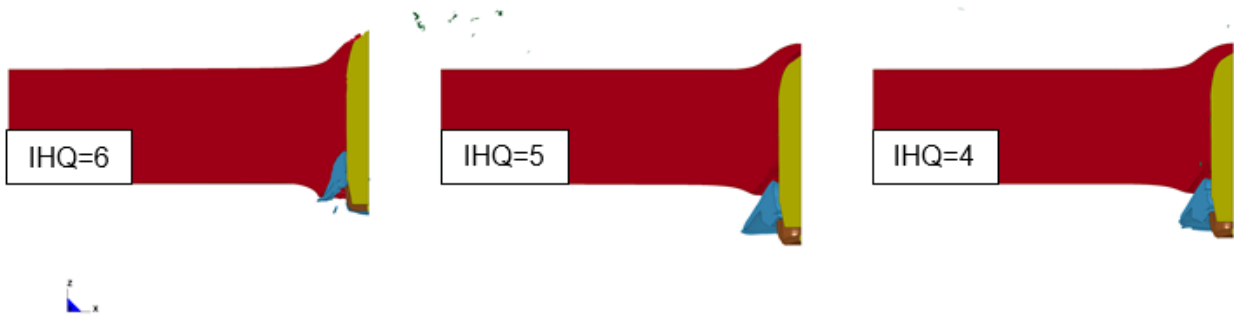
Tablo 2 Farklı Sayıda Düğüm Noktası İçeren Model Mermi Çıkış Hızları

Model Numarası	Kalınlık Doğrultusunda Kullanılan Eleman Sayısı	Mermi Çıkış Hızı[m/s]
1	65	137
2	54	133
3	35	122
4	20	45
Deney [3]	-	152

Mermi çıkış hızları ve hedef üzerinde kalınlık doğrultusunda kullanılan eleman sayıları Tablo 2’ de gösterilmiştir. Mermi çıkış hızları incelendiğinde Model 4’ün test sonuçlarından oldukça uzak sonuç verdiği görülmüştür. Model 1 ve Model 2 arasındaki farkın %1-2 mertebelerinde olması hedef modeli için kalınlık doğrultusunda yeterli eleman kullanıldığını göstermiştir. Analiz süresinden de kazanmak ve mermi çıkış hızlarındaki farklılığın çok az olması nedeniyle zırh kombinasyonları için yapılacak analizlerin ağ yapısının yoğunluğuna Model 2’deki gibi olmasına karar verilmiştir.

Farklı Kum Saati Sönümleme ve Eleman Formülasyonları

Farklı eleman boyutları ile yapılan analizlerin sonuçlara etkisinin incelenmesinden sonra analizlerde kullanılan Kum saati sönümleme formülasyonunun farklı metotlarının analiz sonuçlarına etkisi de incelenmiştir. LS-DYNA içerisinde bulunan Kum saati formülasyonlarından katılık formülasyonuna sahip olan metotlar arasında kıyaslama yapılmıştır. Katılık bazlı formülasyona sahip kum saati sönümleme metotları toplam enerji ile dış kuvvetlerin yaptığı iş ve ilk durumdaki toplam enerji arasındaki oranı 1 değerine yakın tuttuğu için genel olarak tercih edilmiştir. LSDYNA içerisinde bulunan üç tip (TYPE=4,5,6) formülasyonlar için analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4 Farklı Kum Saati Formülasyonları Kullanılarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları[1]

Şekil 4’te son zaman adımında hedeflerin ve merminin şekil değiştirmiş hali farklı kum saati formülasyonları için gösterilmiştir. Sönümleme faktörü bütün formülasyonlar için 0,13 olarak alınmıştır.

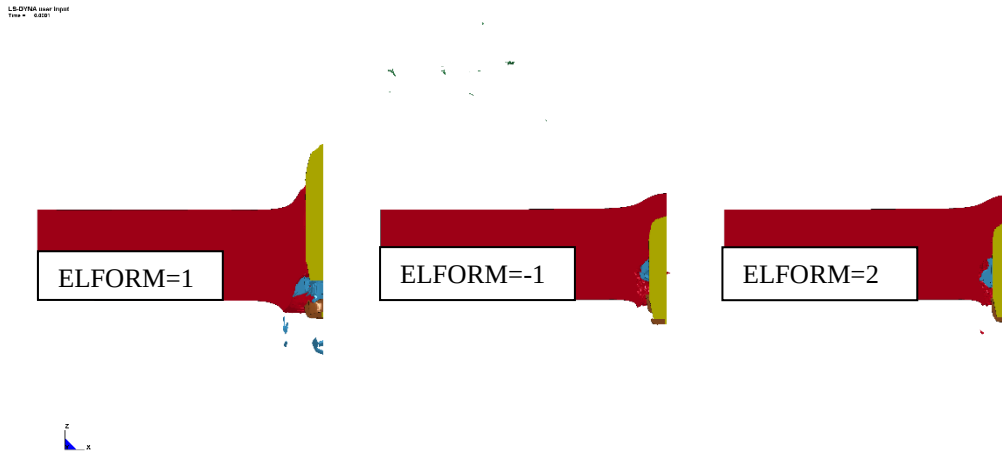
Tablo 3 Mermi Çıkış Hızları Farklı Kum Saati Damping Formülasyonları Kıyaslanması

Kum Saati Formülasyonu	Damping Değeri	Mermi Çıkış Hızı[m/s]
4	0.13	0
5	0.13	0
6	0.13	133
Deney[3]	-	152

Tablo 4'te balistik çarpışma durumları için katılık bazlı kum saati sönümleme formülasyonlarının analiz sonuçlarına etkisi gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde test sonuçlarına en yakın sonucun 6 numaralı formülasyon ile yakalandığı görülmüştür.

Farklı Eleman Formülasyonları Kullanılarak Yapılan Analizler

Kum saati sönümleme faktörü dışında analizlerde kullanılan eleman tipi için ayrıca detay analizler yapılmıştır. LS-DYNA içerisinde bulunan tek integrasyon noktalı ve tam integrasyon noktalarına sahip eleman tipleri kullanılarak 16mm kalınlığındaki tek katmanlı Weldom700E malzemesine çarpışma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda LS-DYNA içerisinde bulunan eleman tipleri (ELFORM=-1,1,2) arasında çıkış hızları üzerinden kıyaslama yapılacaktır. Kısaca kullanılan eleman formülasyonlarından -1 ve 2 numaralı formülasyon tüm integrasyon noktalarına sahip eleman tipleridir. Tüm integrasyon noktalarına sahip bu iki eleman tipi arasındaki temel fark -1 numaralı formülasyonun sayısal analizde enine kesme kilitlenmesi (transverse shear locking) davranışına daha az izin vermesidir. Bu bağlamda 2 numaralı tüm integrasyon noktalarına sahip eleman tipinin -1 numaralı formülasyona göre test değerlerine kıyasla daha güvenli sonuçlar vereceği söylenebilir. 1 numaralı formülasyon ise tek integrasyon noktalı sabit gerilme elemanıdır. Bu eleman genel olarak açık çözücülerde analiz süresini uzatmaması nedeniyle tercih edilen bir eleman tipidir.



Şekil 5 Mermi Çıkış Durumlarının Farklı Formülasyonlar için gösterimi[1]

Mermi çıkış durumları farklı eleman formülasyonları için Şekil 5 ve Tablo 5'te gösterilmiştir. Tablo 5'te mermi çıkış hızı bilgileri ile eleman formülasyonlarının analizlere etkisi daha belirgin bir halde belirtilmiştir.

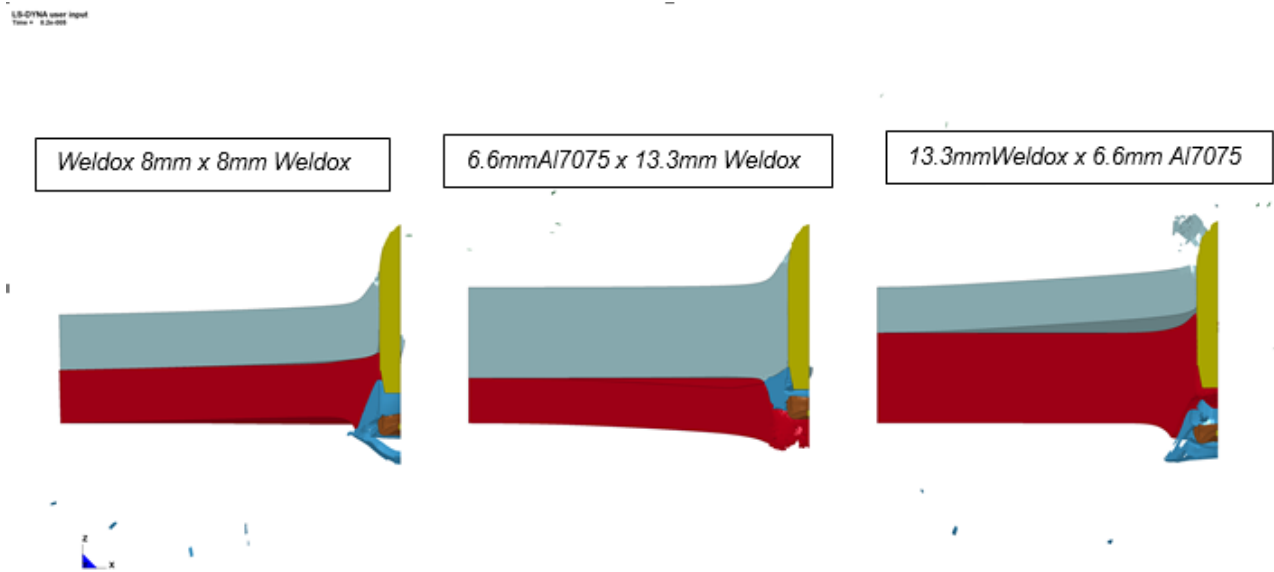
Tablo 4 Mermi Çıkış Hızı Değerleri

ELFORM	Mermi Çıkış Hızı[m/s]
1	133
2	0
-1	0
Deney [3]	152

Mermi çıkış hızları üzerinden tüm integrasyon noktalı eleman tiplerinin yapıyı daha güvenli tarafta bırakarak analiz sonuçlarını verdiği ve test değerlerine en yakın sonucun 1 numaralı tek integrasyon noktalı formülasyon tarafından sağlandığı görülmüştür. Bu doğrulama analizlerinin ardından, mevcut analiz modeli için zırh kıyaslama analizlerinin tek integrasyon noktalı eleman formülasyonu üzerinden yapılmasının uygun olduğu görülmüştür.

Zırh Konfigürasyonları Analizleri

Zırh Konfigürasyonları analizleri kapsamında Weldom700E ve Al7075 malzemeleri için beraber kullanılmaları durumunda balistik performansları incelenmiştir. Ayrıca bu çift katmanlı zırh performanslarının aynı zaman da tek katmanlı versiyonları ile ilgili kıyaslanması da yapılmıştır.



Şekil 6 Zırh Konfigürasyonları analiz görselleri

Şekil8’de çift katmanlı zırhların analiz sonuçları gösterilmiştir. İlk model ikişer adet 8mm kalınlığında Weldom700E plakadan oluşturulmuştur. Kullanılan diğer iki zırh modeli toplamda 20mm olacak şekilde alüminyum-çelik kombinasyonu kullanılarak modellenmiştir. Balistik performanslarının yanı sıra kullanılabilirlik ve ağırlık açısından zırhların değerlendirmesi dikkate alınacaktır. Aynı zamanda Al7075 malzemesinin merminin ilk temas ettiği yüzey ve son çıkış yüzeyi olması durumu için ayrı ayrı zırh konfigürasyonlarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Tablo 5 Zırh Konfigürasyonları Mermi Çıkış Hızı Sonuçları

Model Numarası	Konfigürasyon	Mermi Çıkış Hızı[m/s]
1	16mm Tek Katmanlı Weldom	133
2	16mm Çift Katmanlı Weldom	235
3	6.6mm Al7075 + 13.3mm Weldom	174
4	13.3mm Weldom + 6.6mm Al7075	262

Analiz sonuçları incelendiğinde en iyi balistik performansın tek katmanlı Weldom700E plakasında sağlandığı görülmüştür. Tek katmanlı zırh modelinin eğilme rijitliğinin çift katmanlı modele göre daha fazla olması nedeniyle tek katmanlı zırh, balistik açıdan çift katmanlı modellere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. En düşük mermi çıkış hızı tek katmanlı Weldom700E zırhında görülmüştür. Model 3 ve Model 4'ün sonuçları incelendiğinde, üç numaralı zırh modelinin daha başarılı olduğu görülmüştür. Model 3'de ikinci katman (mermi çıkış katmanı) Weldom 700E olması nedeniyle Model 4'deki gibi mermi çıkış esnasında sünek bir kırılma gözlenmemiştir. Bu nedenle üç numaralı zırh konfigürasyonu dört numaralı modele göre daha iyi balistik performans sergilemiştir. Elde edilen sonuçlar referans çalışma ile uyumlu çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar referans alınan çalışma ile uyumlu çıkmıştır. [3]

SONUÇ

Weldom-Aluminyum zırh konfigürasyonlarının 7.62AP2M mermiye karşı 820m/s hızda balistik çarpışmaya karşı dirençleri nümerik olarak değerlendirilmiştir. Nümerik modelin validasyonu için iki boyutlu ve üç boyutlu Lagrange yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca, farklı eleman formülasyonlarının, kum saati formülasyonlarının ve ağ yapısının mermi çıkış hızlarına etkisini değerlendirmek için her bir parametre tek tek ele alınıp nümerik açıdan incelenmiştir. Tek katmanlı ve çift katmanlı zırhların balistik performanslarının değerlendirmesi yapılmıştır.

Nümerik modelin validasyon çalışmaları 16mm tek katmanlı Weldom700E zırh için yapılmıştır. Zırh ağ yapısının özellikle, zırhın kalınlık doğrultusundaki eleman sayısının balistik analizlerde önemi oldukça büyüktür. Kalınlık yönünde kullanılan eleman sayısının mermi çıkış hızına direkt olarak etkisi olduğu görülmüştür. Uygun ağ yapısı kullanılmayan durumlarda sonuçlarda oluşacak hata payının oldukça büyük olacaktır. Ağ yapısı eniyileme çalışmalarının balistik problemlerde yapılmasının kaçınılmaz olduğu görülmüştür. Mermi modeli ağ yapısının sonuçlarına etkisi ileri ki çalışmalarda incelenecektir.

Kum saati formülasyonları ve eleman formülasyonlarının sonuçlara etkisi incelenmiştir. Analizler optimum nümerik modelin elde edilmesi için yapılmıştır. Analizlerde üç adet farklı kum saati formülasyonu çözdürülmüştür. Sabit bir sönümlenme katsayısı değeri altında farklı formülasyonların davranışı incelenecektir. Kum saati sönümlenme katsayısı 0,13 olarak kullanılmış ve farklı sönümlenme yöntemlerinin mermi çıkış hızlarına etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında en iyi sonucu tip 6 kum saati formülasyonunun sağladığı görülmüştür. Tip 4 ve Tip 5 kum saati formülasyonlarının gerçek duruma nazaran daha güvenli sonuçlar verdiği ve yapıyı daha rijitleştirdiği görülmüştür.

Eleman formülasyonlarının balistik analiz sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Ful integrasyon noktalı eleman tiplerinin tek integrasyon noktalı modele göre daha rijit sonuçlar verdiği görülmüştür. Test sonuçlarıyla en yakın korelasyon tek integrasyon noktalı eleman tipinde yakalanmıştır.

Tek katmanlı ve çift katmanlı Al7075 ve Weldom700E zırh kombinasyonları çalışılmıştır. Tek katmanlı weldom700E zırhı çift katmanlı hale dönüştürmek, zırhın eğilme rijitliğini azalttığı için, çift katmanlı zırhın balistik limiti tek katmanlıya göre daha düşük çıkmıştır. Balistik limitteki azalma katman sayısındaki artıştan kaynaklanmıştır. Analiz sonuçlarından tek katmanlı zırhın en iyi balistik

performansı verdiği görülmüştür. Zırh modellerinde ağırlık değerinin ayrıca bir önemi olduğu için genel olarak tamamen çelik malzemeden oluşmuş konfigürasyonlar seçilmez.

Gelecek çalışmalar kapsamında tek ve çift katmanlı zırhlar için 800m/s-950m/s mermi hızları aralığında farklı kalınlıklarda zırhların bu doğrulanmış model üzerinden, mermi çıkış hızları ve mermi giriş derinliklerini yapay sinir ağı (Artificial Neural Network) yardımıyla pahalı bir sayısal model kurmadan elde edilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] G.Başaran, E.Gürses Numerical Study of High Velocity Impact Response of Vehicle Armor Combination Using LS DYNA®: 11th European LS-DYNA Conference 2017, Salzburg, Austria
- [2] S. Dey , T. Børvik , X. Teng , T. Wierzbicki, OS. Hopperstad On the ballistic resistance of double-layered steel plates: an experimental and numerical investigation. Int J Solids Struct 2007;44:6701e23B.
- [3] E.A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards, Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile: International Journal of Impact Engineering 38 (2011) 1022-1032)
- [4] LS-DYNA Keyword User's Manual, May 2014, Version R7.1, Livermore software Technology Corporation(LSTC)