

Namlu İçi Balistik Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Onur ÖZGÜDER¹, Mahmut ÖZBAY¹, Hamit ADİN*²

¹ Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Ankara

² Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Batman

Makale Gönderme Tarihi: 08.11.2016

Makale Kabul Tarihi: 03.02.2017

Öz

Günümüz savunma sanayi ürünlerinde dayanıklılığın yanı sıra hafiflik de son derece önem taşımaktadır. Bu daha hafif bir malzeme seçimiyle ilgili olduğu kadar optimum boyutlarla da ilgilidir. Optimum boyutları elde edebilmek için silah tasarımı ve sonrasında sistemin analizi vazgeçilmez aşamadır. Bu çalışmada uzunluğu ve iç çap değeri bilinen M101 top namlusu 1.25 emniyet katsayısı ile 270 kilogramdan 115.95 kilografa hafifletilmiştir. Hafifleştirme sırasında analitik yöntemlerle çözümlenmesi oldukça zor olan namlu cidar kalınlığının patlama sonucu oluşan basınç değerleriyle eksen boyunca hesaplanması ve optimizasyonu hedeflenmiştir. Namlu ait olduğu sistemden ayırlamayacağı için silah sistemi alt sistemleriyle anlatılmıştır. Ayrıca iç balistik temel denklemlerine değinilmiş, optimizasyon kavramı açıklanmış, analiz adımlarında izlenen metod ve kabuller verilmiştir. Seçilen mühimmata ait basınç değerleri Prodas programıyla elde edilmiştir. Namlu tasarımı 3 boyutlu tasarım programı olan Catia'da yapılmış ve sonlu elemanlar paket programı AnsysWorkbench'e aktarılmıştır. Model burada çözümlenerek gerilme dağılımında kritik noktalar belirlenmiştir. Bu yüksek gerilme değerlerine göre namlu cidar kalınlığı, emniyet faktörü ve otofretaj etkisi hesaba katılarak optimize edilmiştir. Çözüm yapılırken elde edilen basınçlar değerlendirilmiş, modele bu basınç değerlerinin doğru verilebilmesi için gerçek patlama olayını temsil edebilecek bir sistem oluşturulmuştur. Balistik değerler Vallier-Heydenreich yöntemiyle, gerilme değerleri ise Lamé denklemiyle tekrar analiz edilmiş, sonuçlar karşılaştırılmış ve oluşan farkların sebepleri tartışılmıştır. Bu çalışmayla, namlu malzemesi, kalibresi, uzunluğu ile mühimmata ait parametreleri belli olan sistemlerin namlu cidarı optimizasyonuna yönelik akademik çalışmalara yol gösterici bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Eksplisit, Namlu, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ansys.

Giriş

Savunma sanayimizin uzun yıllar çağdaş ülkeler düzeyine ulaşamayışı nedeniyle dışa bağımlı kalmıştır. 2. Dünya Savaşı'ndan sonra Marshall projesi olarak bilinen; eskimiş, hizmet dışı kalmış teknolojilerin NATO ülkelerine hibe projesi bizim gibi ülkelerin kalkınmasına büyük zararlar vermiştir. Ulusal sanayinin önemi 1964 Kıbrıs bunalımı ve 1974 Kıbrıs Barış Harekâtıyla ülkemize ambargo uygulandıktan sonra anlaşılmaya başlanmıştır. Teknoloji transferi veya tersine mühendisliğin aslında Marshall projesinin devamı niteliğinde olduğu açıktır. Yurt dışından satın alınan her silah ülke ekonomisinde büyük döviz kaybına neden olarak dışa bağımlılığı arttırmaktadır. Bunu aşabilmek için silah teknolojisi konusunda üniversitelere, teknoloji enstitülerine ve ar-ge kuruluşlarına büyük görev düşmektedir. Ayrıca son yıllarda yerli ve özgün ürünler ortaya çıkarmak için milli projeler devreye sokulmuş olup bilgi paketlerinin ülkemize ait olması için çalışmalar başlatılmıştır.

Balistik konusunda yabancı ülkelerde yapılmış çalışmalar bulunmasına rağmen, ülkemizde bunların sayısı sınırlıdır. Lisanslı tasarım ve üretim yapılmadığından, silah ve mühimmat üretimi yapan kamu ve özel kuruluşlar patent altında çalışmaktadırlar. Ayrıca yüksek hızda deneysel çalışmanın ölçüm zorlukları, yeni çalışmalar için veri altyapısının eksikliği ve konunun askeri gizlilik içermesi en önemli nedenlerdir (Alim, 2009; Özgüder, 2011).

Amerikan askeri araştırma laboratuvarlarında zamana bağlı namlu içi basınç çalışmalarında sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Chen (2010), namlu içi basınç değerlerini balistik kodlardan almış, namlu içindeki basınç-zaman eğrilerini elde etmiş ve eğrileri namlunun iç yüzeyi ile eşleştirip istenen zaman aralıklarında çözüm yapmıştır. Michael ve Chen (2010), belirlenen basınç altında mermi atım yolunun tasarımını çalışmışlardır. Namlunun dinamik analizi için Ansys programını kullanarak namlu

içi hareket esnasında malzemede deformasyon olmadığını göstermişlerdir.

Underwood vd (2006), sonlu elemanlar metoduyla zamana bağlı yanma ve konveksiyon katsayısını balistik kodlardan alarak termal ve kayma gerilmelerini dökme malzemeli top namlusunda erozyon ve çatlak gelişimi açısından değerlendirmişlerdir. Bundy ve Conroy (1996), bilgisayar simülasyonu ile top namlusunun iç sıcaklığını belirleyerek gerçek atışlardaki verilerle karşılaştırmışlardır. Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırmalarında hata veren kısımları mühimmatın doğal yapısına bağlamışlardır. South ve Carter (1996), 12 cm M256 top namlusunu istenen an ve mesafede iç ve dış yüzeylerin sıcaklıklarını zamanın bir fonksiyonu olarak modellemişlerdir. Simkins (1994), top namlusunun yüzeyinde balistik olayından sonra mermiyi saran dinamik basınç dalgalarının etkilerini doğrulamak ve balistik yaklaşımında en düşük hata oranıyla kalın cidarlı silindirlere sistemin dinamiğini incelemiştir. Shephard (1994), balistik esnasında gazın dinamiğini, patlama düzensizliğini, basınç dalgalanmasını incelemiş ve patlama sonrasındaki basınç gerilmelerinin termal gerilmelerden daha fazla olmasını zamana göre ısı transferinin basınç etkisinden daha yavaş olmasına bağlamıştır.

Bu çalışmada M101 top namlusunda 2 iterasyon yapılarak namlu cidar kalınlığının patlama sonucu oluşan basınç değerleriyle, eksen boyunca hesaplanması ve optimizasyonu hedeflenmiştir. Mühimmatın basınç değerleri Prodas, namlunun 3 boyutlu modeli Catia'da yapılmış ve Ansys'e aktarılmıştır. Gerilmelerin yığılma yerleri belirlenmiş ve buna göre namlu cidar kalınlığı hesaplanmıştır. Modele basınç değerlerinin doğru verilebilmesi için algoritmalar çalışılmış ve sonuçta gerçek patlama olayını temsil edebilecek bir sistem oluşturulmuştur.

Balistik bilimi ve tarihi gelişimi

Balistik sözcüğü Yunanca ballein (fırlatmak) Fransızca Balistique sözcüğünden gelmektedir. Merminin silahın içindeki ve dışındaki hareketini ve hedef üzerindeki etkisini inceleyen bir bilim dalıdır. Balistik bilimi barut kullanımı ile başlamıştır. Çinlilerin 10. yüzyıldan önce güherçile esaslı barut kullandıkları, 12. yüzyılda Müslüman Endülslerin kolayca tutuşabilen tozlarla uğraştıkları, Hindistan'da barutun 13. yüzyılda kullanılmış olmasına rağmen barutun ilk olarak kimler tarafından bulunduğu netlik kazanamamıştır (Çelikel, 2008). 1742'de Benjamin Robins bulduğu balistik sarkaç ile silahların namlu ağzı çıkış hızlarını tespit etmiştir. 1792'de Amerikalı Count Rumfort ilk defa deneysel olarak barut gazının basıncını ölçmüştür. Rumfort 18. yüzyıl sonunda basınç/atış mesafesi değişimini, mühimmat uçuş yörüngesi ve namlu ağzı çıkış hızını hesaplamıştır. Fransız Piobert 1839'da kara barut için kendisine ait yanma kanununu açıklamıştır. Piobert namlu içindeki gaz hareketlerinin yaklaşık çözümünü vererek silah sistemlerindeki etki-tepki kuvvetleri üzerinde de çalışmıştır. 1857'de Rodman, gaz basıncının etkisi ile ezilen kurşunun ezilme miktarından yararlanarak maksimum gaz basınç kuvvetini hesaplamıştır. Ayrıca kapalı kap içindeki basınç-yoğunluk ilişkisini açıklamıştır. 1860'da Andrew Noble tarafından geliştirilen masterlar ile daha doğru basınç ölçümleri yapılmıştır. 1864'te Resal tarafından balistiğin termodinamik modelini oluşturan barutun yanma enerji eşitliği bulunmuştur (Özer, 2008). Balistiğin temelleri 1800'lerde atılmış, 20. yüzyıl başlarında ise bir bilim dalı olarak ortaya çıkmıştır. 1835'te Henry Goddard, bir olayın mermi çekirdeği ile kendisinin döktüğü ve aynı çentiği taşıyan mermi çekirdeklerinin benzerliğini karşılaştırarak katilin yakalanmasını sağlamıştır. Ayrıca adli balistik bilimi Goddard tarafından kullanılmaya başlanmıştır. 1863'teki Amerikan iç savaşında General Jackson'un yaralanıp ölmesiyle mermi çekirdeğinin şekli ve çapı tanımlanmıştır. Bu çekirdeğin incelenmesinde 67 kalibre (0.675 inç

çaplı) ve yuvarlak şekilli olduğu görülmüştür. Bu tip mermi çekirdeklerinin eski tip piyade tüfeklerinde olduğu ve generalin kendi askerlerinden biri tarafından kazara vurulduğu anlaşılmıştır. 1900'lerin başlarında mermi çekirdekleri ve mermi kovanlarının atıldığı silah ile ilişkilendirilmesi seviyesine ulaşılmıştır. 1923'te Balthazard, deneme atışlarından elde edilen mermi çekirdekleri üzerindeki set izlerini fotoğraflayarak mermi çekirdeklerinin hangi silahtan ve hangi kovandan atıldığını belirleyen bir yöntem geliştirmiştir. 1925'te New York'ta, mermi kovana ayırımında mukayese mikroskobu kullanılmaya başlanmış ve günümüze kadar süren bir yöntemdir. Daha sonra namlunun içindeki setlerin kıvrımını ölçen Helixometer geliştirilmiştir (Çelikel, 2008). II. Dünya savaşından sonra bilgisayar programları ile karmaşık matematiksel problemler daha doğru çözülmüştür (Özer, 2008).

Balistik

Balistik; iç (internal) balistik, dış (external) balistik ve terminal (hedef) balistik olmak üzere üçe ayrılır. Silahlarda ateşlemenin başlamasından merminin silah namlusunu terk edene kadar meydana gelen olayların tümüne iç balistik denir. Temel görevi; mermiye istenen ilk hızı kazandırmaktır (Akçay, 2010). Dış balistik; mermi çekirdeğinin namluyu terk ettikten hedefe çarpıncaya kadar geçen zaman içinde meydana gelen yörünge üzerindeki hareketi ile ilgilenir (Çelikel, 2008). Terminal balistik; mermilerin hedef üzerinde meydana getirdiği etkileri ile ilgilenir. Bu etkiler; zırlı hedeflerin delinmesi, parça tesiri, yanma/patlama etkisi, hedefin aydınlatılması, sis, zehirli gaz ve radyoaktif etkilerdir (Akçay, 2010).

İç balistik analizi

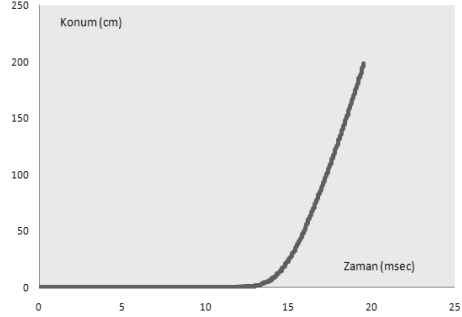
İç balistik analizlerinde namlunun 3 boyutlu tasarımı Catia programı ile yapılmıştır. Bu program; mekanik tasarım, yüzey tasarımı, analiz ve benzetim, imalat, takım, donanım ve sistem mühendisliği çözümleri yapabilmektedir. İç balistik hesaplamalarında Prodas programı ile hedef değere iterasyonlarla yaklaşım ve

çıkıtlar sonlu elemanlar programına girdi oluşturmuştur. Çözümde M101 topunun namlu uzunluğu 1980 mm, namlu iç çapı ise 10.5cm olan 14.984 kg ağırlığındaki klasik M1 Mühimmatı kullanılmıştır. Mühimmatın çıkış hızı 472.400 m/s, namlu içi maksimum basınç değeri 222.711 MPa alınmıştır (Özgüder, 2011). M1 mühimmatında, Tablo 1’de gösterildiği gibi 1.5695 g/cm² yoğunluğu ve 0.314 kg ağırlığı olan barut kullanılmıştır. Barutun diğer özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. M1 mühimmatının barut özellikleri

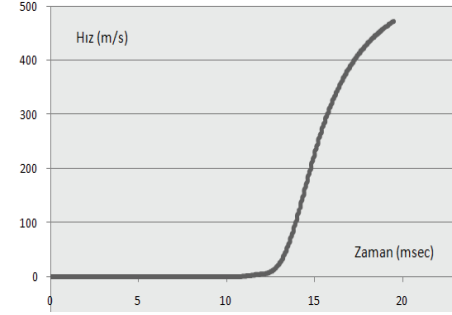
Parametre adı	M1 Barutu
Yoğunluk (g/cm ²)	1.5695
Impetus (MJ/kg)	0.9117
Tutuşma sıcaklığı (°C)	2143.85
Barut ağırlığı (kg)	0.314
Yanma hızı komponenti	0.85
Son yanma hızı sabiti (cm/sec/bar)	0.011099
Barut örgü kalınlığı (cm)	0.03998
Tanecek çapı kalınlığı (cm)	0.10536
Tanecek delik çapı (cm)	0.02540
Tanecek uzunluğu (cm)	0.889

Analizde elde edilen sonuçlar grafikler halinde aşağıda verilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü gibi mühimmat, 13-14 ms (milisaniye)’lik zaman diliminde sevk çemberi üzerinde yiv-set açmaya harcanan kuvveti yenmeye çalışmaktadır. Bu kuvveti yendikten sonra namlunun geri kalan kısmını sistemi ateşlemeden 19.5ms sonra terk etmiştir. Bu sürenin yaklaşık 6-7 ms’sinde hareketlidir. Mühimmatın namlu içi hız-zaman grafiği Şekil 2’de gösterilmiştir. Burada mühimmatın 12-13 ms’lik dilimde hareketsiz olduğu barut yanmaya başladıktan ve üzerine etkiyen kuvvetleri yendikten sonra namlu çıkışında 472.36 m/s’ye kadar hızlandığı görülmüştür. Mühimmatın sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3’te verilmiştir.



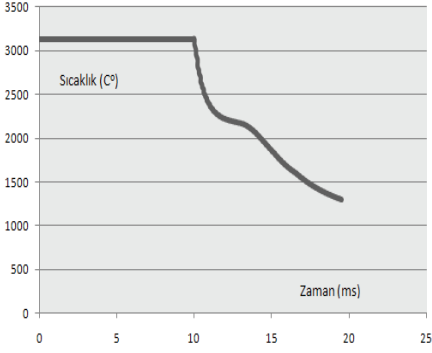
Şekil 1. Namlu içi konum - zaman grafiği

Barutun yanmasıyla beraber mühimmatta başlangıç sıcaklığı 3126.9⁰C, son sıcaklık ise 1302.7 ⁰C olarak elde edilmiştir. Yanan barut miktarı azaldığından mühimmatın sıcaklığı azalarak namluyu terk etmiştir. Burada ısının az bir kısmı da namluya geçmiştir.

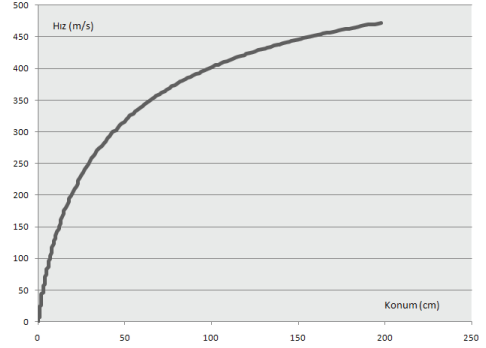


Şekil 2. Namlu içi hız - zaman grafiği

Merminin hareketi, ardında oluşan basınçla olur. Şekil 4’te görüldüğü gibi mermi namlu içinde ilerlerken basınç bir noktaya kadar artmakta, daha sonra ise yavaş bir biçimde düşmektedir. Şekil 4’te bulunan x=0 konumundaki basınç artışı ise merminin sevk çemberine yiv set açılmaya zorlanmasından kaynaklanır. Bu sürede hacim sabit kalmaktadır. Basınç etkisi mermiye bir ön direnç vererek mühimmatın hızlanmasına katkı yapmıştır. İçeride oluşan en yüksek basınç 222.71MPa, merminin sistemden çıkış basıncı ise yaklaşık 43 MPa olmuştur (Şekil 4).

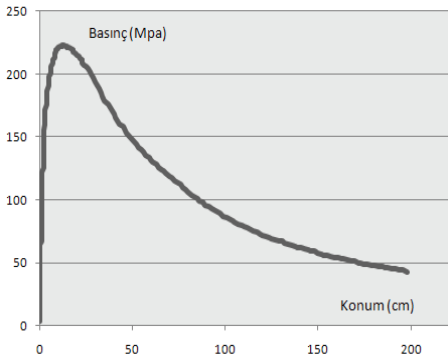


Şekil 3. Namlu içi sıcaklık – zaman grafiği



Şekil 5. Namlu içi hız – konum grafiği

Şekil 5'teki hız-konum grafiğinde görüldüğü gibi, mühimmat namlu içinde yol aldığı hızı artmakta ve namluyu 472.36 m/s'lik hızla terk etmektedir. Şekil 6'da namlu içi konuma bağlı sıcaklık grafiği verilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi $x=0$ noktasında mermi harekete başlamadan önce barutun yanmasıyla sıcaklık 3126.9°C'ye ulaşmıştır. Alınan yola bağlı olarak sıcaklık 1302.7°C'ye kadar düşmüştür.

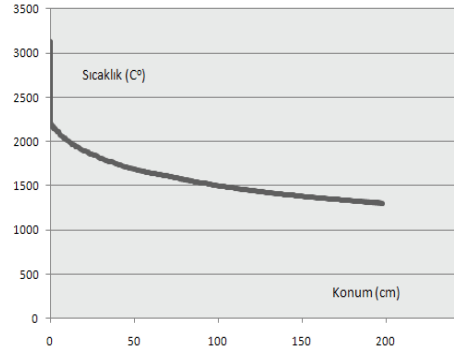


Şekil 4. Namlu içi basınç – konum grafiği

Namlu içi basınç-zaman grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de mühimmatın ilk 10 milisaniyelik bölümde sevk çemberi ve yiv set kuvvetini yenmeye çalıştığı görülmüştür. 10 milisaniyeden sonra çok kısa bir sürede maksimum basınca ulaşmıştır.

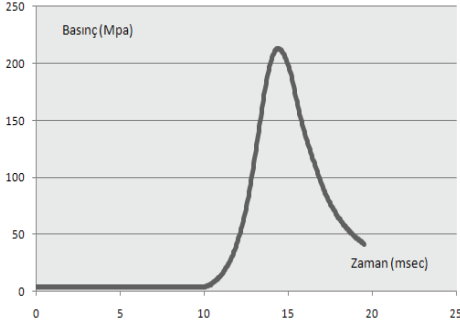
Vallier-Heydenreich balistik çözümü

Heydenreich; bir silahta mermi kütlesi, namlu çapı, namlu boyu, ilk hız, barut kütlesi ve piezometrik verimi bilinen bir sistemde, gaz basıncının maksimum olduğu andaki mermi hızını, zamanını ve basıncını hesaplamak üzere, piezometrik verime bağlı olarak bazı formüller geliştirmiştir (Öztürk, 1984).



Şekil 6. Namlu içi sıcaklık – konum grafiği

Özgüder (2011) çalışmasında namlu ve mühimmat parametrelerine bağlı olarak Prodas programıyla elde edilen sonuçlar ile Heydenreich yöntemini kullanarak balistik çözümü yapılmış ve sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Sonuçlar arasında çok büyük farklar olmadığı, hatta Tablo 2'nin bazı kısımlarında çok yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür.



Şekil 7. Namlu içi basınç – zaman grafiği

Tablo 2. Prodas ve Heydenreich sonuç karşılaştırma tablosu

	Prodas	Heydenreich
Gaz basıncı maksimum değerine ulaşmaya kadar merminin namlunun içinde aldığı yol (cm)	13	17
Gaz basıncı maksimum değerine ulaşmaya kadar merminin namlu içinde hareketli olduğu süre (ms)	2.3	3.5
Gaz basıncı maksimum değerine ulaşmaya kadar merminin namlu içindeki hızı (m/s)	166	188
Namlu ağzındaki gaz basıncı değeri (MPa)	43	44
Namlu içinde merminin geçirdiği toplam hareketli süre (ms)	8.4	8.3

Sonlu elemanlar analizi

Çalışmamızın sonlu elemanlar analizinde Ansys v.12.01 (2011) paket programı kullanılmıştır. Bu program, 1970'li yıllarda Amerika'daki Swanson Analysis System şirketi tarafından geliştirilmiştir. Ansys v.b. katı modelleme programları; firmaların yeni ürünlere geçişlerinde maliyet ve zaman kaybını engellemektedir (Sipahi, 2004).

Otofretajetkisi

Otofretajlı namlu; ön gerilmeli olup yüksek basınca karşı dayanımı artırılmıştır. Otofretaj işlemi, namlu kesitinin iç bölgelerinde plastik deformasyon oluşturulan bir ön gerilme uygulamasıdır. Bu işlem sonunda kesitteki

gerilme değerleri düşer (Akçay, 2010). Otofretajlı namlu analizlerinde gerilmelerin %20-%30 arasında düşük bir değerde çıkması beklenir (Ali vd, 2010).

Zaman integrasyon yöntemleri

Eksplisit (açık zaman integrasyonu) ve implisit (kapalı zaman integrasyonu) olmak üzere iki tip zaman integrasyon yöntemi vardır. Eksplisit yöntem; merkezi farklar metoduna dayanır. Eksplisit yöntem birçok sonlu elemanlar çözüm algoritmasından çok daha hızlı çözüme ulaştığından dolayınon-lineer problemlerde tercih edilir (Ayyıldız, 2006). Çalışmamızda patlama etkisi kısa bir süre devam ettiği için eksplisit yöntem kullanılmıştır.

Hasar ve malzeme özellikleri

Hasar, bir yapı elemanının aşırı zorlanması sonucu işlev göremez hale gelmesidir. Hasar analizi; problemi tanımlama, hipotez oluşturma, veri toplama/birleştirme, hipotezi test etme ve sonuçları belirlemeye dayanır (Varol, 2008). Von Mises ve Tresca olmak üzere iki genel hasar kriteri mevcuttur (Ay, 2000). Çalışmamızın teorik olması sebebiyle von Miseshasar kriteri kullanılmıştır. Ayrıca elemanların elastik olması ve gerilmelerin oranı sınırının altında kalması için emniyet katsayısı 1.25 alınmıştır.

Çalışmamızda namlu malzemesi olarak kimyasal bileşenleri Tablo 3'te verilmiş, yoğunluğu 7.850 g/cm³, kopma mukavemeti 1320 MPa, akma mukavemeti 1150 MPa, Elastisite Modülü 200 GPa ve Poisson oranı 0.30 olan düşük karbonlu AISI 4340 (35NiCrMoV12-5) çeliği kullanılmıştır.

Tablo 3. 4340 çeliğinin kimyasal bileşenleri

% C	% Si	%Mn	% P	% S	% Cr	%Mo	% Ni	% V
0.30-0.40	0.15-0.35	0.40-0.70	0.015	0.015	1.00-1.70	0.35-0.60	2.50-3.50	0.08-0.20

Basıncın etki ettiği yer ve süresi

Prodas programından alınan veriler doğrultusunda sistemin namlu ucuna doğru azalan basınca maruz kaldığı görülmüştür. Bu

nedenle basıncın fazla olduğu bölgelerde namlu kalın, az olduğu bölgeler de ise ince cidarlı tasarlanmıştır. Basınç değişimi dikkate alınarak cidar çözümüde 20 parçaya bölünmüştür. Bölünen her bir parçanın ne kadar süreyle hangi basınca maruz kalacağı Prodas çıktıları ve merminin konumuna göre Tablo 2'deki değerler alınarak sonlu elemanlar programına aktarılmıştır. Sonlu eleman modellemesinde şu kabuller yapılmıştır;

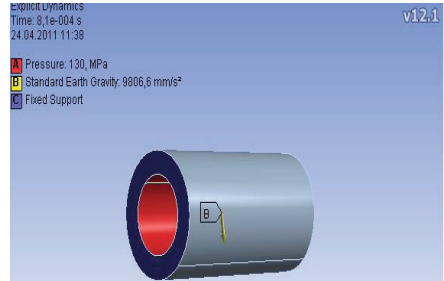
- Silahın seri atış yapmayacağı, yani namlunun modal etkileri göz ardı edilmiştir.
- Prodas çıktılarında mühimmatın sıcaklığı 2000-3100°C arasındadır. Namludaki hareket süresi kısa olup sıcaklık değerleri namlu ucuna doğru düşmektedir. Namlu içine konan mühimmatın kendini ateşleyebilmesi nedeniyle iç sıcaklığın 150-160°C'yi geçmemesi gerekir. Araştırmalar; seri atış yapan toplarda yanma odasına sürülen mühimmatın kendinden önce yapılan atışın sıcaklığından etkilenmediği, bu nedenle mühimmattan namluya geçen ısının çok düşük, sıcaklığın ise 60-80°C arasında olduğu varsayılmıştır.

Namlu çelikleri 3150C'nin üzerinde mukavemet kaybederler. Kalın namluda termal gerilme oluşmadığından dolayı akma noktası düşük, ısı etkisiyle tahrip olmayan ve yeterli mukavemete sahip namlu malzemesi seçilmelidir (Akçay, 2010). Bu nedenle namlu malzemesinin oda sıcaklığındaki mukavemet değerleri alınmıştır.

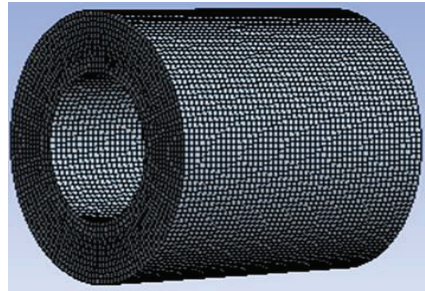
- Mermi namluyu terk ettikten sonra içeride kalan gazın oluşturduğu düşük basınç mukavemet hesaplarında dikkate alınmamıştır.
- Namlunun kama tarafına yakın kısmı referans noktası olarak alınmıştır.
- Patlamanın etkisinin hedefte lineer basınç etkisi yarattığı ve malzemede deformasyona neden olmadığı varsayılmıştır.
- Namlunun akma mukavemeti ele alınırken otofretaj etkisi göz ardı edilmiştir. Ancak otofretaj etkisinin mukavemeti %20-%30 civarında artırdığı ve emniyet katsayısı 1.25 alındığından dolayı bu iki etmen birbirini nötrleyeceğinden, sadece namlunun akma mukavemeti ana kriter olmuştur.

Sınır şartları ve çözüm ağı

Namluya standart yerçekimi ivmesi (980.665cm/s²) uygulanmıştır. Namlu kama tarafında sabit olacağı için Şekil 8'de görüldüğü gibi ankastre giriş olarak kabul edilmiştir. 3 boyutlu modellemelerde 6 yüzlü her bir düğüm noktasında üç serbestlik dereceli ve 20 düğüm noktasına sahip Solid 186 eleman kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 8. Namlu parçasına etki eden faktörler A; Basınç B; Yerçekimi ivmesi C; Sabitlenmiş yüzey



Şekil 9. Namlu parçasının mesh hali

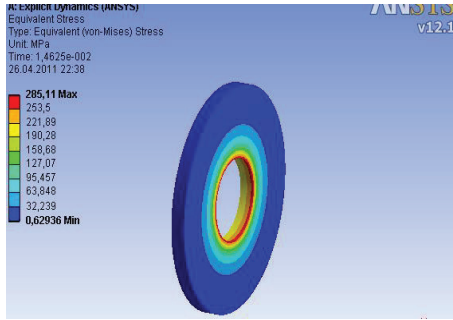
Optimizasyon

Matematikte bir fonksiyonun maksimum veya minimum değerlerinin bulunması mühendislikte ise; verilen koşullar altında en iyi sonucu elde etme işlemidir (Sipahi, 2004).

İlk yaklaşım

Namlunun her bir parçası üzerine belirli sürelerde basınç uygulanmış ve Şekil 10'da görülen vonMises gerilme değerleri hesaplanmıştır. İlk yaklaşımdaki analizde;

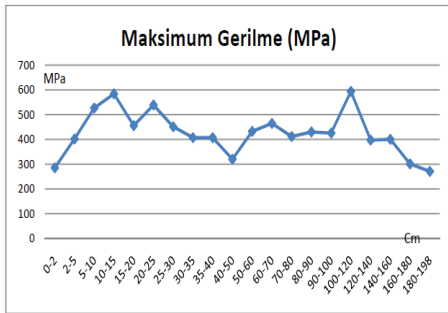
namlunun ağırlığı 459.778 kg, alanı 20700cm², hacmi 59000cm³ ve yoğunluğu 7850 kg/m³’de edilmiştir. Ayrıca Şekil 11’de dengerilme değerlerinin, 1150 MPa olan akma gerilmesi değerini hiçbir bölgede aşmadığı görülmüştür. Namlu en kalın yerinde 14.45 cm, en ince yerinde ise 3.2434cm’dir (Şekil 12). Bu sonuçlara göre namluyu hafifletme için iterasyonlar yapılmıştır.



Şekil 10. vonMises gerilme değerleri

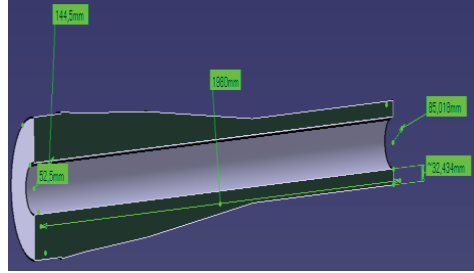
1. iterasyon

Bu iterasyonda namlunun cidarı inceltilecek analiz yapılmıştır. 1. iterasyonda namlunun ağırlığı 459.77 kg’dan 212.532 kg’a, alanın 17240cm²’ye, hacmin 27000cm³’e düşmüştür. Şekil 13’te görüldüğü gibi gerilme değerlerinin ilk yaklaşıma göre biraz arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yoğunluk 7850 kg/m³ olarak sabit alınmıştır. 1150 MPa olan akma gerilmesinin yine hiç bir bölgede aşılmadığı görülmüştür.



Şekil 11. İlk yaklaşım için maksimum gerilme grafiği

Şekil 14’te görüldüğü gibi bu iterasyonda namlunun en kalın yeri 109.5 mm, en ince yeri ise 12.929 mm olmuştur.



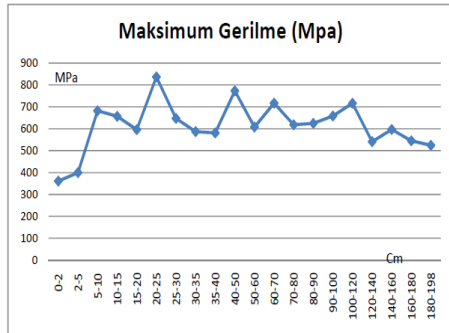
Şekil 12. Namlunun kesit resmi ve bazı ölçüleri

2. iterasyon

Burada 1. iterasyon sonunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, cidarı inceltilen namlu tekrar inceltilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Başlangıçtan ikinci iterasyonun sonuna kadar namlu ağırlıkları Tablo 4’te gösterilmiştir. Burada 2. iterasyon için yapılan analizde namlu ağırlığı 212.532 kg’dan 115.949 kg’a düşmüştür. Şekil 15’te gösterildiği gibi gerilme değerleri ise 1. iterasyona göre artmıştır.

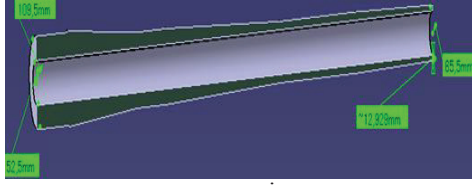
Tablo 4. Namlu ağırlıkları

	İlk namlu	1. iterasyon	2. iterasyon
Ağırlık(kg)	459.778	212.532	115.949



Şekil 13. 1. iterasyon sonundaki maksimum gerilme grafiği

Şekil 15 ve 16'da görüldüğü gibi hacim sabit olmak üzere alanın 15580cm^2 'ye, hacmin 15000cm^3 'e düştüğü tespit edilmiştir. Akma gerilmesi sınırına bazı bölgelerde yaklaşmıştır. Bu yüzden daha fazla inceltmeye gerek duyulmamıştır. Gerilme değerlerinin nispeten daha düşük olduğu bölgelerde ise kısıtlamalardan dolayı daha fazla hafifleştirme yapılmamış ve model nihai halini almıştır.



Şekil 14. Namlunun 1. İterasyon sonundaki kesit resmi ve bazı ölçüleri

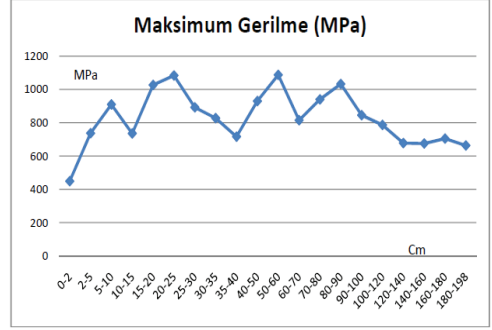
Namlu cidar kalınlığının uygunluk tespiti yapılmış ve maksimum basınç noktası olan 13cm 'de Lamé denkleminden 610MPa 'lık gerilme değeri elde edilmiştir. Ayrıca, değişen cidar kalınlıklarına göre gerilme değerleri Özgüder (2011) tarafından hesaplanmış ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Ansys ve Lamé çözümü karşılaştırma tablosu (Özgüder, 2011)

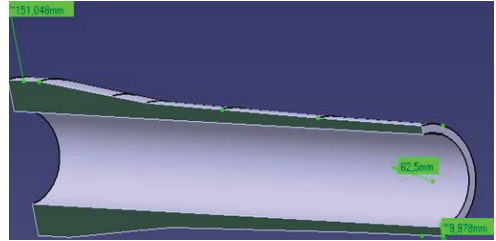
Mesafe (cm)	13	20	40	75	90	130	198
İç Çap (cm)	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
Dış Çap (cm)	17.6608	17.313	15.9918	13.988	13.7674	13.7674	12.5
Oluşan Basınç (MPa)	223	215	168	113	96	67	43
Ansys Gerilme Değeri (MPa)	700	1020	700	860	900	650	650
Lamé Gerilme Değeri (MPa)	610	602	527	472	419	293	273

Sonuçlar ve öneriler

Çalışmamızda namlunun dinamik analiz nümerik olarak yapılmış, namlu cidarı iterasyonlarla optimize edilerek ileride yapılması düşünülen deneysel çalışmalara yol göstermek amacıyla çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.



Şekil 15. 2. iterasyon sonundaki maksimum gerilme grafiği



Şekil 16. Namlunun 2. iterasyon sonundaki kesit resmi ve bazı ölçüleri

Namlu ve mühimmat parametrelerine bağlı olarak elde edilen Prodas ve Heydenreich sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Namlu cidarı iki iterasyon yapılarak optimize edilmiş olup optimizasyonda gerilme

değerlerinin akma sınırının çok altında olduğu görülmüştür. Namlu cidarını incelemek için yapılan iki iterasyon sonunda ağırlık 115.949kg'a düşmüştür. Gerilme değerleri incelendiğinde namlu cidarının bazı bölümlerinin biraz daha inceltilebileceği, ancak aşırı inceltme özellikle ilk 15 cm'lik kısmında yapılacak aşırı hafifletme ağırlık merkezinin yerini olumsuz yönde değiştireceği gibi ana sistemin ağırlığını da azaltacak, sistemin dengesi bozulabilecek ve atışlarda denge problemleri görülebilecektir. Ağırlık merkezinin ağız baskısı tarafına yakın olması sehim etkisini arttıracak ve silahın performansını etkileyecek ancak ağırlık merkezinin kamaya yakın olması dağılıma olumlu etki yapacaktır. Bu yüzden namlunun 0-15 cm'lik bölgesi biraz daha kalın bırakılmıştır. Namlu üretim teknikleri ve ağız baskısı montajı değerlendirildiğinde minimum et kalınlığının 9-10 mm olması gerekmektedir.

Maksimum basınçta gerilmelerin malzemenin akma gerilmesinin altında kaldığı ve elastik bölgeyi aşmadığı görülmüştür. Sonlu elemanlar analizi ve Lamé denklemiyle elde edilen gerilmeler arasındaki farkın nedeni sonlu elemanlar analizinde basıncın zamanla değişkenliği ve Lamé denkleminde anlık basıncın zamandan bağımsız olmasıdır. Nümerik analizin Tablo 2 ve Tablo 4'teki sonuçlarına göre; implisit analizdeki gerilme değerlerinin elastik bölgede kaldığı ve eksplisit analizlere göre daha az çıktığı, yani güvenlik katsayısının daha yüksek olduğu görülmüştür. Oluşan fark ise implisit modelde zamanın göz ardı edilmesinden kaynaklanmıştır.

Çalışmamızda elde edilen modelin, kullanılan yeni silahlarla karşılaştırılması, konunun askeri gizliliği ve açık kaynak azlığı nedeniyle detaylı olarak yapılamamıştır. 1940'lı yılların silahı olan ve birçok NATO ülkesinin envanterinde bulunan M1 mühimmatını atabilen 10.5cm çaplı M101 topunun namlu ağırlığı 250-280 kg, namlu uzunluğu ise yaklaşık 200 cm'dir. Ancak aradan geçen uzun yıllar neticesinde; malzeme bilimindeki gelişmeler, otofretaj işleminin

kullanılması, namlu işleme yöntemlerinin gelişmesi, analiz programları v.b. faktörler düşünüldüğünde namlunun gerçek modele yaklaştığını söyleyebiliriz. Fransız LG1 MK2 silahının namlu boyu 315 cm, ağırlığı 270 kg, namlu içi maksimum basınç değerinin 3200-4200 bar seviyelerinde olduğu görülmüştür. Optimizasyonu yapılan namlu ile aradaki basınç ve ağırlık farkının namlu içi basınç değerlerinin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Silah tasarım çalışmalarında namlunun silahın dengesini anlık olarak değiştirebileceğinden sistemin düz, yükselişli veya yanal atış ve taşıma gibi durumlarında statik ve dinamik analizler yapılmalıdır. Namlu sistemi ana sistemden ayıramayacağı için, namlunun diğer sistemlerle olan etkileşimi dikkate alınmalıdır. Ayrıca sistemde geri tepen kütle ne kadar fazla ise alt sistemlere gelecek basınç etkisi de o kadar az olacağından bazı sistemlerde birinci iterasyondaki gibi bir kalınlık ve ağırlık uygun olabileceği, bazı sistemlerde ise ikinci iterasyonda olduğu gibi fazladan inceltme istenen performansı verecektir. Dakikadaki atım sayısı önemli olan sistemlerde namlunun termal ve modal etkileri de hesaplanmalıdır. Önemli olan namlu tasarımını sistemin bütününe uygun şekilde yaparak sistemden en fazla faydayı alabilmektir.

Kaynaklar

- Akçay, M., (2010). *Balistik*, 90-281, Ankara.
- Ali, A., R., Ghosh, N., Alam, T., (2010). Optimum Design of Pressure Vessel Subjected to Autofrettage Process, *World Academy of Science*, 668-673.
- Alim, Y., (2009). Aynı Marka Farklı Seri Numaralı Tabancalarda Çıkan Mermi Çekirdeğinin Hangi Tabancaya Ait Olduğunun Saptanması İçin Yapılan Balistik Analizler, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ANSYS (2011). Academic Teaching Advanced, v.12.0.1, the general purpose finite element software. Swanson Analysis Systems. Houston. TX.

- Ay, İ., (2000). Gerçek Gerilme–Gerçek Uzama Eğrileri İçin Yaklaşık Denklemler, İmalat Yöntemleri 2, 13-15.
- Ayyıldız, A., (2006). Buzdolabı Düşürme Testinin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Nonlineer Analizi ve Deneysel Sonuçlarıyla Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Bundy, M. L., Conroy, P. J., (1996). Simulated and Experimental In-Wall Temperatures for 120 mm Ammunition, *Defense Science Journal*, 46(4), 223-232.
- Chen, M., (2010). High Fidelity In-Bore Pressure Modeling, *Proceedings*, 11th. International Ls-Dyna user's conference, 20, ABD.
- Çayıröğlü, İ., Dizdar, E.N., (2004). Kapsülsüz ve Barutsuz Mermi Atan Hafif Silah Tasarımı, *Teknoloji*, 7, 339-340.
- Çelikel, A., (2008). Av Tüfeği Namlu Uzunluğunun Saçma Dağılımına Etkisi ve Atış Mesafesinin Belirlenmesinde Önemi, *Tıpta Uzmanlık Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Adli Tıp Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Michael, M., Chen, D., (2006). Structural Design and Analysis of Hit-To-Kill Projectile, *Proceedings*, 9th. International Ls-Dyna user's conference, 2, ABD.
- Özer, G., (2008). Dış Balistik Analizinde İzdüşüm Alanı etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Özgüder, O., (2011). Namlucuları boyutlandırılmasına iç balistik davranışın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Öztürk, A.R., (1984). *İç Balistik*, Genişletilmiş İkinci Baskı, 71-74, Ankara.
- Shepherd, J. E., (2006). Structural Response of Piping to Internal Gas Detonation PVP2006-ICPVT-11, *Proceedings*, 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Kanada.
- Simkins, T. E., (1994). Amplification of Flexural Waves in Gun Tubes, *Journal of Sound and Vibration*, 172(4), 145-154.
- Sipahi, E., (2004). Dip Klepesinin Ansys İle Dizayn Optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- South J. T., Carter, R. H., (2005). Thermal Analysis of an M256 120 mm Cannon, Technical Report, Army Research Laboratory ARL-TR-3594, Aberdeen.
- Underwood, J. H., Troiano, E., Mulligan, C. P., Vigilante, G. N., (2006). Effect of CR or TA Coating Thickness on Near-Bore Temperatures and Coating Interface Stress for Cannon Firing Conditions, *Proceedings*, 2006 Pressure Vessels & Piping Conference and the Eleventh International Conference on Pressure Vessel Technology, Kanada, 841-846.
- Varol, H., (2008). Av ve Spor Tüfeklerin İçin Kritik Parçaların Hasar Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Analysis of internal ballistic behavior inside barrel with using Finite Elements Method

Extended abstract

The durability, as well as lightness, has an important place in today's defense industry products. This is mostly related with the choosing of light material and optimum dimensions. In this sense, to acquire dimensions safely, gun design and the analysis of the system are both part of the indispensable process steps. In this study M101's gun barrel is lightened from 270 kgs to 115.95 kgs with 1.25 safety factor whose length and interior diameter are certain. During the lightening the aim is to calculate and optimize barrel thickness through the barrel axis with the pressures values after the explosion, which is hard to solve by analytical methods. As the barrel cannot be distinguished from the system it belongs, the weapon system is explained with sub systems. In addition, the fundamental equations of interior ballistics are mentioned, ammunition and gun systems are classified, the term of "optimization" is explained and analyzing steps of the methods and assumptions are followed and given. In this sense, pressure values of selected munition are obtained with the "Prodas" programme. The barrel was designed by "Catia" which is a 3D design programme and the model was transferred to the "Ansys Workbench" finite element software. The model here is solved and critical locations in the distribution of stresses are determined. According to these high stress values, barrel thickness is optimized with safety factor and contribution of Autofrettage Process. During the analysis, the obtained pressure values are evaluated and studied algorithms to input these values in to the model correctly. Finally, a system is created that could represent a real explosion situation. Ballistic values re-analyzed with Vallier-Heydenreich method and stress values are re-analyzed with using Lamé Equations. Then the results are compared with each other and discussed about the reasons of

differences. In this way, an approach is developed to lead academic studies which are about the optimization of barrel thickness in the systems whose barrel caliber, length and ammunition parameters are certain.

Keywords: *Ballistic, Explicit, Barrel, Finite Element Method, Ansys.*