

Tank Namlusunun Operasyonel Modal ve Deplasman Analizi

Mehmet Çelik

Doç. Dr.

Murat Aykan

ASELSAN A.Ş., MST/MTM-
Mekanik Analiz ve Test Birimi,
Yenimahalle 06172, ANKARA

Tankların seyir halindeyken hareketli hedeflere, her türlü arazi şartlarında, yüksek bir ilk atımda vuruş ihtimaline (LAVİ) sahip olması, tank üreticilerinin en önemli hedeflerindedir. Bunun sağlanması için tankların atış kontrol sistemlerinin optimum tasarımı ve hassasiyeti önem taşımaktadır. Bu kapsamda mühimmatı hedefe doğru yönlendiren tank namlusunun iki eksendeki stabilizasyonu tank kulesinde bulunan beşikteki silah çayrosu ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte, kontrol altında tutulan beşiğin, dışından itibaren yaklaşık 4 m daha uzun olan namlu, arazi ve sistemden gelen tahrikler sebebiyle yapısal olarak, doğal frekanslarda kontrolsüz salınım hareketi yapmaktadır. Bu makale, tank gibi ağır bir sistemin deneysel operasyonel modal analizi (OMA) ile doğal frekanslarının bulunmasını, stabilizasyon ve arazi şartları altında namlu ucu deplasmanlarının elde edilmesini ve salınımları azaltıcı önlemleri içermektedir

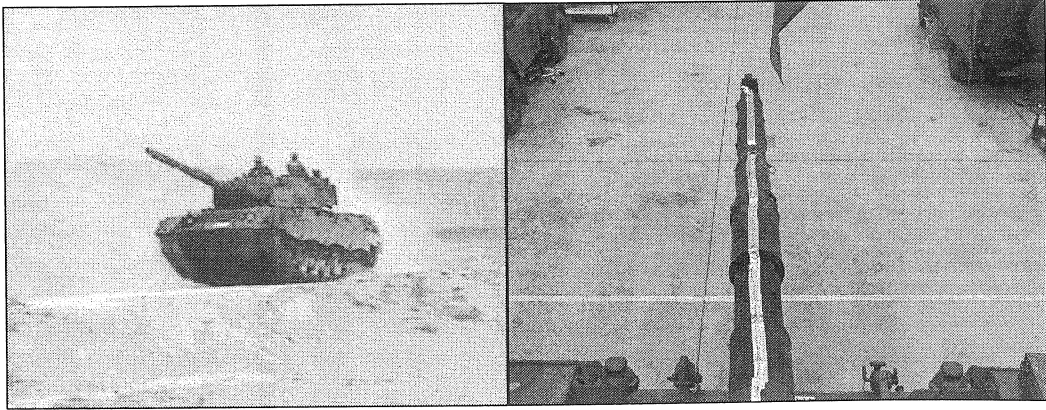
Anahtar Kelimeler: İlk Atımda Vuruş İhtimali, Namlu Salınım, Operasyonel Modal Analiz, Modal Tasarım, Modern Tank

GİRİŞ

Makinalarda veya makinaların bağlı olduğu yapılarda ortaya çıkan titreşimler, makinanın hareketli parçalarının ürettikleri dinamik kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Makinanın farklı parçaları farklı frekanslarda ve genliklerde titreşim hareketi yapmaktadır. Titreşimler yapıların aşınmasına, yorulmasına ve salınımlara neden olmaktadır. Askeri platformlarda titreşim deneyleri, malzemenin taşınma ve çalışma ortamlarında maruz kalacağı titreşim sonucu meydana gelen etkinin ölçülmesi ve davranışının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır [1,2,3] (Şekil 1). Titreşimden meydana gelen problemlerin çözümünde öncelikle titreşim kaynağının belirlenmesi önem taşımaktadır. Titreşim sorunlarını tasarım aşamasında gidermek için;

titreşim kaynağının gücü azaltılmalı, sistemde iyileştirmeler yapılarak frekans bandı kaydırılmalı, rezonansa girmesi muhtemel kısımlar kaynaktan yalıtılmalı veya yapının enerji sarf etme yetenekleri artırılmalıdır. Titreşimi yalıtmanın veya tahrikleri ortadan kaldırmanın mümkün olmadığı bazı durumlarda, modal tasarım kaçınılmaz olmaktadır.

Titreşim kaynağı belirlendikten sonra kaynak ve alıcı arasındaki yapı-yolunun özellikleri genel sistemin yapısal dinamik karakteristiğini göstermektedir. Sistemlerin maruz kaldığı tahrik fonksiyonu her zaman bilinmemesi nedeniyle elde edilen tepkilerin yapısal veya tahrikin kendisinden mi oluştuğunun anlaşılması için ileri analizler yapılması gerekmektedir. Ayrıca analizlerde çakışan frekanslardaki toplam genlik seviyelerinin dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 1. Tank deneysel operasyonel modal analiz testleri.

OPERASYONEL MODAL ANALİZ

Modal analiz, sistemlerin yapısal (doğal frekanslar, modal sönümlenme ve salınım şekilleri) özelliklerini belirlemek ve deneysel-matematiksel modelini oluşturmak için gerçekleştirilen titreşim analizidir. Yapının doğal frekansları ve salınım şekilleri serbest yapının (yapıya hiçbir yük etki etmemesi) dinamik özelliklerini vermektedir. Bunları elde etmek için sistemlerin belirli yükler ile tahrik edilerek sistemin tepki/yük oranının (transfer fonksiyonu, hassasiyeti) bulunması gerekmektedir.

Sistemlerin çalışma ortamlarında, yapıların doğal frekanslarıyla tahrik frekanslarının çakışması söz konusu olunca problemler çıkabilmektedir. Ayrıca ilgilenilen noktanın salınım üzerindeki yeri (düğüm, karın vb.) sonuçlarda etkili olmaktadır. Bu çıktılar değerlendirildikten sonra gerektiği durumlarda sisteme direnç eklenmesi veya çıkartılması ile çözüm elde edilmesi mümkün olmaktadır. Yapıda gerçekleştirilecek tasarım değişikliğiyle yapıyı uyarma sahası dışına çıkartılması gerekmektedir. Bu değişiklik, matematiksel model iterasyonlarıyla veya mühendislik yaklaşımlarının yapılması ile gerçekleştirilmektedir. Modal analiz; analitik, sayısal ve deneysel tekniklerle yapılmaktadır. Sayısal yöntemlerden bulunan modal parametreler ile deneysel yöntemlerden bulunan sonuçlar uyum halinde olmaz ise sayısal model düzeltilmekte ve uyumlu hale getirilmektedir. Sayısal modelin doğrulanması yapıldıktan sonra tasarımda gerçekleştirilecek iyileştirmeler model üzerinde daha kolay gerçekleştirilmektedir.

Bilinen deneysel modal analizlerde, test cihazının serbestlik derecesi kısıtlamalarını en aza indirecek şekilde (serbest-serbest) cihaz veya ölçüm yapılan platform lastiklerle asılmakta veya birim yerden tartıya alınmaktadır. Bazı durumlarda modal analiz çalışması yapabilmek için test birimini etkileyen kuvvetlerden ayırtmak, serbest olarak asmak veya yapıyı uyarmak için yeterli titreşim kuvvetinin verilmesi (tank, gemi, köprü, vb.) mümkün olmamaktadır. Böyle durumlarda işletim koşullarında yapılacak testlerle alınacak tepki bilgilerine bakılarak sistemin operasyonel modal analizi yapılabilmektedir [4]. Modal analiz yöntemi, hem cihazlara hem de sistemlere (platformlara) uygulanması nedeniyle titreşim analizinde önemli bir yaklaşımdır [5,6,7]. Bu analizde, tahrik noktasının/noktalarının, sistemin bütün veya incelenmesi istenen bölgelerinin salınım şekillerini tahrik edebilecek bir yerde ve büyüklükte olması sağlanmaktadır. Ayrıca ölçüm noktaları da bu salınım şekillerini yakalayabilecek sayıda ve yerlerde olması gerekmektedir.

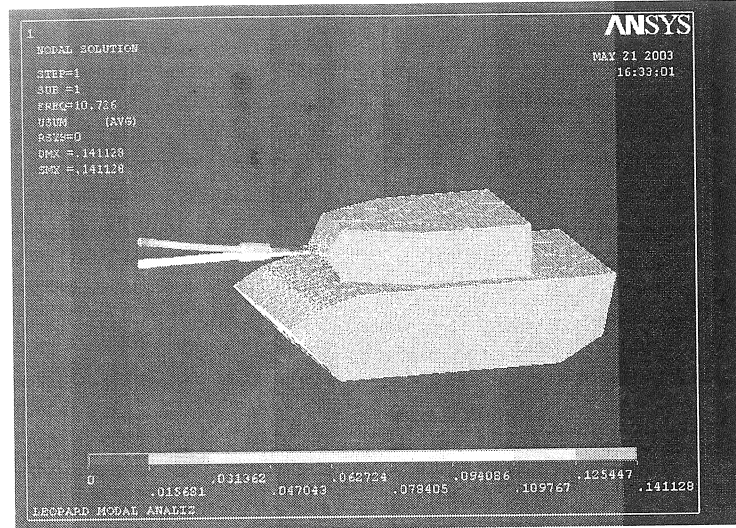
OMA'da frekans cevap fonksiyonlarının yerine ilişkilendirme korelasyon fonksiyonları bulunmaktadır. Bu fonksiyonları elde etmek için bütün salınım şekillerini tahrik edebilecek noktalara ivmeölçerler yerleştirilmekte ve toplanan veriler sistem tepkilerine referans olarak gösterilmektedir. Elde edilen ilişkilendirme fonksiyonları, belli modal parametre tanımlama teknikleri kullanılarak işlenmekte ve sistemin çalışma koşullarında veya verilen tahrik altında aktif olan doğal frekansları, salınım şekilleri ve modal iç sönümlenmeleri bulunmaktadır. OMA analizlerinde her çalışma koşulunda yapının farklı doğal frekansları tahrik edilebilmektedir. Bir çalışma ortamında elde edilmeyen doğal frekanslar başka bir ortamda ortaya çıkabilmektedir. Sadece tepki sinyalleri mevcut olan OMA'da modal parametre bulma yöntemi olarak "Stochastic Subspace" metodu kullanılmıştır. Bu metotta tepki sinyallerinden bir veya birkaçı referans olarak seçilmekte ve diğer tepkiler ile aralarında korelasyon fonksiyonları oluşturulmaktadır. Bu analiz sırasında teorik olarak tahrik "White Noise" olarak kabul edilmektedir. Ancak pratikte sıklıkla karşılaşılan "Colored White Noise" inde tatmin edici sonuçlar verdiği bilinmektedir [4].

TANK NAMLUSU OPERASYONEL MODAL ANALİZ TESTLERİ

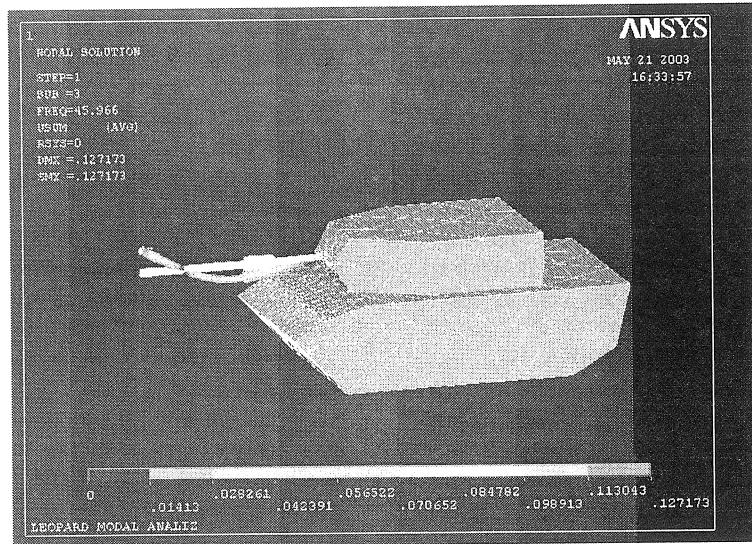
Tankların seyir halinde ve her türlü arazi şartlarında, hareketli hedeflere, ilk atımda yüksek vuruş ihtimalinin olması tank üreticilerinin en önemli hedefleri arasındadır. Bu kapsamda mühimmatı hedefe doğru yönlendiren tank namlusunun, iki eksenindeki stabilizasyonu tank kulesinde bulunan beşikteki silah cayrosu ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte, kontrolü yapılmakta olan namlu, arazi ve sistemden gelen tahrikler sebebiyle yapısal olarak doğal frekanslarda kontrolsüz salınım hareketi yapmaktadır.

Tank namlusunun salınım frekansları, şekilleri ve namlu ucu deplasmanlarının tespit edilmesine yönelik testler yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan ilk çalışmada bilgisayar ortamında IDEAS [8] yazılımı ile katı model olarak tasarlanan tank namlusunun, ANSYS [9] sonlu elemanlar analiz programı yardımıyla doğal frekansları ve salınım şekilleri alınmış ve ilk doğal frekans 10.73 Hz olarak bulunmuştur (Şekil 2).

Sayısal analiz yaklaşımında modelin (geometri, kütle vb.) hassasiyetine göre tüm doğal frekanslar görülememektedir. Ayrıca yapıların gerçek modal iç sönümünün sayısal yöntemlerde modellenmesi mümkün olmadığı için tanka modal testler uygulanmıştır. Bununla birlikte test ölçüm noktaları ANSYS'te yapılmış modal analiz çıktılarına göre belirlenmiştir.



Şekil 2. Tankın 10.73 Hz'deki salınım şekli ve yerdeğiştirme dağılımı.



Şekil 3. Tankın 45.97 Hz'deki salınım şekli ve yerdeğiştirme dağılımı.

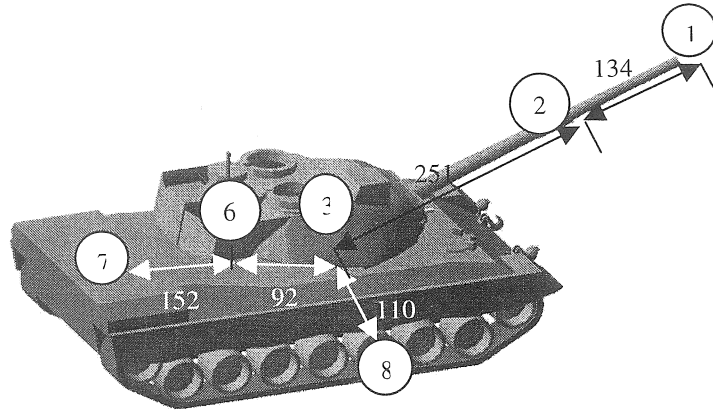
Tankın kullanım ortamında (asfalt, toprak, engel parkuru-Aberdeen Proven Ground vb.), değişken tank hızlarında, stabilizasyon açık ve kapalı, tank hareketsiz namlu yan ve yükseliş eksenlerinde hareketli üzer tekrarlı testler yapılmıştır. Deneysel

Traveller Plus [10] ölçüm sistemiyle tank üzerinde 8 ayrı noktadan 3 eksenli ICP ivmeölçerlerle (Şekil 4-5) gerçekleştirilmiştir.

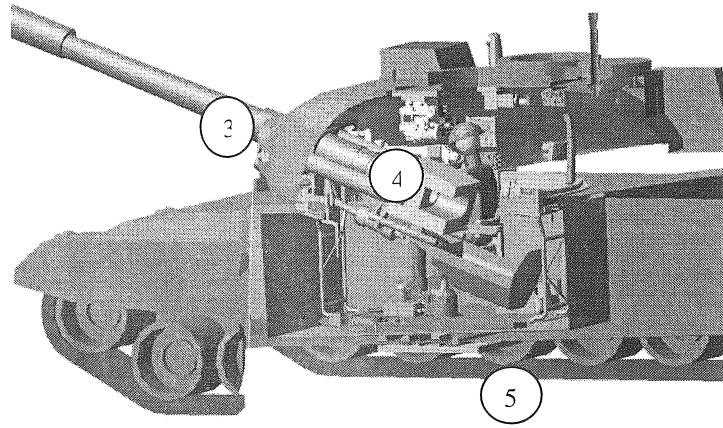
Deneysel titreşim analizinde, öncelikle sistemlerin maruz kaldığı tepe ivme değerlerine,

enerji seviyesine (güç spektrum yoğunluk-PSD) ve frekanslarına bakılmaktadır. Platformlarda oluşan titreşimler, tahrikler ve yapısal tepkilerden oluşmaktadır. Tank namlusunun uç kısmına ait değişik senaryolardaki (operasyonel koşullar) PSD grafiği Şekil 6'da incelendiğinde tüm frekanslardaki titreşimler görülmektedir.

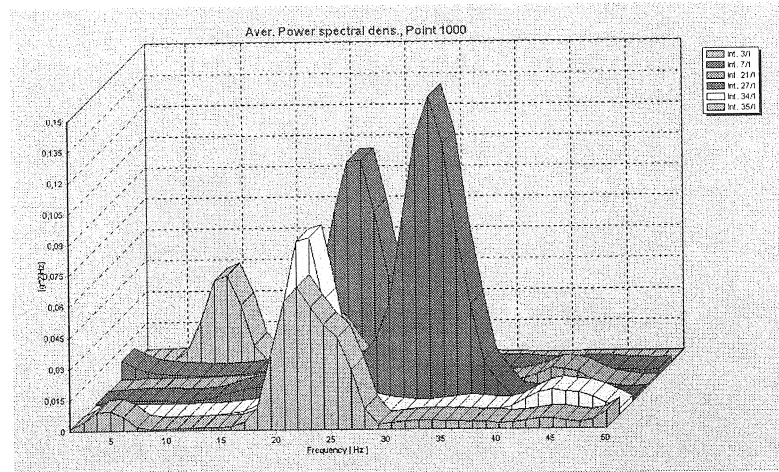
Tank hareketsiz iken namlunun yükseliş ekseninde aşağıya doğru stoplarına vurdurulması ile yapılan testin PSD grafiği ise Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 4. Tank üzerinde üç eksenli ivmeölçer yerleşim noktaları (ölçüler cm).



Şekil 5. Tank içerisinde üç eksenli ivmeölçer yerleşim noktaları.

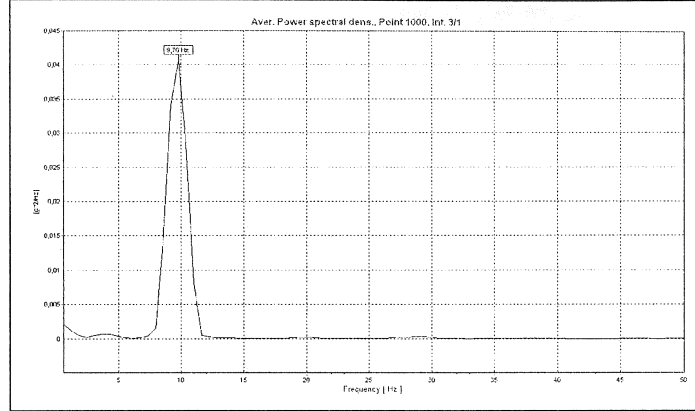


Şekil 6. Namlunun çeşitli operasyonlar altındaki titreşim profili.

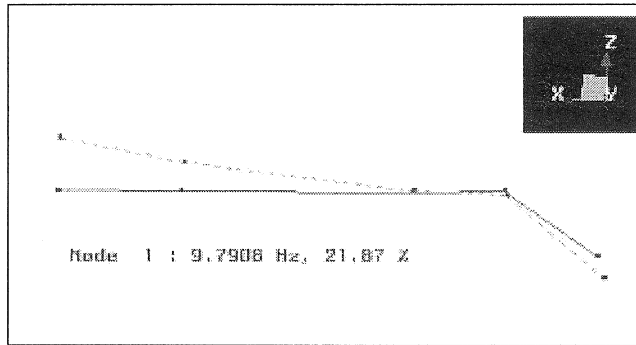
Modal analiz sonuçları ile uyumlu olan ilk doğal frekans da (9.76 Hz) yaklaşık olarak enerjinin büyük bir kısmını kapsamaktadır. Genellikle yüksek frekanslardaki titreşimlerde daha az enerji tutulmakta ve bu frekanslar sisteme yapısal olarak bir problem oluşturmamaktadır.

Test sonuçlarının operasyonel modal analizi, LMS Modal Analiz [4] yazılımı ile yapılmıştır. Bu çalışmada tankın engel parkurunda, stabilizasyon modu kapalı ve 10 km/h hızla giderken alınan verilerle titreşim analizi yapılmıştır. Tank namlusu için önemli olan ilk doğal frekansı 9.79 Hz olarak bulunmuştur.

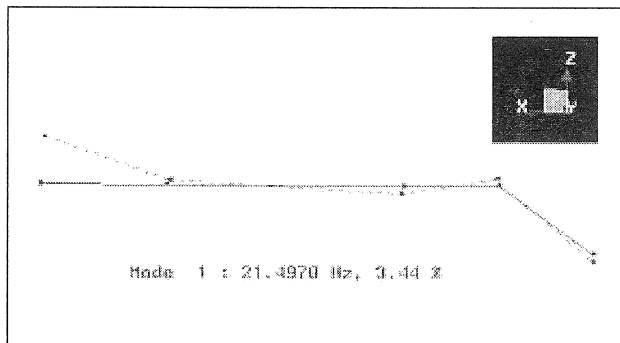
Sayısal modellemedeki varsayımlar ve problemler nedeniyle, modal parametrelerin doğruluğu deneysel modal analizler ile sağlanmaktadır. Sayısal analiz namlunun doğal frekanslarını 10-45 Hz (Şekil 2-3) civarında elde etmesine rağmen OMA'da 9-21 Hz vb. (Şekil 8-9) sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal analizde namlunun tank içindeki yapısı dahil edilmediği için, doğal frekanslar deneysel sonuçlara göre yüksek çıkmıştır. Her test ortamında değişik tahrikler geldiği için testlerde farklı doğal frekanslar tahrik edilmiştir. Testlerin verileri incelendiğinde tüm frekans ve şekiller elde edilmiştir.



Şekil 7. Namluya yükseliş eksenine yönünde verilen tahrikin titreşim profili.



Şekil 8. Namlu aşağı indirilerek stoplara vurdurulmasıyla elde edilmiş birinci salınım şekli.



Şekil 9. Tank namlusu 21.49 Hz'deki salınım şekli.

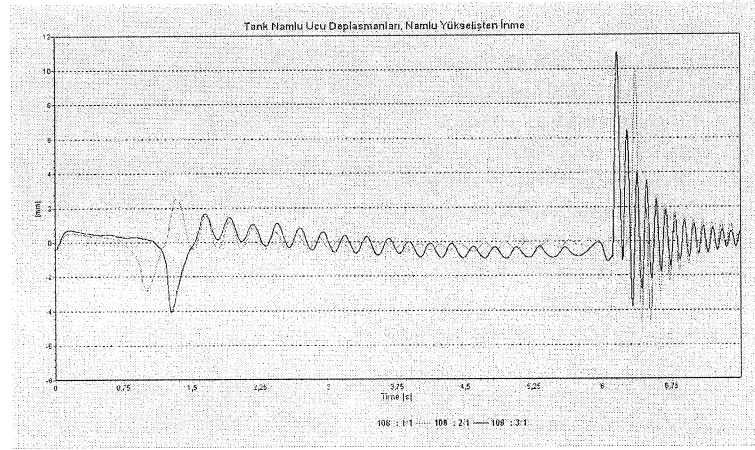
TANK NAMLU DEPLASMANLARI

Tank namlu salınım şekilleri modal analiz ile elde edilmesine rağmen, deplasman büyüklüklerini vermemektedir. Tank namlu ucunun araca dik deplasman değerleri her bir senaryoya göre, özel sinyal işleme yöntemleri kullanılarak çıkartılmıştır. Yapılardaki deplasman ölçümleri genel olarak doğrusal değişken deplasman sensörleri (LVDT) ile yapılmaktadır. Bu algılayıcılar düşük frekansta çalışan sistemler için uygun olmaları nedeniyle yüksek frekanslardaki deplasman ölçümlerinde yeterli olmamaktadır. Geniş frekanslarda (5-2000 Hz) tepki veren sistemlerde, ivmeölçer vasıtasıyla ivme-zaman sinyalleri veri işleme adımlarından geçirilmekte ve deplasman bilgisine ulaşılmaktadır. Toplanan ivme verileri yapının katı cisim hareketlerini de içermektedir. Bu hareketler 2-3 Hz'in altındaki frekanslarda gerçekleşmektedir. Ayrıca bu frekanslar, ICP tipi ivmeölçerlerin etkili ölçüm aralığı dışında olması nedeniyle, sinyalin 4Hz'in altında

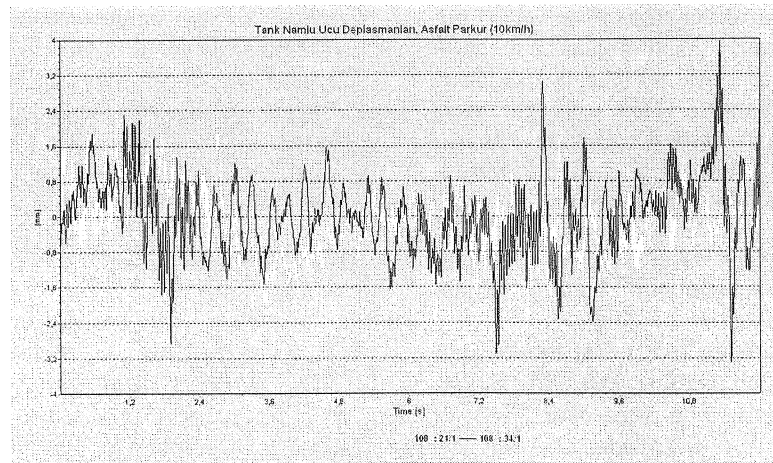
kalan kısmının filtrelenmesiyle katı cisim hareketlerine sahip olmayan bir sinyal elde edilmesi sağlanmaktadır. Daha sonra deplasman elde edilirken bu sinyalin entegralleri alınmakta, oluşan doğrusal eğilimler giderilmekte ve gerekirse "low-pass" filtreler kullanılmaktadır.

Sonuç olarak deplasman analiz çıktıları operasyonlar anında namlu ekseninin elastik deformasyonunu vermektedir. Tank hareketsizken namlu aşağı indirilirken limitlere vurdurularak elde edilmiş üç tekrarlı testler Şekil 10'da verilmiştir. Diğer şekillerde (Şekil 11-12) ise serbest salınımların tankın stabilizasyona olan etkisini gösteren namlu deplasmanları verilmiştir.

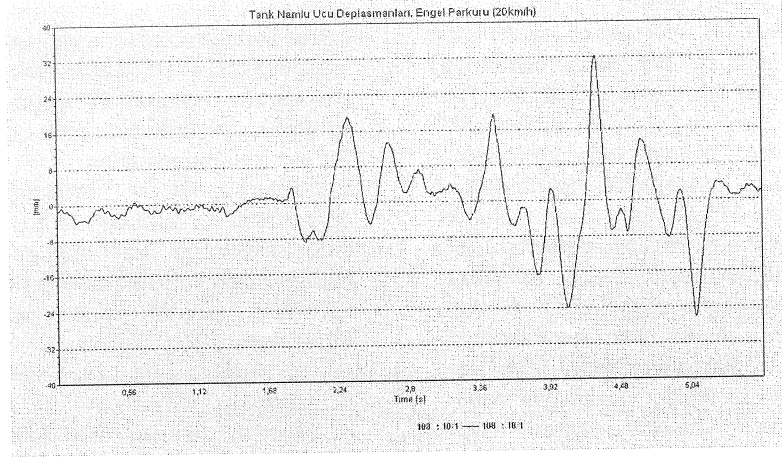
Tankın stabilizasyonu açık ve kapalı modunda, namluya yoldan gelen tahriklerin en az olduğu durum olan asfaltta yaklaşık aynı salınımlar elde edilmiştir. Testler esnasında namlunun en çok salınımı engel parkurunda elde edilmiştir. Yüksek hızla stabilizasyon açık testlerinde engellerin yerleşim durumuna göre önemli deplasman anları oluşmuştur.



Şekil 10. Tank hareketsiz namlu aşağı indirilirken darbe ile oluşan namlu ucu deplasman.



Şekil 11. Tank 10 km/h hızda, asfalt parkur, stabilizasyon açık (21) ve kapalı (34) namlu ucu deplasmanı.



Şekil 12. Tank 20 km/h hızda, engel parkuru, stabilizasyon açık (10) ve kapalı (18) namlu ucu deplasmanı.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Sistemlere çalışma ortamlarının neden olduğu titreşimlerin yanı sıra, kaynak frekanslarının (motor, pervane, transmisyon, balanssızlık vb.) etkileri yapının tasarımına göre değişmektedir. Bu nedenle, titreşim problemi oluşması durumunda gövdede bulunan ve cihazın monte edildiği yerlerin (braket, şase vb.) iyileştirilmesi, katılık eklenmesi veya çıkartılması ile doğal frekansların (>50Hz) operasyonel frekansların dışına kaydırılması ile sağlanmaktadır. Bağımsız ve riskli sistemlerde veya cihazların özgün tasarımlarında modal analiz tekniği kullanılmaktadır. Böylelikle sistemlerin varsa yetersizlikleri ortaya çıkmakta, çalışma aralık ve büyüklükleri netleşmiş olmaktadır.

Tank namlusunun yapısal analizleri sayısal ve deneysel yöntemlerle yapılmıştır. Namlunun tankın gövdesi ile birlikte gerçek ortamda modal analizi yapılarak sistemin yapısal davranışı ortaya çıkmıştır. Tankta yapılan atış kontrol çalışmalarında kullanılmakta olan kontrol döngüsü, filtre yerleri bu çalışmada ortaya çıkmış doğal frekanslara göre ayarlanması ve/veya namluya yapısal değişiklikler yapılması gündeme gelmiştir. Tank hareketli iken namlu beşikten itibaren serbest salınım yapması nedeniyle mühimmat atışlarında hedefte makul seviyelerde sapma olmaması için salınımı azaltıcı önlemler alınmalıdır. Namluda yapılacak modal tasarım ile doğal frekanslarının yüksek değerlere kaydırılarak namlu salınımların kontrol altına alınması mümkün olacaktır.

Namlunun özellikle ilk doğal frekansını yükseltmek için beşikten çıktığı yere kütle-katılık eklenmesi namluda iyileştirme yapacaktır. Sayısal modelin deneysel sonuçlarla doğrulanmasından sonra modele çok kolaylıkla iyileştirmelerin uygulanması mümkün olmaktadır. Bu doğrultuda ANSYS sonlu eleman modelinde namlu boynuna kalın cidarlı

silindir eklenmiş ve doğal frekanslar 15 Hz'lere çıkartılmıştır. Benzer şekilde modern tanklar incelendiğinde namlularının önceki modellerine göre daha katı olacak (salınımı azaltıcı) şekilde tasarım değişikliklerine gidildiği görülmektedir. Sonuç olarak mevcut tanklara yapılmakta olan analizler ve ortaya çıkan iyileştirmeler sonucunda tankların vuruş yetenekleri artırılmış olacaktır.

OPERATIONAL MODAL AND DEFLECTION ANALYSIS OF THE TANK BARREL

One of the most important goals of tank manufacturers is to have a high on-the-move first round hit probability for stationary and moving targets in all possible battlefield conditions. This is achieved by optimum design and sensitivity of the firing control system. For this purpose two-axis gun stabilization is performed by the gun gyroscope, encoder etc. However approximately 4 m length of the gun exterior to the turret, deflects at its natural frequencies by an uncontrolled manner due to the excitations from the field. In this work; the natural frequencies of the gun using Operational Modal Analysis (OMA) and the displacements of the muzzle during stabilization and field conditions are determined. Furthermore improvements to reduce the deflections of the gun are discussed.

KAYNAKLAR

1. Çelik, M., "Mekanik Şok ve Titreşim Tasarım Kılavuzu", Aselsan-MST/MTM, Şubat 2003.
2. Çelik, M., Çiğdemoğlu C. ve Çelikkol F., "Tank Projesi Şereflikoçhisar Atış, Titreşim, Şok, Stabilizasyon ve Sıcaklık Testleri Sonuç Raporu", 7450 Proje Teknik Raporu, MST-MTM Aselsan, 2000.

3. Çelik, M., "Tank Komuta Birimi Şok ve Titreşim Analizi", Aselsan Dergisi, Sayı 63, Ekim 2001.
4. LMS Intl. LMS Modal Analysis Software Manual, Belgium, 2003.
5. Rao, S. S., *Mechanical Vibrations*, Addison-Wesley Pub. Group, 1995.
6. Wowk, V., *Machinery Vibration: Measurement and Analysis*, Mc Graw-Hill, 1991.
7. Ewins, D.J., *Modal Testing*, 2nd Edition, Research Studies Press Ltd, Baldock, 2000.
8. IDEAS, Tutorials of Simulation Projects, Rev.8, 2002.
9. Ansys Structural Analysis Guide, Static Analysis, Version 7.
10. Measurements Group Inc, Traveller Plus ESAM Software Manual, Munich, 2000.