

YAKIT ÇALKALANMA DİNAMİĞİ MODELLENMESİ

Serdar Avşar¹

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A. Ş., Ankara

ÖZET

Yakıt çalkalanma dinamiğinin uçak dinamiğine etkisi olabilmektedir. Uçağın hareketleri neticesinde oluşan ivmeler yakıtın belli bir yöne doğru yığılmasına veya çalkalanma hareketi yapmasına yol açabilmektedir. Bu hareket neticesinde uçağın ağırlık merkezi ve atalet değerleri değişebilmektedir. Bu çalışmada bu etkinin yansıtılabilmesi için öncelikle yakıtın çeşitli koşullardaki denge durumları hesaplanmış, sonrasında da ikinci derece bir yakıt dinamiği modeli eklenerek yakıt yüzeyinin anlık açıları bulunmuştur. Bu anlık açıların neticesinde oluşan ağırlık merkezi ve atalet değişimleri hesaplanarak uçak dinamiğine etkileri incelenmiştir.

GİRİŞ

Yakıt çalkalanma dinamiğinin uçak dinamiğine etkisi olabilmektedir. Bu etkiyi modellemek üzere öncelikle literatürdeki yakıt çalkalanmasıyla ilgili kaynaklar taranmıştır. Alandihallaj ve arkadaşları [2023] bir uzay aracındaki yakıt çalkalanma bozucu etkilerini modellemek amacıyla küresel sarkaç modeli kullanmıştır. Modellemenin ve kontrol yönteminin doğrulanması amacıyla 3 serbestlik dereceli platformlar kullanılmıştır. Liu ve arkadaşları [2020] kriyojenik yakıt tanklarının dinamiğini incelemek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanmıştır. Sinüzoidal uyarıların yakıt çalkalanma dinamiğine etkileri incelenmiştir. Nolan ve Moncayo [2019] yakıt çalkalanma dinamiğinin uzay aracı dinamiğine etkisini modellemek amacıyla yakıt çalkalanma dinamiği için yay-kütle benzetmesi kullanmıştır. Kılıç [2015] taşıt yakıt deposundaki çalkalanma dinamiğini hem deneysel hem de hesaplamalı akışkan dinamiği yöntemleriyle incelemiştir. Yakıt tankı perdelerinin ve şamandıraların yakıt çalkalanma dinamiğine etkileri incelenmiştir. Van Hai [2008] sıvı çalkalanmalarının hareket halindeki gemilerin dinamiğine etkisini modellemiştir. Geminin ve gemi içindeki sıvının dinamiğini incelemek için sınırlı elemanlar metodu kullanılmıştır (FEM). Abramson [1966] yakıt çalkalanma dinamiğinin belirlenmesi için kullanılabilir hesaplamalı ve deneysel yöntemleri ve modelleme için kullanılabilir eşdeğer mekanik sistemleri detaylı bir şekilde anlatmıştır. Moran ve arkadaşları [1994] 1750 litrelik bir sıvı hidrojen tankı ile yakıt çalkalanması deneyleri yapmış ve bunun sonuçlarını aktarmıştır. Chatman ve arkadaşları [2008] yakıt çalkalanma dinamiğini bir serbestlik dereceli bir sarkaç şeklinde modellemiştir. Çalışmada yığın akışkan hareketi, yüzeyaltı dalga hareketi ve serbest yüzey çalkalanması olmak üzere üç farklı kategoride çalkalanma hareketi olduğundan bahsedilmiştir. Modellenen çalkalanma hareketi serbest yüzey çalkalanmasıdır. Luskin ve Lapin [1952] yakıt çalkalanmasını tek serbestlik dereceli sarkaç şeklinde modellemiş ve uçak dinamiğine etkilerini incelemiştir. Topçu ve arkadaşları [2017] bir binek aracın yakıt deposundaki yakıt çalkalanma dinamiğini deneysel olarak incelemiştir. Perdeli ve perdesiz yakıt tanklarının dinamiğindeki farklılıkları göstermişlerdir. Jafari ve arkadaşları [2010] yakıt dinamiğini iki serbestlik dereceli bir sarkaç şeklinde modellemiştir. Frosina ve arkadaşları [2018] binek araçlardaki yakıt çalkalanma dinamiğini deneysel olarak ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak incelemiştir. Fries ve arkadaşları [2012] uzay araçlarındaki yakıt çalkalanması dinamiği için kullanılabilir hesaplama yöntemlerini anlatmıştır. Bu yöntemler arasında basit sarkaç modeli, yay kütle modeli, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deneysel yöntemler bulunmaktadır. Sanapala ve arkadaşları [2016] sıvı çalkalanma dinamiğini hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak hesaplamışlardır. Weerdts ve arkadaşları [2008] yakıt çalkalanması iki serbestlik dereceli sarkaç olarak modellemiştir. Yang ve Peupot [2010] yakıt çalkalanma dinamiği için mekanik bir model kullanmış ve bu mekanik modelin katsayılarını da hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak elde etmiştir.

¹ Lider Tasarım Mühendisi, TUSAŞ, E-posta: serdar.avsar@tai.com.tr

Bu çalışma kapsamında bir uçağın yakıt deposundaki yakıt çalkalanma dinamiği mekanik bir şekilde modellenmiştir. Yakıt tankının doluluk oranına göre değişen doğal frekans ve sönümlenme katsayıları kullanılarak ikinci dereceden bir eyleyici modeli oluşturulmuştur. Doğal frekans ve sönümlenme katsayılarının sadece doluluk oranına göre değil sinyalin şiddetine bağlı olarak da değiştiği görülmüştür. Yakıt tankındaki yakıtın hissettiği ivme hesaplanmış ve bu ivme neticesinde yakıtın hangi açıyla duracağı bulunmuştur. Bu açılar eşlenik yunuslama ve eşlenik yuvarlanma açıları olarak isimlendirilmiştir. Bulunan bu eşlenik açılar çalkalanma dinamiğinden geçtikten sonra elde edilen anlık açılar kullanılarak yakıtın ağırlık merkezi ve atalet değerleri hesaplanmıştır. Bu değerleri hesaplayabilmek için gerekli veri tabanı Amesim programı kullanılarak oluşturulmuştur.

İlk olarak model yapısı bölümünde yakıt çalkalanma dinamiği modelinin bölümleri ve uçak modeliyle bağlantısı anlatılmıştır. Sonrasında yakıt denge pozisyonu bölümünde eşlenik açıların nasıl hesaplandığı anlatılmıştır. Sonrasında yakıt çalkalanma dinamiği bölümünde uygulanan ikinci dereceli eyleyici modeli anlatılmıştır. Uygulamalar ve değerlendirme kısmında ise bu modelin genel uçak modeline eklenmesi sonucunda uçak dinamiğinde gözlenen bulgulardan bahsedilmiştir.

MODEL YAPISI

Model yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Uçak modelinde gelen açısal hızlar, açısal ivmeler ve çizgisel ivmeler kullanılarak yakıt düzeyinin denge açıları bulunur. Sonrasında ikinci derece yakıt dinamiği bloğunda denge açısı bilgisi kullanılarak anlık yakıt yüzeyi açıları bulunur. Daha sonrasında bu anlık açılar kullanılarak yakıt deposunun anlık atalet ve ağırlık merkezi değerleri bulunur ve bu değerler kullanılarak uçağın ağırlık merkezi ve atalet değerleri güncellenir.



Şekil 1: Model yapısı

YAKIT YÜZEYİ DENGE AÇILARI

Yakıt yüzeyi denge açılarını hesaplamak için öncelikle yakıt tankındaki yakıtın ağırlık merkezi pozisyonundaki hissedilen ivme bulunmalıdır. Bunun için uçağın anlık ağırlık merkezi konumu ve yakıtın anlık ağırlık merkezi konumu arasındaki vektör, açısal hızlar, açısal ivmeler ve çizgisel ivmeler kullanılır (Eşitlik 1). Eşitlik 1'deki $\vec{a}_{yakıt}$ ve \vec{a}_{ucak} sırasıyla yakıtın ve uçağın hissettiği ivmelere göstermektedir. Uçağın hissettiği ivmeye yer çekiminden gelen ivme de dahildir. $\vec{\omega}$ ve $\vec{\dot{\omega}}$ sırasıyla açısal hız ve açısal ivme vektörlerini göstermektedir. $\vec{R}_{y/u}$ ise uçağın anlık ağırlık merkezi ve yakıtın anlık ağırlık merkezi arasındaki pozisyon vektörünü göstermektedir. Hesaplamalar gövde ekseninde yapılmıştır.

$$\vec{a}_{yakıt} = \vec{a}_{ucak} + \vec{\dot{\omega}} \times \vec{R}_{y/u} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R}_{y/u}) \quad (1)$$

Yakıtın hissettiği ivme bulunduktan sonra ise yakıt yüzeyinin eşlenik yunuslama ve eşlenik yuvarlanma açıları bulunur (Eşitlik 2 ve 3). $\theta_{yakıt}$ ve $\phi_{yakıt}$ sırasıyla eşlenik yunuslama ve eşlenik yuvarlanma açılarını göstermektedir. a_{xYakit} , a_{yYakit} ve a_{zYakit} sırasıyla x, y ve z eksenleri yönündeki

yakıtın hissettiği ivmeleri göstermektedir. a_{toplam} ise yakıtın hissettiği ivmenin bileşke değerini göstermektedir.

$$\theta_{yakıt} = a \sin(a_{xYakit}/a_{toplam}) \quad (2)$$

$$\phi_{yakıt} = -a \tan 2(a_{yYakit}, -a_{zYakit}) \quad (3)$$

Bu bölümdeki açısal hız, açısal ivme ve çizgisel ivmeye bağlı eşlenik açı hesaplamaları Amesim programı kullanılarak doğrulanmıştır.

İKİNCİ DERECE YAKIT ÇALKALANMA DİNAMIĞI

Denge açıları bulunduğundan sonra yakıt çalkalanma dinamiği bloğunda anlık açılar bulunmaktadır. Dinamiği tanımlayan ikinci dereceden diferansiyel denklemler Eşitlik 4 ve 5'te verilmiştir. Her bir yakıt deposu için θ , $\dot{\theta}$, ϕ ve $\dot{\phi}$ olmak üzere 4 durum bulunmaktadır. Denge açıları girdi olarak girmektedir.

$$\ddot{\theta} = (\theta_{denge} - \theta)\omega_{n\theta}^2 - 2\omega_{n\theta}\zeta_{\theta}\dot{\theta} \quad (4)$$

$$\ddot{\phi} = (\phi_{denge} - \phi)\omega_{n\phi}^2 - 2\omega_{n\phi}\zeta_{\phi}\dot{\phi} \quad (5)$$

ω_n ve ζ yakıt deposunun şekline, yakıt tipine ve deponun doluluk oranına göre değişmektedir. Buna ek olarak dinamik lineer olmadığı için sinyalin genliğine göre de değişmektedir. Bu dinamik değerleri hesaplamalı akışkan dinamiği yoluyla bulunmuştur. Farklı depo doluluk oranlarında step ve multisine sinyalleri ile depoya açı verilmiş ve deponun ağırlık merkezindeki değişimler kaydedilmiştir. Bu analizler sonucunda farklı depo doluluk oranlarındaki ve farklı sinyal genliklerindeki ω_n ve ζ değerleri bulunmuştur. Sinyal genliği Eşitlik 6 ve 7'deki gibi tanımlanmıştır.

$$\Delta\theta = (\theta_{denge} - \theta) \quad (6)$$

$$\Delta\phi = (\phi_{denge} - \phi) \quad (7)$$

Hesaplamalı akışkan dinamiği analizleri 1 g yer çekimi ortamında yapılmıştır. Uçağın hissedebileceği farklı yer çekimi durumları için dinamikte düzeltme yapılmaktadır. Yapılan bu düzeltmeler Eşitlik 8-13'te verilmiştir. n_{dog} ve n_{yan} sırasıyla doğrusal ve yanal yer çekimi büyüklükleridir. n_x , n_y ve n_z ise sırasıyla gövde ekseninde x, y ve z yönündeki yer çekimi miktarlarıdır. $C_{\omega n\theta}$ ve $C_{\omega n\phi}$ sırasıyla yunuslama ve yuvarlanma doğal frekanslarının düzeltme katsayılarıdır. $C_{\zeta\theta}$ ve $C_{\zeta\phi}$ ise sırasıyla yunuslanma ve yuvarlanma sönüm oranlarının düzeltme katsayılarıdır.

$$n_{dog} = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad (8)$$

$$n_{yan} = \sqrt{n_y^2 + n_z^2} \quad (9)$$

$$C_{\omega n\theta} = \sqrt{n_{dog}} \quad (10)$$

$$C_{\omega n\phi} = \sqrt{n_{yan}} \quad (11)$$

$$C_{\zeta\theta} = 1/C_{\omega n\theta} \quad (12)$$

$$C_{\zeta\phi} = 1/C_{\omega n\phi} \quad (13)$$

UÇAK DİNAMIĞINA ETKİ

Yakıt çalkalanmasının uçak dinamiğine iki farklı etkisi olabilmektedir. Bunlardan birincisi yakıt yığılmasının uçağın ağırlık merkezini değiştirmesi ve bunun sonucunda uçak dinamiğinin değişmesidir. Bu etkinin büyüklüğü yakıt tankının büyüklüğüne, şekline, sayısına ve pozisyonuna göre değişmekle birlikte genelde uçak dinamiğine etkisi ihmal edilebilir boyutta olmaktadır. Bazı uçuş koşullarında ise bu etki daha yüksek hissedilebilir. Örneğin kalkış koşusu esnasındaki rotasyon manevrası bu etkiden daha fazla etkilenebilmektedir. Kalkış koşusu esnasında yüksek ivmeyle geriye yığılan yakıt uçağın ağırlık merkezini kayda değer bir miktarda değiştirebilir. Bu da modellenen rotasyon manevrasının doğruluğunu etkileyebilmektedir. Yüksek yunuslama açılı tırmanma koşullarında da yine ağırlık merkezi kayda değer miktarda kayabilmektedir. İkinci önemli etki ise uçağın salınımı durumunda yakıtın çalkalanması ve bunun uçağın salınım dinamiğini etkilemesidir. Bu da aynı şekilde yakıt tankının büyüklüğüne, şekline, sayısına ve pozisyonuna göre değişen bir etki olmakla birlikte uçağın salınımını çok fazla değiştirmedeği görülmüştür. Özellikle düşük açılardaki

salınımlarda ağırlık merkezindeki değişim çok düşük olmaktadır. Bu da uçak dinamiğinde genellikle kayda değer bir etkiye neden olmamaktadır.

SONUÇ

Uçağın hız ve ivme koşullarına göre yakıt denge açıları bulunmuştur. Bu denge açılarındaki ağırlık merkezi ve atalet değişimleri Amesim programı kullanılarak bulunmuştur. Yakıt çalkalanma dinamiği ikinci dereceden bir dinamik modelle modellenmiştir. Bu dinamik farklı genlikte step ve multisine girdileri kullanılarak hesaplamalı akışkan dinamiği ile bulunmuştur. Bulunan doğal frekans ve sönümlenme katsayıları modele yansıtılmıştır. Uygulamalar neticesinde yakıt çalkalanma dinamiğinin uçak dinamiğine etkisinin genellikle ihmal edilebilir boyutta olduğu görülmüştür. Buna rağmen bu etkinin boyutundan emin olunması amacıyla modellenmesi faydalı olacaktır. Özellikle tek ve büyük bir yakıt tankı varsa veya uçak kalkış koşusu, frenleme, yüksek açılı tırmanma gibi gövde x ekseninde yüksek ivmelerin görüldüğü manevralar yapıyorsa yakıt çalkalanma etkisinin modellenmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

- Alandihallaj, M. A., Yalçın, B. C., Ramezani, M., Mendez, M. A. O., Thoemel, J. ve Hein, A., 2023. *Mitigating fuel sloshing disturbance in on-orbit satellite refueling: An experimental study*, 74th International Astronautical Congress, Bakü, Azerbaycan, 2-6 Ekim.
- Liu Z., Feng, Y., Liu, Y., Lei, G. ve Li, Y., 2020. *Fluid sloshing Dynamics performance in a fuel storage tank under sinusoidal excitations*, Applied Thermal Engineering, Cilt: 168.
- Coulter, N. ve Moncayo, H., 2019. *Comparison of optimal and bioinspired adaptive control laws for spacecraft sloshing dynamics*, Journal of Spacecraft and Rockets.
- Kılıç, E., 2015. *Taşıt yakıt deposunda çalkalanma olayının analizi*, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Hai, L. V., 2008. *Modelling, simulation and behaviour of sloshing liquid-tank-ship coupled system*, National University of Singapore, Singapur.
- Abramson, H. N., 1996. *The dynamic behavior of liquids in moving containers*, NASA, Washington D.C.
- Moran, M. E., McNelis, N. B. ve Kudlac, M. T., 1994. *Experimental results of hydrogen slosh in a 62 cubic foot (1750 liter) tank*, NASA Technical Memorandum 106625, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio.
- Chatman, Y., Gangadharan, S., Marsell, B., Schlee, K., Sudermann, J., Walker, C., Ristow, J. ve Hubert, C., 2008. *Modeling, simulation, and parameter estimation of lateral spacecraft fuel slosh*, 12th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics.
- Luskin, H. ve Lapin, E., 1952. *An analytical approach to the fuel sloshing and buffetting problems of aircraft*, Journal of the Aeronautical Sciences, Cilt: 19, No: 4, s. 217-228.
- Topçu, E. E., Kılıç, E. ve Çavdar, K., 2017. *Bir binek araç yakıt tankının çalkalanma davranışının deneysel incelenmesi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 17., s. 292-301.
- Jafari, A. A., Khoshnod, A. M. ve Roshnian, J., 2010. *Nonlinear dynamic modeling and active vibration control of a system with fuel sloshing*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Cilt: 61, s. 269-274.
- Frosina, E., Senatore, A., Andreozzi, A., Fortunato, F. ve Giliberti, P., 2018. *Experimental and numerical analyses of the sloshing in a fuel tank*, Energies, Cilt: 11.
- Fries, N., Behruzi, P., Arndt, T., Winter, M., Netter, G. ve Renner, U., 2012. *Modelling of fluid motion in spacecraft propellant tanks – sloshing*, Space Propulsion Conference, Bordeaux, Fransa, 7-10 Mayıs.
- Sanapala, V. S., Velusamy, K. ve Patnaik, B. S. V., 2016. *CFD simulations on the dynamics of liquid sloshing and its control in a storage tank for spent fuel applications*, Annals of Nuclear Energy, Cilt: 94, s. 494-509.
- De Weerd, E., Van Kampen, E., Van Gemert, D., Chu, Q. P. ve Mulder, J. A., 2008. *Adaptive nonlinear dynamic inversion for spacecraft attitude control with fuel sloshing*, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 18-21 Ağustos.
- Yang, H. Q. ve Peupot, J., 2010. *Propellant sloshing parameter extraction from CFD analysis*, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, Tennessee, 25-28 Temmuz.

