

TAM EKLEMLİ ROTOR İÇİN PAL AÇILARI VE PAL YÜKLERİ KULLANILARAK HATVE ÇUBUKLARI VE EYLEYİCİ KOLLARI ÜZERİNDEKİ YÜKLERİN HESAPLANMASI ÜZERİNE BİR YÖNTEM

Harun Tıraş¹ ve Seyhan Gül²

TUSAŞ, Ankara

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

Derya Gürak³

TUSAŞ, Ankara

Prof. Dr. Yavuz Yaman⁴

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Tam eklemlı rotorlarda, pal yunuslama açılarının kontrolü amacıyla eyleyici kolları (actuator rods), yalpa tablası (swashplate) ve hatve çubuklarından (pitch links) oluşan bir mekanizma kullanılmaktadır. Pilot komutlarının uçuş kontrol sistemi tarafından modifikasyonuyla oluşan kontrol girdisi, sırasıyla eyleyici, yalpa tablası ve hatve çubukları yolunu takip ederek pal üzerindeki yunuslama açılarını değiştirir ve helikopterin kontrolü sağlanır. Bahsedilen bu mekanizmadaki yapılardan herhangi birinin uçuş yükleri altında gerekli mukavemeti gösterememesi helikopterin kontrol edilememesi anlamına gelebilir. Bundan dolayı eyleyici kolları ve hatve çubuklarının taşıdığı yüklerin doğru hesaplanması uçuş güvenliği açısından oldukça önemlidir. Bu bildiride, yukarıda bahsedilen mekanizmanın kinematik denklemleri, pal açıları ve pal yüklerini kullanarak eyleyici kolları ve hatve çubukları üzerindeki eksenel kuvvetleri hesaplayan ve TUSAŞ tarafından geliştirilen bir özgün yazılımın (bildiride Y1 olarak geçecektir) geliştirilmesinde ve doğrulanmasında kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir. Yazılımda kullanılan matematik modelin sonuçları üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ilerleme-gerileme sönümleyicisinin (lead-lag damper) pal üzerinde yarattığı yunuslama momentinin ve pal, hatve çubuğu, yalpa tablası ve eyleyici kolu arasındaki kinematik ilişkilerin hesaplamalara dahil edilmemesi yunuslama kolları üzerindeki eksenel kuvvetleri büyük miktarlarda değiştirmemek; eyleyici kolları üzerindeki eksenel yükleri önemli ölçüde değiştirmektedir.

1 Tasarım Mühendisi & Yüksek Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: harun.tiras@tai.com.tr, tiras.harun@metu.edu.tr

2 Tasarım Mühendisi & Yüksek Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: seyhan.gul@tai.com.tr, seyhan.gul@metu.edu.tr

3 Kıdemli Tasarım Uzman Mühendisi, E-posta: dgurak@tai.com.tr

4 Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: yyaman@metu.edu.tr

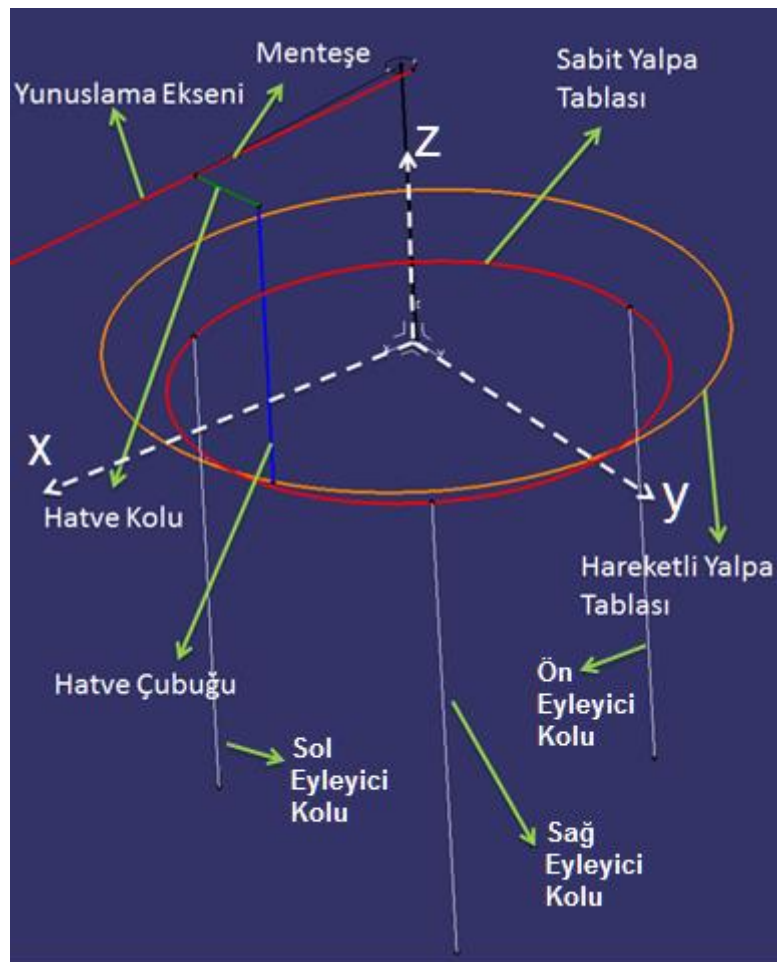
SİMGELER

A_i	:	Rastgele seçilen bir pal azimut açısı için hatve çubuğunun üst noktasının uzaydaki yeri
B_i	:	Rastgele seçilen bir pal azimut açısı için hatve çubuğunun alt noktasının uzaydaki yeri
$\{F_i\}$	:	Yalpa tablası eksen sistemindeki "i" numaralı eyleyicinin üzerindeki yük
$F_{\text{hatve çubuğu,eksenel}}$	:	eksenel hatve çubuğu yükü
F_z	:	Hatve çubuklarından kaynaklanan yalpa tablası üzerindeki toplam z kuvveti (yalpa tablası eksen sisteminde)
$keas$	:	Knots birimindeki eşdeğer hava sürati
l	:	Hatve çubuğu uzunluğu
L	:	Pal yunuslama eksenini ile hatve çubuğu arasındaki minimum uzaklık (moment kolu)
$M_{x,b}$	:	b'den kaynaklı pal üzerinde oluşan yunuslama eksenini etrafındaki moment
$M_{x,y}$	:	Hatve çubuklarından kaynaklanan yalpa tablası üzerindeki toplam x ve y momentleri (yalpa tablası eksen sisteminde)
$\{r_i\}$	:	Yalpa tablası eksen sistemi merkezinden "i" numaralı eyleyici kolu üst noktasına çizilen vektör

GİRİŞ

Tam eklemli rotorlarda, pal üzerindeki yunuslama açılarını kontrol etmek için hatve çubukları (her pal için bir tane) ve eyleyici kolları, yalpa tablası mekanizmasıyla birlikte kullanılmaktadır. Pilotun kolektif hatve ve devri hatve (collective pitch and cyclic pitch) kumandalarının pozisyonlarını değiştirmesiyle verilen komut, uçuş kontrol sisteminin modifikasyonundan sonra eyleyicilere aktarılır. Eyleyiciler, aldıkları komut doğrultusunda yalpa tablasını yukarı aşağı hareket ettirirler ve birbirine dik iki farklı eksen boyunca çevirirler. Hatve çubuklarının bir ucu yalpa tablasına bağlıken diğer ucu hatve kolu vasıtasıyla pallere bağlıdır. Eyleyicilerden gelen hareket, yalpa tablasının hareketi ile hatve çubuklarına aktarılır ve pallerin yunuslama açıları değiştirilir. Bu sayede ana rotordan elde edilen rotor göbeği (rotor hub) yüklerinin yönü ve büyüklüğü tayin edilerek helikopterin kontrolü sağlanır. Yukarıda anlatılan mekanizma hem ana rotor hem de kuyruk rotorunda kullanılmaktadır fakat ana rotor için pilot, kolektif ve devri hatve kumandalarını kontrol ederken kuyruk rotoru için sadece pedal kontrolü bulunmaktadır. Kuyruk rotoru için kullanılan bu pedal kontrolü ise ana rotordaki kolektif hatve kumandasıyla aynı işlevi görmektedir.

Şekil 1'de, ana rotordaki eyleyici kolları, yalpa tablası ve hatve çubuklarının oluşturduğu mekanizmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1: Ana Rotordaki Eyleyici Kolları, Yalpa Tablası ve Hatve Çubuklarının Şematik Gösterimi

Pal üzerinde farklı kaynaklardan gelen ve farklı yönlerde olan birçok yük oluşmaktadır ve bu yüklerin bazılarının hatve çubuğu üzerindeki eksenel yük üzerindeki etkisi diğerlerine göre daha fazladır. Bu çalışmada, ilerleme-gerileme sönümleyicisi kuvvetinin ve hatve çubuğu üzerindeki eksenel kuvveti bulmak ve daha sonra da bu kuvveti kullanarak eyleyici kolları üzerinde eksenel kuvvetleri hesaplamak için kullanılan kinematik denklemlerin hatve çubuğu ve eyleyici kolları üzerindeki eksenel kuvvetlere etkisi incelenmiştir.

YÖNTEM

Özgün Y1 Yazılımının Geliştirilmesi

İlgili kuvvet/momentler: Pal üzerine etkiyen farklı kaynaklı kuvvet ve momentler bulunmaktadır. Y1 yazılımında aşağıdaki pal yükleri girdi olarak kullanılmıştır:

- Pal üzerindeki aerodinamik yüklerden oluşan toplam yunuslama momenti
- Pal üzerindeki atalet yüklerinden oluşan toplam yunuslama momenti
- Yunuslama mafsalı (pitch bearing) yay momenti
- İlerleme-gerileme sönümleyicisi kuvvetinden dolayı oluşan yunuslama momenti

Yukarıdaki momentlerin tamamı ve hatve çubuğunun pal üzerinde yarattığı yunuslama momentinin toplamı sistemin matematiksel olarak dengede olabilmesi için Denklem (1) ve Denklem (2)'de de gösterildiği gibi sıfıra eşit olmalıdır [Tıraş, Gül, Gürak, Yaman, 2016].

$$\sum \vec{M}_x = 0 \quad (1)$$

$$M_{x,aero} + M_{x,atalet} + M_{x,mafsal} + M_{x,ilerleme-gerileme\ sönümleyicisi} + M_{x,hatve\ çubuğu} = 0 \quad (2)$$

Hatve çubuğu momentini bulduktan sonra çubuk üzerindeki eksenel kuvveti hesaplamak için, Denklem (3) kullanılmıştır.

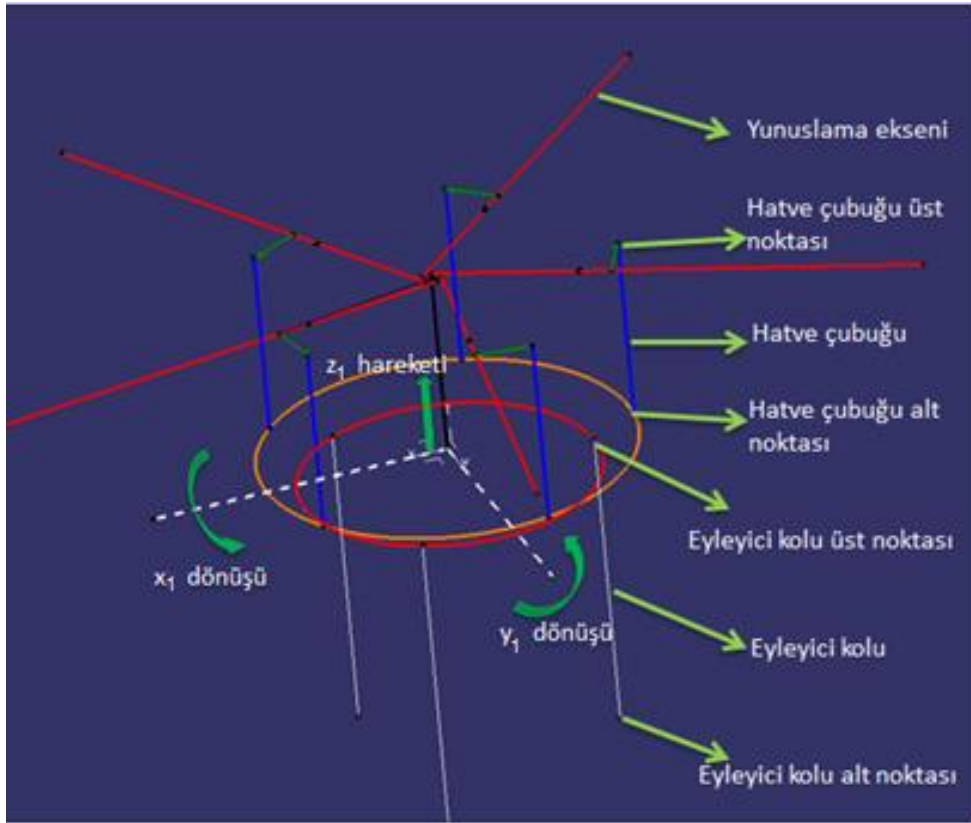
$$F_{hatve\ çubuğu,eksenel} = - \frac{M_{x,hatve\ çubuğu}}{L} \quad (3)$$

Denklem (3)'de kullanılan "L" uzunluğunu (moment kolu) hesaplamak için ise hatve çubuğunun uzaydaki oryantasyonunu hesaplayan kinematik denklemler kullanılmaktadır.

Kinematik model: Pal üzerindeki hatve çubuğunun taşıyacağı yunuslama momenti bulunduğundan sonra, hatve çubuğuna düşen eksenel yük Denklem (3)'de de gösterildiği gibi uygun moment kolu uzunluğu bulunarak hesaplanabilmektedir. Moment kol uzunluğu, pal, hatve çubuğu ve hareketli yalpa tablası mekanizmaları arasındaki kinematik ilişkiler kullanılarak hesaplanmaktadır. Hatve çubuğu üzerindeki eksenel yükün bulunmasından sonra eyleyici kollarındaki yükler de hatve çubuğu, hareketli ve sabit yalpa tablası ve eyleyici kolları arasındaki kinematik ilişkiler kullanılarak hesaplanmaktadır.

Moment kol uzunluğunun hesaplanması: Moment kol uzunluğu, yunuslama eksenini ile hatve çubuğu arasındaki minimum uzaklık olarak tanımlanmıştır. Moment kol uzunluğunun hesaplamasında kullanılan referans eksen sistemi sabit ve dönmeyen bir eksen sistemi olup, Şekil 1 de gösterildiği gibi hareketli yalpa tablasının merkezine sabitlenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan tüm uzunluklar bu eksen sistemine göre ölçülmüştür. Bu eksen sistemi, bildiride "yalpa tablası eksen sistemi" olarak geçecektir. Moment kol uzunluğunun hesaplanması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama yunuslama ekseninin uzaydaki doğrultusunun bulunmasıdır. Y1 yazılımında palin menteşe etrafında sırası ile ilerleme-gerileme, çırpma ve yunuslama hareketlerini yapmasıyla bu doğrultu bulunmuştur. İkinci aşama ise hatve çubuğunun uzaydaki doğrultusunun bulunmasıdır. Bunun için hatve çubuğunun iki uç noktasının uzaydaki konumunun bulunması yeterlidir. Hatve çubuğunun üst noktasının (hatve çubuğu ile hatve kolu arasındaki bağlantı noktası) palle arasında rijit bir bağlantı olduğu için birinci aşamada anlatılan yöntem ile bulunmuştur. Hatve çubuğunun alt noktası (hatve çubuğu ile hareketli yalpa tablası arasındaki bağlantı noktası) ise numerik bir yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama için üç yeni parametreye ihtiyaç vardır. Bunlar, hareketli yalpa tablasının birbirine dik iki eksen etrafındaki dönüş açısı (x_1 ve y_1) ve bu iki eksene dik diğer eksen üzerindeki doğrusal hareketidir (z_1). Nümerik çözümde kullanılan temel varsayım hatve çubuğunun uzunluğunun sabit kaldığı varsayımdır (rijit hatve çubuğu). Üç yeni parametrenin (x_1 , y_1 ve z_1) çözümü ile hatve çubuğunun alt noktasının son konumu, ilk konumunu referans eksen etrafında x yönünde x_1 , y yönünde y_1 kadar döndürerek ve z

yönünde z_1 kadar yer değiştirerek bulunmuştur. Sabit ve hareketli yalpa tablası, hatve çubuğunun üst ve alt noktaları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2: Sabit ve Hareketli Yalpa Tablasının Hareketinin, Hatve Çubuğu ve Eyleyici Kollarının Şematik Gösterimi

Sistemdeki üç yeni parametreyi hesaplamak için üç denkleme ihtiyaç vardır. Çözüm denklemleri Denklem (4)’te gösterilmiştir [Tıraş, Gül, Gürak, Yaman, 2016].

$$\begin{aligned} &\text{for } i=1:3 \\ &\quad \sqrt{(A_{xi}-B_{xi})^2 + (A_{yi}-B_{yi})^2 + (A_{zi}-B_{zi})^2} = l \\ &\text{end} \end{aligned} \quad (4)$$

Denklem (4)’in çözümünde Newton-Raphson metodu [Smith, 1998] kullanılmıştır. Denklemde A_i parametresi önceden hesaplanmıştır, l parametresi ise bilinen bir değerdir. Çözüm istenilen tolerans değerine yakınsayana kadar tekrarlanmıştır. B_i parametresi x_1 , y_1 , z_1 değerlerine bağlı bir parametre olduğu için, Newton-Raphson çözümü sonucunda x_1 , y_1 , z_1 değerleri elde edilmiştir.

Hatve çubuğunun doğrultusunun bulunmasından sonra moment kol uzunluğu, doğrultuları bilinen iki doğrunun (hatve çubuğu ve yunuslama eksenini) arasındaki minimum uzaklık olarak hesaplanmıştır.

Eyleyici kolu eksenel kuvvetlerinin hesaplanması: Modelde üç adet eyleyici kolu kullanılmıştır. Eyleyici kolları beş hatve çubuğunun taşıdığı yükleri dengelemektedir. Denklem çözümü için öncelikle beş hatve çubuğundaki eksenel kuvvetler, yalpa tablası eksen sisteminin merkezine taşınmıştır. Bu taşıma sonucu yalpa tablası eksen sistemi merkezinde üç yönde kuvvet ve üç yönde moment olmak üzere toplamda altı bileşen oluşmuştur. Eyleyici kol kuvvetlerinin çözümünde kullanılan temel varsayımlar aşağıda açıklanmıştır:

- Yalpa tablası üzerindeki düzlem içi kuvvetler eyleyici kolları tarafından dengelenmez. Yalpa tablasının düzlem içi hareketi yapı içerisinde bulunan diğer parçalar tarafından engellenir.

- Yalpa tablası üzerindeki tork eyleyici kolları tarafından dengelenmez. Tork, makas üzerinden şafta aktarılır. Geriye kalan iki düzlem içi moment ve z yönündeki kuvvet değerleri eyleyici kolları tarafından dengelenir.
- Eyleyici kolları sadece eksenel kuvvet taşırlar, moment taşımazlar.

Hatve çubuklarındaki kuvvetler referans noktasına taşındıktan sonra eyleyici kollarının alt ve üst noktalarının uzaydaki konumları bulunmuştur. Eyleyici kolunun üst noktası (Eyleyici kolunun sabit yalpa tablası ile birleştiği nokta) bu noktanın x yönünde x_1 , y yönünde y_1 derece döndürülmesi ve z yönünde z_1 kadar yer değiştirmesi ile bulunmuştur. Eyleyici kolunun alt noktası ise küresel mafsallık (spherical joint) olup bundan dolayı bu noktanın yeri değişmemektedir.

Eyleyici kollarının her bir zaman adımında uzaydaki konumu bulunduğundan sonra üç eyleyici kolundaki üç eksenel kuvvet Denklem Sistemi (5), (6), (7) beraber çözülerek bulunmuştur [Tıraş, Gül, Gürak, Yaman, 2016].

$$(\{r_1\} \times \{F_1\} + \{r_2\} \times \{F_2\} + \{r_3\} \times \{F_3\})_x = M_x \quad (5)$$

$$(\{r_1\} \times \{F_1\} + \{r_2\} \times \{F_2\} + \{r_3\} \times \{F_3\})_y = M_y \quad (6)$$

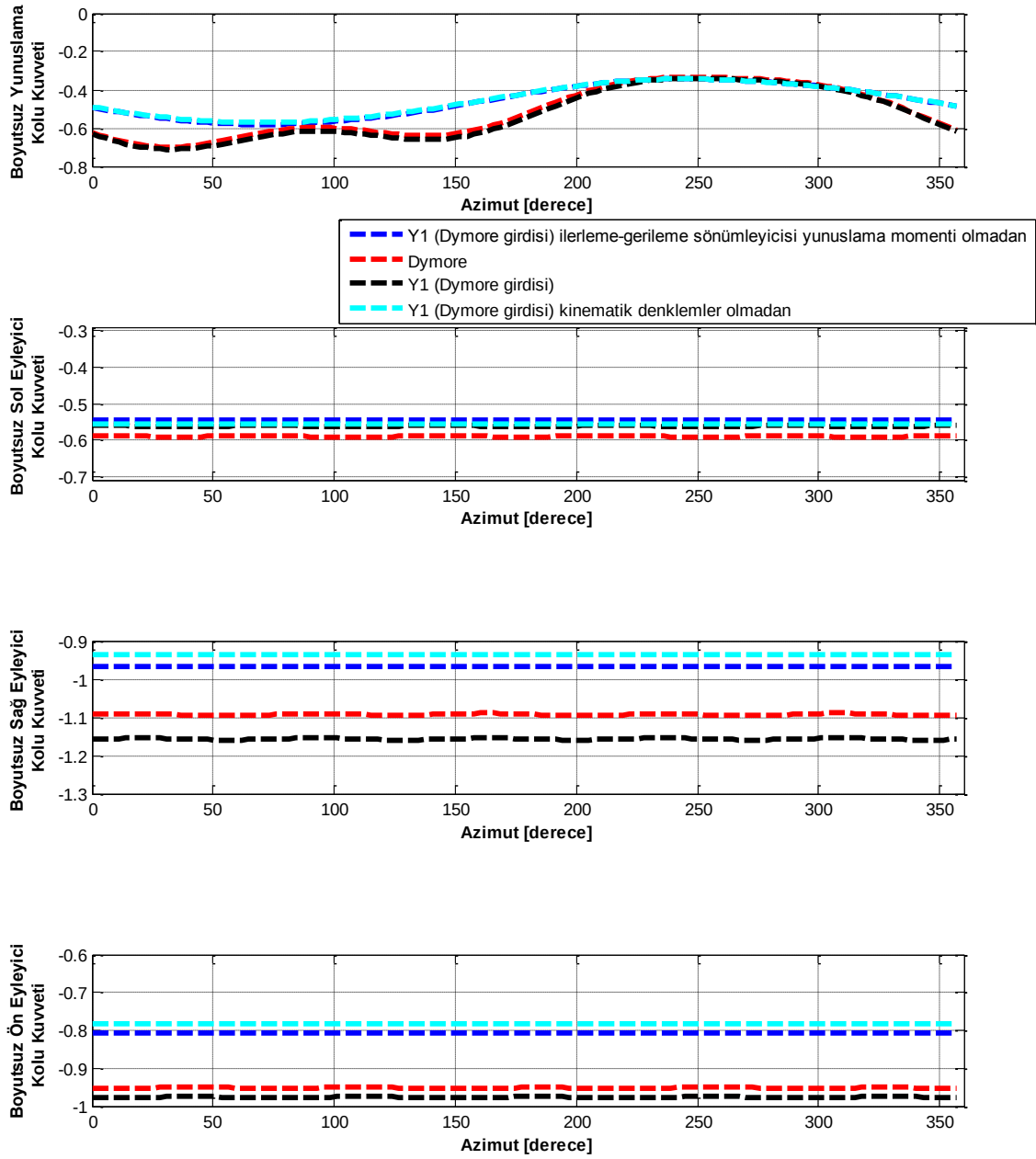
$$(F_1 + F_2 + F_3)_z = F_z \quad (7)$$

Y1 Yazılımının Doğrulanması

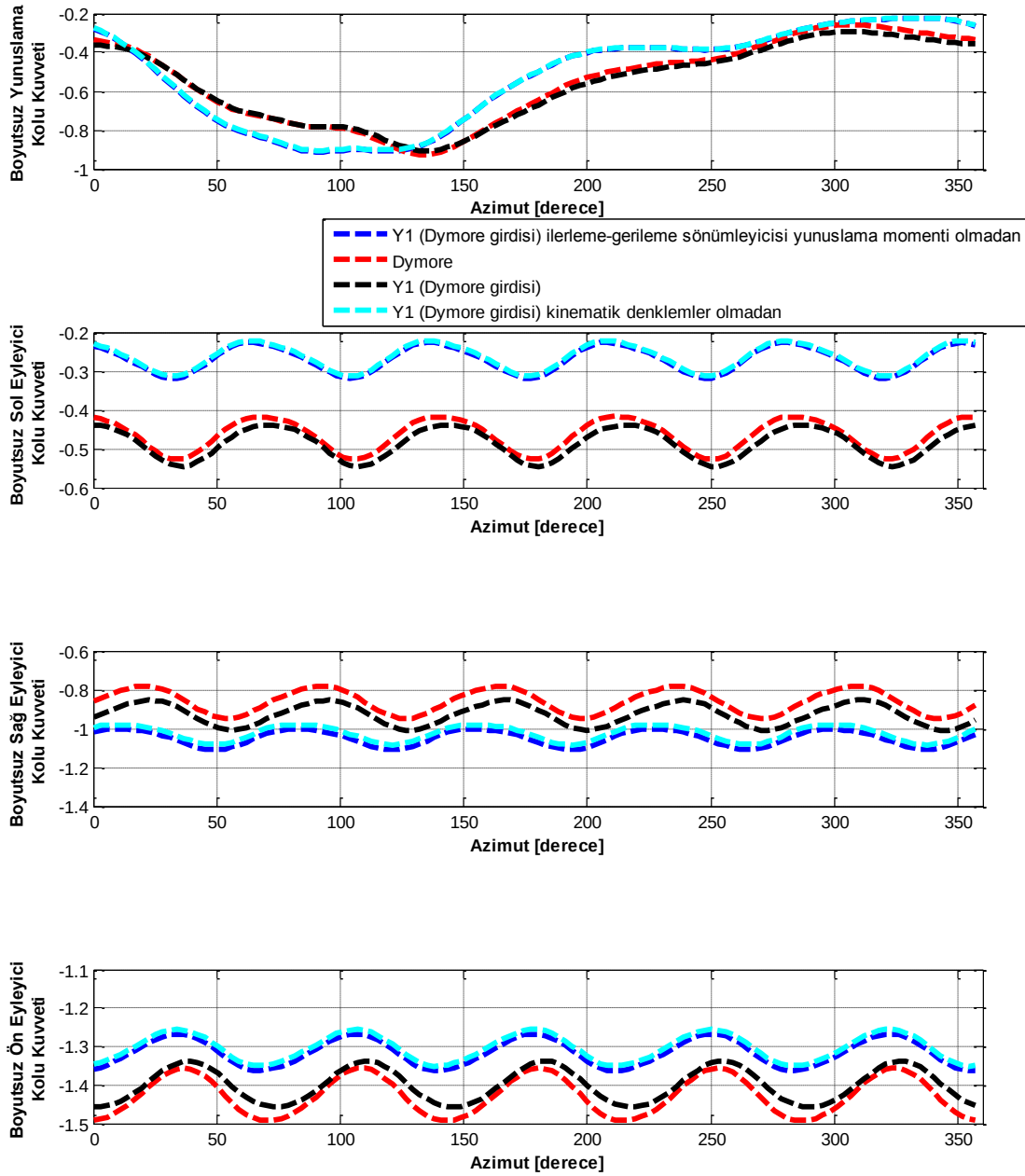
Y1 yazılımının doğrulanması için Dymore yazılımı [Bauchau, 2016] kullanılmıştır. Dymore yazılımı sayesinde detaylı rotor modeli oluşturabilmekte ve rotor bileşenleri üzerinde elastik etkiler de hesaplanarak yükler elde edilebilmektedir. Bu bildiride, bir askı (hover) koşulu ile ileri uçuş koşulu ($\mu = 0.32$) için Dymore'dan alınan pal yükleri ve pal açılarını kullanarak hatve çubuğu ve eyleyici kolları üzerindeki yükler hesaplandıktan sonra bu yükler yine Dymore'dan elde edilen yükler ile karşılaştırılmıştır.

UYGULAMALAR

Şekil 3 ve Şekil 4'de bahsedilen askı ($\mu = 0$) ve ileri uçuş ($\mu = 0.32$) koşulları için Dymore'dan elde edilen pal yükleri ve açılarının Y1 yazılımında girdi olarak kullanılmasıyla elde edilen ana rotor hatve çubuğu ve üç adet eyleyici kolu (sol, sağ ve ön) (Şekil 1) üzerindeki eksenel yükler sunulmuştur. Bu yükler, dört farklı yöntem ile oluşturulmuştur. Bu yöntemlerden birinde sadece Dymore yazılımı kullanılmıştır. Diğer üç yöntemde ise Dymore'dan alınan pal yükleri ve açıları Y1 yazılımında girdi olarak kullanılmıştır. Y1 yazılımının kullanıldığı üç yöntemden bir tanesinde pal üzerindeki bütün yunuslama momentleri ve bütün kinematik denklemler hesaba katılmıştır. Diğer iki yöntemin birinde ilerleme-gerileme sönümleyicisinin pal üzerinde yarattığı yunuslama momenti ($M_{x,ilerleme-gerileme\ sönümleyicisi}$) hesaplara dahil edilmezken diğerinde ise rotor bileşenlerinin arasındaki kinematik ilişkiler ihmal edilmiştir. Kinematik ilişkiler ihmal edildiğinde Denklem (4) çözülmemiştir ve Denklem (3)'de kullanılan moment kol uzunluğu sıfır kolektif ve devri hatve girdisinde oluşan uzunluktur. Ayrıca, yalpa tablası x_1 ve y_1 dönüşü ve z_1 hareketi yapmadığı için eyleyici kollarının üst noktası pallerin dönüşü sırasında hareketsiz durmaktadır ve Denklem Sistemi (5), (6), (7) buna bağlı olarak çözülmüştür.



Şekil 3: Askı ($\mu = 0$) Koşulu Ana Rotor Hatve Çubuğu ve Eyleyici Kolu Kuvvetleri Karşılaştırması



Şekil 4: $\mu = 0.32$ İleri Uçuş Koşulu Ana Rotor Hatve Çubuğu ve Eyleyici Kolu Kuvvetleri Karşılaştırması

Şekil 3 ve Şekil 4'de görülebileceği gibi, pal üzerindeki bütün yunuslama momentleri ve ilgili rotor bileşenleri arasındaki kinematik denklemleri hesaba katarak elde edilen Y1 sonuçları, Dymore sonuçları ile oldukça yakındır. Fakat ilerleme-gerileme sönümleyicisi veya kinematik denklemler hesaba katılmadığı zaman hatve çubuğu üzerinde çok farklı yükler elde edilmese bile eyleyici kolları üzerindeki yükler farklılık göstermektedir. Bunun sebeplerinden biri, hatve çubuğu üzerindeki eksenel yükteki ufak farklılıkların eyleyici kolları yükleri üzerinde daha büyük farklılıklara yol açabilme potansiyelidir [Tıraş, Gül, Gürak, Yaman, 2016] [Tao, Jianferg, Haowen, 2013]. Diğer sebep ise, hatve çubukları ve eyleyici kolları arasında yalpa tablası mekanizması bulunduğundan buradaki kinematik ilişkilerin sonuçlar üzerinde önemli olmasıdır.

Şekil 3 ve Şekil 4'den yapılabilecek başka bir çıkarım ise, ilerleme-gerileme sönümleyicisinin asıl görevi ilerleme-gerileme açılarını sönümlemek olsa bile sönümleyicinin pal üzerinde palin çırpma açısından kaynaklanan dikey kuvvet oluşturmaktan dolayı bir yunuslama momenti oluşturmaktadır. Bu momentin eyleyici kolları üzerinde önemli kuvvetler yarattığı gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Geliştirilen özgün yazılımdan elde edilen hatve kolu ve eyleyici kollarındaki eksenel kuvvetlerin, pal üzerindeki yunuslama momentlerinin tamamı ve ilgili kinematik denklemler hesaba katılınca, Dymore sonuçları ile oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, bu momentler belirlenirken yunuslama yönünde önemli bir moment üretmiyormuş gibi davranan ilerleme-gerileme sönümleyicisinin hesaplara dahil edilmesinin özellikle eyleyici kollarında önemli bir etki yarattığı saptanmıştır. Ayrıca hatve çubuğu üzerindeki eksenel yükü ve daha sonra bu kuvveti kullanarak eyleyici kollarındaki eksenel yükleri hesaplarken kullanılan kinematik denklemlerin de eyleyici kolları yüklerinin hesaplanmasında önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen bu yazılımın, Flightlab gibi hatve çubuğu ve eyleyici kollarını modellemeyen yazılımlarla birlikte de kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

Bauchau, O. A., *Simulation Tools for Flexible Multibody Systems*. www.dymoresolutions.com, 21.01.2016 tarihinde erişildi.

Smith, M. D., 1998. *Newton-Raphson Technique*. http://web.mit.edu/10.001/Web/Course_Notes/NLAE/node6.html, 26.07.2016 tarihinde erişildi.

Tıraş, H., Gül, S., Gürak, D., Yaman, Y., 2016. *Calculation of Pitch Link loads and Actuator Rod Loads by Using Blade Position and Blade Loads*, Vibrations in Rotating Machinery 11, Manchester, 13 Eylül – 15 Eylül.

Tao, S., Jianferg, T., Haowen, W., 2013. *Investigation of rotor control system loads*, Chinese Journal of Aeronautics, Beihang University.