

**HAFİF UÇAKLAR İÇİN
DÜZLEMSEL UÇUŞ KONTROL SİSTEMLERİNİN
KİNEMATİK SENTEZİ**

Yunus Akman

Tasarım ve Geliştirme Müdürlüğü, TAI, Türkiye Havacılık ve Uzay Sanayii, 06936, Ankara

Yavuz Yaman

Havacılık Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 06531, Ankara

Eres Söylemez

Makina Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 06531, Ankara.

ÖZ

Genel olarak ufak uçaklarda pilotun hareketleri direk olarak mekanik linklerle kumanda yüzeylerine iletilmektedir. Kokpitte yaratılan kumandalar hareketli kumanda yüzeylerine kablolar, kranklar ve itme-çekme çubukları vasıtasıyla aktarılmaktadır.

Bu makalede, hafif uçaklar için önerilen bir düzlemsel uçuş kontrol sistem mekanizmasının kinematik sentezi yapılmıştır. Basit bir sistem elde etmek amacıyla çalışmada dört çubuk mekanizmaları seçilmiştir. Dört nokta sentezinde analitik bir yöntem olan Bloch Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasını göstermek amacıyla irtifa dümeni kontrol sistemi seçilmiştir.

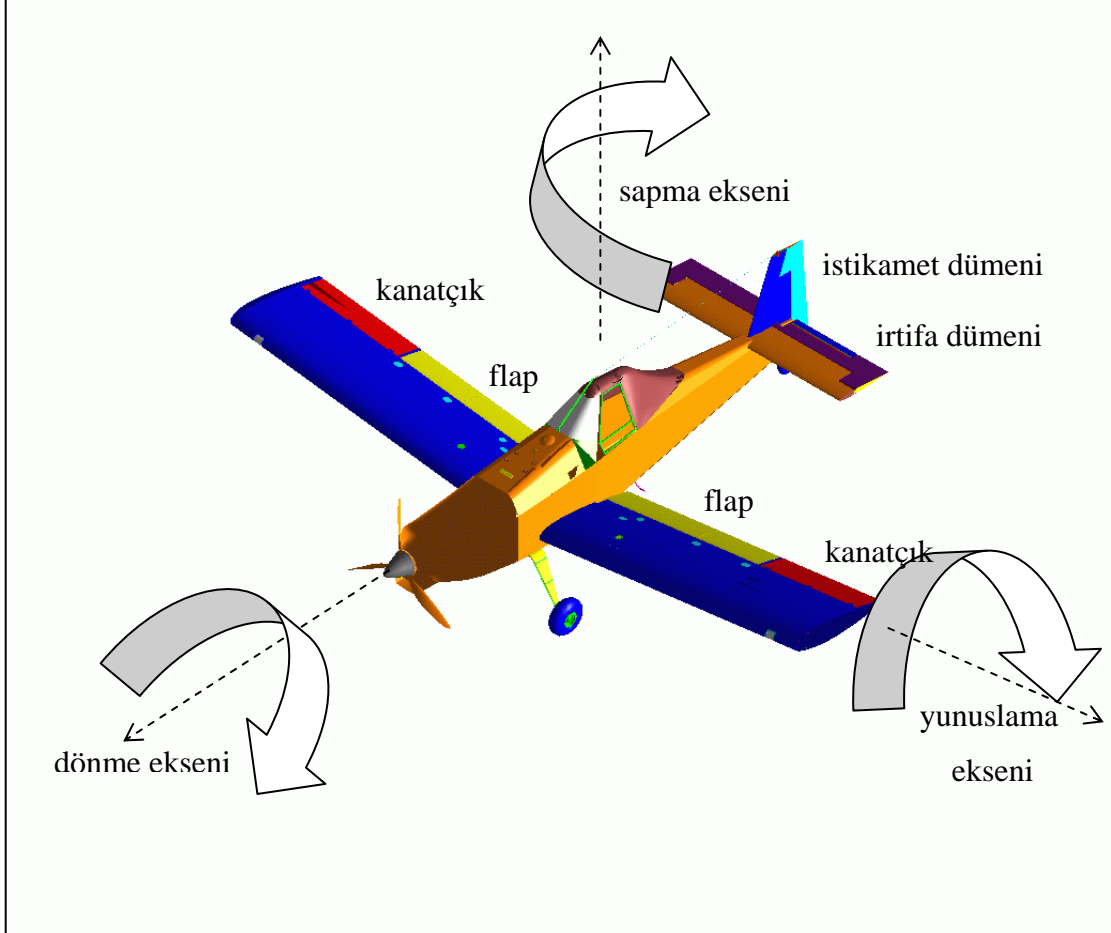
ABSTRACT

The control of light aircrafts is usually achieved by transmitting the pilot controls to the plane control surfaces through the means of mechanical links. Cables, cranks and push-pull rods are some of those mechanical links.

In this paper, kinematic synthesis of a planar flight control system mechanism has been conducted for a light aircraft. In order to achieve a simple construction, the four-bar linkages are used in the study. Bloch's Method is utilized for analytical four bar position synthesis. A case study involving an elevator flight control system is presented.

1.GİRİŞ

Uçaklardaki uçuş kontrol sistemleri birincil ve ikincil uçuş kontrol sistemleri (UKS) olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 1 hafif bir uçakta bulunan uçuş kontrol sistemlerini göstermektedir.



Şekil 1. Hafif Bir Uçağa Ait Uçuş Kontrol Sistemleri

Geleneksel birincil UKS, kanatçıklar (aileron), irtifa dümeni (elevator) ve istikamet dümeninden (rudder) oluşur. Bu kontrol sistemleri uçağı üç eksende kontrol etmek için kullanılmaktadır. Kanatçıklar levyenin sağa sola hareketiyle, irtifa dümeni levyenin ileri geri hareketiyle ve istikamet dümeni ise pedal hareketiyle kumanda edilmektedir.

Geleneksel ikincil UKS ise flaplar, irtifa ve istikamet trim sistemlerinden meydana gelmiştir. İrtifa ve istikamet trim sistemleri kokpitte bulunan bir tambur vasıtasıyla hareket ettirilmektedir. Flaplarde ise bir kumanda kolu bu amaçla kullanılmaktadır.

Kanatçıklar, irtifa ve istikamet dümenleri statik olarak dengelenmektedir. Bu işlemin yapılmaması kontrol yüzeylerindeki çirpınma (flutter) riskini arttırmaktadır.

Hafif uçaklarda, pilot kumanda yüzeylerine hareketi mekanik bağlar vasıtasıyla iletmektedir. Burada mekanik bağlar olarak tanımlananlar çelik kabloları, ara kolları, itme çekme çubuklarını ve tork tüplerini kapsamaktadır.

Mühendislerin yüz yüze kaldıkları büyük zorluklardan biri de mekanizma sentezidir [1]. Mekanizma sentezinde grafiksel yöntemler ya da analitik yöntemler tek başlarına kullanılabilir gibi, bir arada da kullanılabilirler. Grafik yöntemler çok hızlı olmasına karşın kullanıcının yeteneğinden ve çalışma toleranslarından çok etkilenmektedir. Analitik yöntemler ise gerek hız gerekse de hatalar konusunda her zaman grafik tekniklerden daha üstündür.

Sentez sırasında genelde her bağ rijit olarak kabul edilir. Bu bağlar uzamazlar, kısalırlar ya da burulmazlar. Hareket ne olursa olsun geometrik özellikleri hiç bir şekilde değişmez. Bu varsayım yanlış olmasına rağmen sentez yöntemini oldukça basitleştirdiği için kullanılmıştır. Ayrıca bu varsayımın sonucunda genelde belirgin hatalar oluşmamaktadır.

Bu çalışmada düzlemsel UKS mekanizmalarının dört nokta sentezinin temel prensipleri sunulmuştur. Çalışmanın temelini hareket denklemleri oluşturmaktadır. Bu çalışmalar bir irtifa dümeni sentezi yardımıyla açıklanmıştır.

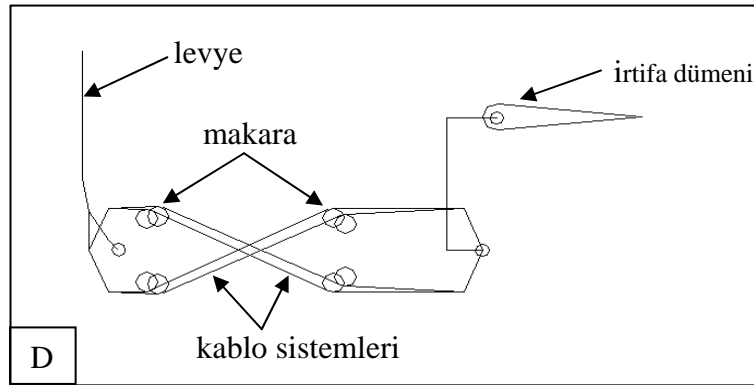
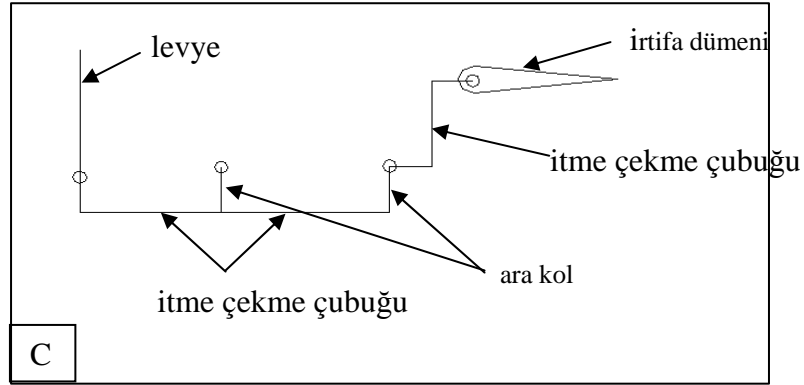
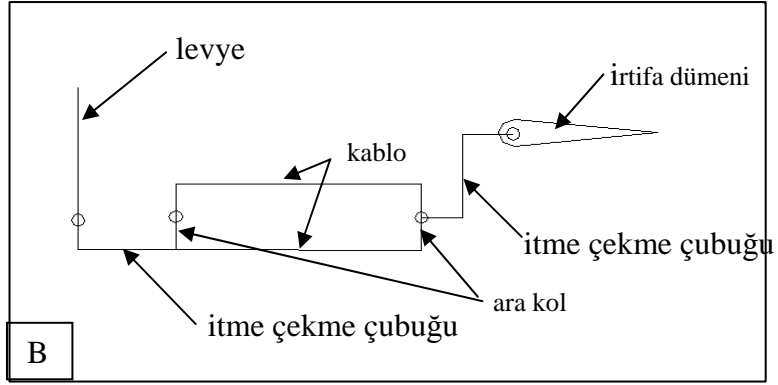
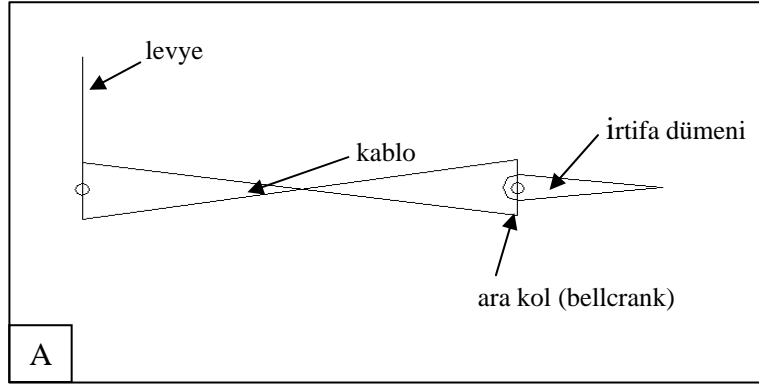
2. İRTİFA DÜMENİ UÇUŞ KONTROL SİSTEMİ

İrtifa dümeni UKS'ne ait farklı mekanizma tasarımları Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2.A' da kablolar birbirlerini kesmektedir. Kablolar birbirine dolaşmadığı sürece bu mekanizma kabul edilebilir. Şekil 2.B' de sunulan mekanizmada ise kabloların yanı sıra itme çekme çubukları da kullanılmaktadır. Şekil 2.C' de ise yalnızca itme çekme çubukları kullanılmıştır. Bu tür sistemler kablo kullanılan diğer sistemlere göre daha ağır olsalar da, sürtünme miktarları oldukça düşüktür. Şekil 2.D' de sunulan yedekli kablo sistemi FAR25 sertifikasyonu alacak uçaklar için gereklidir. FAR23 sertifikasyonunda ise yedeksiz UKS kabul edilmektedir.

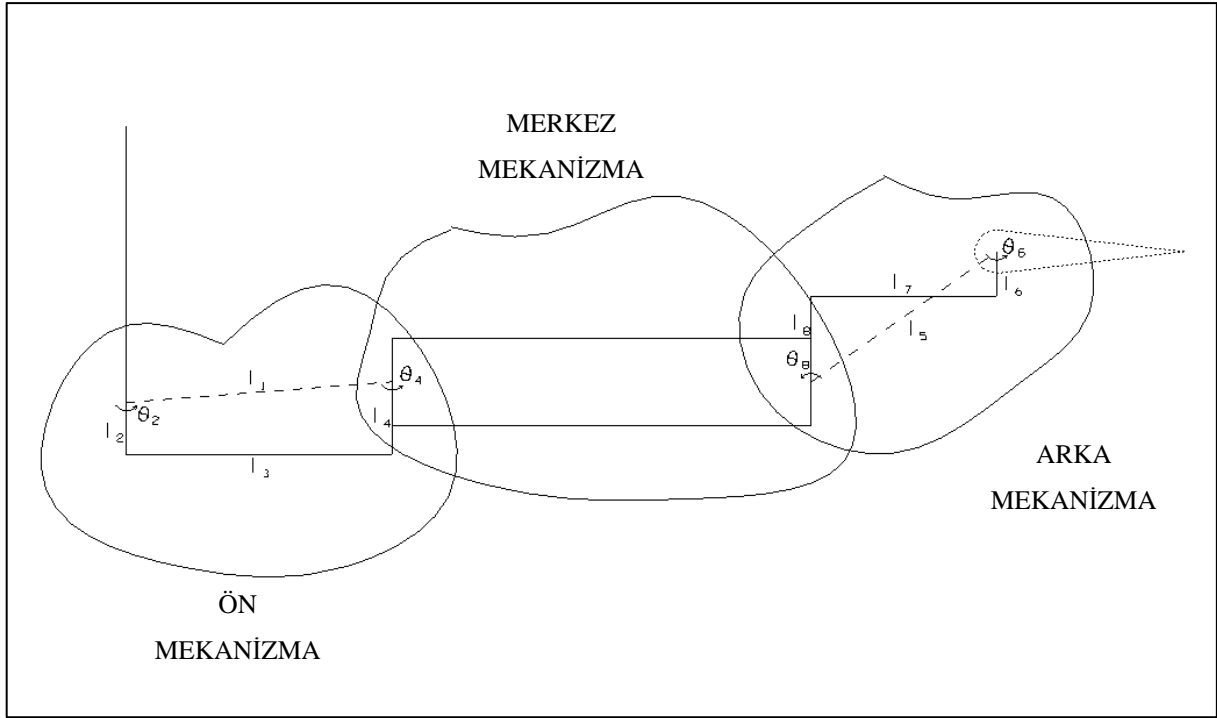
Bu çalışmada UKS için, aşağıdaki nedenlerden dolayı, Şekil 2.B' de sunulan mekanizma irtifa dümeni uygun bulunmuştur.

- a) Basitlik
- b) Üretim kolaylığı
- c) Bakım maliyeti düşüklüğü
- d) Ucuzluğu
- e) Makara kullanılmaması
- f) Kabloların birbirini kesmemesi

Seçilmiş olan mekanizma incelendiğinde, bu sistemin üç farklı dört çubuk mekanizmasından oluştuğu görülmektedir. Ön, merkez ve arka mekanizma olarak adlandırılan bu mekanizmalar Şekil 3' de gösterilmektedir.



Şekil 2. Olası İrtifa Dümeni UKS Mekanizmaları



Şekil 3. İrtifa Dümeni UKS Mekanizması

Sentezin amacı 14 derecelik levye hareketini, 21 derecelik irtifa kumanda yüzeyi hareketine çevirecek mekanizma elemanlarını belirlemektir. Bir başka deyişle amacımız, ön mekanizmadan verilen 14 derecelik girdiyi, arka mekanizmadan 21 derecelik çıktı olarak almamızı sağlayacak mekanizma sentezini yapmaktır.

Kablo uzamalarındaki problemleri en aza indirmek amacıyla merkez mekanizma paralel mekanizma olarak seçilmiştir.

Ön mekanizmadaki 14 derecelik bir sarkaç (rocker) açısına karşılık arka mekanizmadaki sarkaç açısı 21 derecedir. Merkez mekanizma paralel mekanizma seçildiği için geriye kalan sarkaç açıları aynıdır. Sentez sırasında bu değer 10 derece olarak seçilmiştir.

Modelleme sırasında “Quadratic Interpolation and Approximation” methodu [2] sağladığı basitlik yüzünden tercih edilmiştir. Üç noktadan (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) geçen ikinci dereceden $y = f(x)$ fonksiyonu aşağıda verilen formülden bulunabilir.

$$f(x) = y_0 \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + y_1 \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + y_2 \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (1)$$

Ön mekanizma tasarımı sırasında aşağıda verilen açı limitleri kullanılmıştır.

$$-14^\circ \leq \theta_2 \leq 14^\circ$$

$$-10^\circ \leq \theta_4 \leq 10^\circ$$

Verilen limit pozisyonlar (-14,-10) ile (14,10), ve nötral pozisyon (0,0) (1) numaralı denkleme uygulandığında, ön mekanizmanın modeli

$$f_f(x) = \frac{5}{7}x \quad (2)$$

olarak belirlenmiştir. Aynı yaklaşımla, arka mekanizmanın tasarımı sırasında aşağıda verilen limit açılar kullanılmıştır:

$$\begin{aligned} -10^\circ &\leq \theta_8 \leq 10^\circ \\ -21^\circ &\leq \theta_6 \leq 21^\circ \end{aligned}$$

Bu durum için belirlenen limit pozisyonlar ve nötral pozisyon (1) numaralı denkleme konulduğunda, arka mekanizmanın modeli

$$f_a(x) = \frac{21}{10}x \quad (3)$$

olarak bulunmuştur. (2) ve (3) numaralı denklemler hassasiyet noktaları hesaplanması için önemlidir. Limit açılar aynı kalmak şartıyla, her hangi bir fonksiyon kullanılabilir. Bu şekilde farklı uçuş kontrol sistemlerini sağlayan mekanizmalara ulaşılabilir.

2.1 Dört Hassasiyet Noktalı Mekanizma Sentezi

Dört hassasiyet noktalı mekanizma sentezinde bir analitik yöntem olan Bloch yöntemi kullanılmıştır [3]. Bu yöntem aşağıda verilmekte olan denklemlerin çözümüne dayanmaktadır.

$$z_2 + z_3 - z_4 = -1$$

$$z_2 e^{ip_2} + z_3 e^{iq_2} - z_4 e^{ir_2} = -1$$

$$z_2 e^{ip_3} + z_3 e^{iq_3} - z_4 e^{ir_3} = -1$$

$$z_2 e^{ip_4} + z_3 e^{iq_4} - z_4 e^{ir_4} = -1$$

$$p_m = \theta_2^{1m}, q_m = \theta_3^{1m}, r_m = \theta_4^{1m}, m = 1,2,3,4$$

$$|z_2| = \frac{l_2}{l_1} |z_3| = \frac{l_3}{l_1} |z_4| = \frac{l_4}{l_1}$$

(4) numaralı denklemde verilen dört denklemin sağlanabilmesi için q_2 , q_3 ve q_4 parametreleri serbest olarak seçilemez. Bunlardan sadece bir tanesi serbest olarak seçilebilir, diğer iki tanesi ise uyumluluk koşullarından faydalanılarak bulunmalıdır.

(4) numaralı denklem, bir matris denklemi biçiminde, aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$[A][x] = [0] \quad (5)$$

Denklemde verilen matris ve vektör aşağıdaki denklemlerde verildiği gibidir.

$$[A] = \begin{bmatrix} (1 - e^{ip_2}) & (1 - e^{iq_2}) & (1 - e^{ir_2}) \\ (1 - e^{ip_3}) & (1 - e^{iq_3}) & (1 - e^{ir_3}) \\ (1 - e^{ip_4}) & (1 - e^{iq_4}) & (1 - e^{ir_4}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[x] = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bu çalışmada q_2 parametresi serbest olarak seçilmiştir. Sonuçta sağlanması gereken uyumluluk koşulu ise şu şekilde ifade edilebilir :

$$\begin{vmatrix} (1 - e^{ip_2}) & (1 - e^{iq_2}) & (1 - e^{ir_2}) \\ (1 - e^{ip_3}) & (1 - e^{iq_3}) & (1 - e^{ir_3}) \\ (1 - e^{ip_4}) & (1 - e^{iq_4}) & (1 - e^{ir_4}) \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

(8) numaralı denklem bir kompleks yada iki reel denklem vermektedir. q_3 ve q_4 parametreleri bunların çözümüyle bulunacaktır. Bulunan bu değerler (4) numaralı denklemlere konduğunda, z_2 , z_3 ve z_4 değerleri hesaplanabilir.

Hassasiyet noktalarının hesabında Chebyshev yöntemi kullanılmıştır. Dört hassasiyet noktası sentezi için Chebyshev denklemi aşağıda verildiği gibidir [4]:

$$x_i = \frac{x_{fin} + x_{in}}{2} - \frac{x_{fin} - x_{in}}{2} * \cos(22.5 * (2i - 1)) \quad (9)$$

Denklem (9) ile birlikte $-14^\circ \leq \theta_4 \leq 14^\circ$ ve $-10^\circ \leq \theta_2 \leq 10^\circ$ açı limitlerinin uygulanmasıyla bulunan ön mekanizma hassasiyet noktaları Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. İrtifa Dümeni Ön Mekanizma Hassasiyet Noktaları

θ_2	-12.9343°	-5.3576°	5.3576°	12.9343°
θ_4	-9.2388°	-3.8269°	3.8269°	9.2388°

Bulunan hassasiyet noktaları (4) numaralı denkleme konulduğunda, çözümün ardından aşağıda verilen mekanizma eleman boyutlarına ulaşılmaktadır.

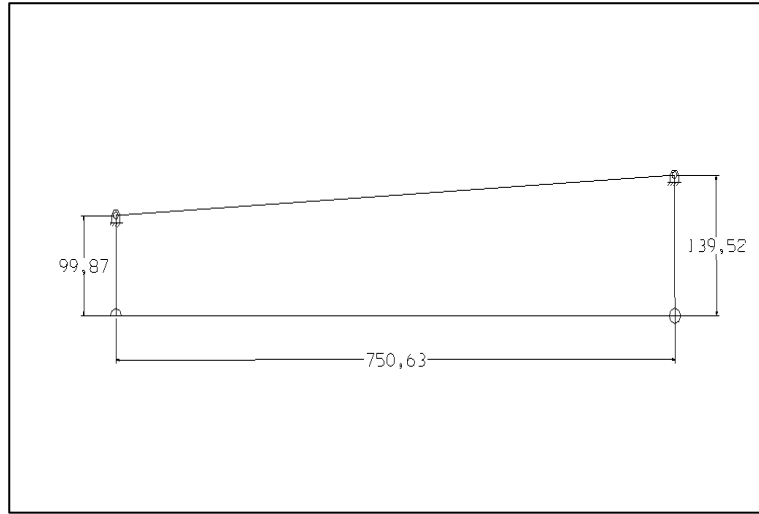
$$l_1 = 751.07 \text{ [mm]}$$

$$l_2 = 99.87 \text{ [mm]}$$

$$l_3 = 750.63 \text{ [mm]}$$

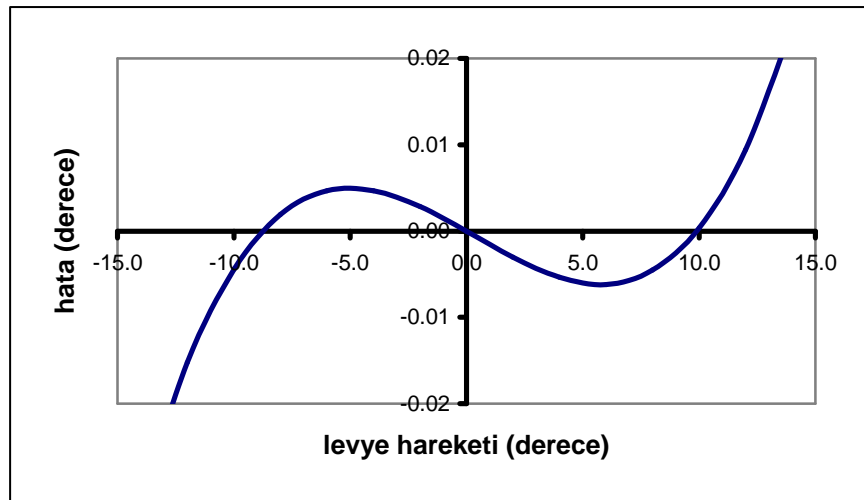
$$l_4 = 139.52 \text{ [mm]}$$

Şekil 4' de sentez sonucu elde edilen irtifa dümeni UKS ön mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 4. İrtifa Dümeni UKS Ön Mekanizması

Sentez sonucu elde edilen mekanizma ile istenen mekanizma arasında oluşan hatalar levye hareketinin bir fonksiyonu olarak Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 5. İrtifa Dümeni Ön Mekanizma Sentezi Sonucu Oluşan Hata

Arka dört çubuk mekanizmasında da aynı yöntem, $-21^\circ \leq \theta_6 \leq 21^\circ$ ve $-10^\circ \leq \theta_8 \leq 10^\circ$ açı limitleri için uygulanmış ve bulunan hassasiyet noktaları Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. İrtifa Dümeni Arka Mekanizma Hassasiyet Noktaları

θ_8	-9.2388°	-3.8269°	3.8269°	9.2388°
θ_6	-19.4015°	-8.0365°	8.0365°	19.4015°

Bulunan hassasiyet noktaları (4) numaralı denkleme konulmuş ve aşağıda verilen arka mekanizma eleman boyutları elde edilmiştir.

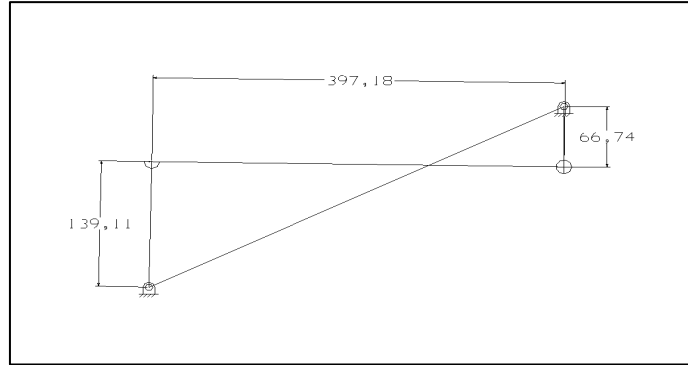
$$l_5 = 447.21 \text{ [mm]}$$

$$l_6 = 66.74 \text{ [mm]}$$

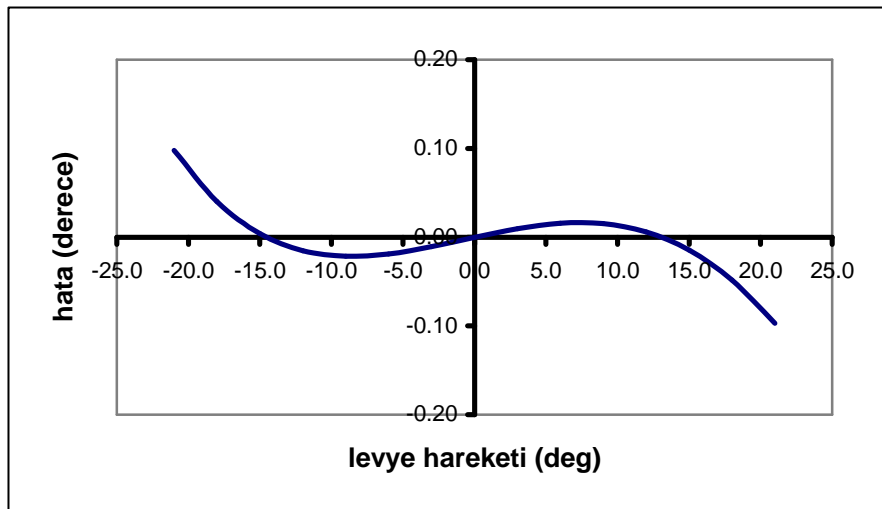
$$l_7 = 397.18 \text{ [mm]}$$

$$l_8 = 139.11 \text{ [mm]}$$

Şekil 6 sentez sonucu elde edilen irtifa dümeni UKS arka dört çubuk mekanizmasını, Şekil 7 ise oluşan hataların levye hareketinin fonksiyonu olarak değerlerini göstermektedir.



Şekil 6. İrtifa Dümeni UKS Arka Mekanizması



Şekil 7. İrtifa Dümeni Arka Mekanizma Sentezi Sonucu Oluşan Hata

3.TARTIŞMA

Bu çalışmada hafif uçaklar için önerilen bir düzlemsel uçuş kontrol sistemi incelenmiş ve buna uygun bir mekanizmanın sentezi yapılmıştır. Sentez sırasında analitik bir yöntem olan Bloch yöntemi uygulanmıştır. Sentez sonucu ortaya çıkan hataları azaltmak amacıyla hassasiyet noktaları bulunurken Chebyshev yöntemi kullanılmıştır. Yaklaşım bir irtifa dümeni uçuş kontrol sistemi üzerinde gösterilmiştir. İrtifa dümeni uçuş kontrol sistemi, limit çalışma açıları temel alınarak sentezlenmiş ve mekanizma elemanlarının boyutları belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar yeterli görünse de, hataların irdelenmesi yapılan işlemlerin bir iyileştirme (optimizasyon) sonucu daha da uygun sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Bu konudaki çalışmalar sürmektedir.

SİMGELER

- θ_2 Sarkaç Açısı [$^\circ$]
- θ_3 Biyel (Coupler) Açısı [$^\circ$]
- θ_4 Sarkaç Açısı [$^\circ$]
- θ_6 Sarkaç Açısı [$^\circ$]
- θ_8 Sarkaç Açısı [$^\circ$]
- l_1 Sabit Bağ Uzunluğu [mm]
- l_2 Sarkaç Bağ Uzunluğu [mm]
- l_3 Biyel Bağ Uzunluğu [mm]
- l_4 Sarkaç Bağ Uzunluğu [mm]
- l_5 Sabit Bağ Uzunluğu[mm]
- l_6 Sarkaç Bağ Uzunluğu[mm]
- l_7 Biyel Bağ Uzunluğu[mm]
- l_8 Sarkaç Bağ Uzunluğu[mm]
- p, q, r Değişkenler

KAYNAKLAR

1. Söylemez, E., 1999, Mechanisms, 3rd Edition, METU Press, Ankara, Türkiye
2. Aşkar, A., 1987, Methods in Applied Algebra and Analysis, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye.
3. Mallik, A.K., Ghosh, A. and Dittrich, G., 1994, Kinematic Analysis and Synthesis of Mechanisms, CRC Press.
4. Grosjean, J., 1991, Kinematics and Dynamics of Mechanisms, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited