

Paraşüt-Yük Sistemlerinin Dinamik Modellenmesi ve Yol-Nokta Takibi

Dynamic Modeling of Parachute-Payload Systems and Automatic Waypoint Tracking

Gönenç Gürsoy¹, İlkey Yavrucuk²

¹ Aerotim Mühendislik Ltd. Şti., ODTÜ Teknokent, 06800, Ankara
gursoy@aerotim.com.tr

² Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800, Ankara
yavrucuk@metu.edu.tr

Özet

Bir faydalı yükün istenen bir hedef noktaya paraşüt yardımıyla kontrollü düşürülmesi zor bir problem olarak bilinmektedir. Bu çalışmada paraşüt-yük sistemleri için geliştirdiğimiz simülasyon modeli ve nokta izler navigasyon algoritması anlatılmıştır. Geliştirilen algoritma paraşüt-yük sistemini, önceden tanımlanmış noktalar arasında sürme kabiliyetine sahiptir. Simülasyon sonuçları rüzgarlı ve rüzgarsız durumlar için sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Paraşüt, yük, nokta izler, navigasyon

Abstract

Aerial delivery of a payload to a desired location is known to be a challenging problem. In this paper we develop a simulation model and a waypoint navigation algorithm for a parachute-payload system. Developed algorithm is capable of driving the parachute between predefined waypoints. Simulation results showing various waypoint navigation scenarios are presented.

Keywords: Parachute, payload, waypoint tracking, navigation

1. Giriş

Paraşüt kullanarak bir faydalı yükün belli bir hedef yol-noktaya otomatik olarak yönlendirilmesinin türlü askeri uygulamaları mevcuttur. Paraşüt-yük sistemleri için bir yol-nokta kontrolcüsünün hazırlanmasında, iyi bir aerodinamik modele ve sistem dinamiğinin anlaşılmasına ihtiyaç vardır. Bu makalede böyle bir paraşüt-yük sisteminin modellenmesi ve daha sonra ilgili kontrol sisteminin hazırlanıp, simülasyonlarının yapılması anlatılmaktadır.

Literatürde paraşüt-yük sistemlerinin hedef koordinata yönlendirilmesi konusunu içeren çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Örneğin [1]'de paraşüt-yük sisteminin 'T' şeklinde dağıtılan yol-noktaları otomatik bir şekilde takip etmesi amaçlanmıştır. Klasik kontrol yöntemleri hedef yol-noktalara olan uzaklığı azaltmak amacı ile kullanılmıştır. [2]'de hedef noktalara gidebilmek için çevrim içi hedef yol tayinleri yapılmış, paraşütün hedef yoldan saptığı durumlarda yeni hedef yol-noktaları otomatik olarak oluşturulmuştur. Kontrol algoritmasında lineer olmayan kontrol yöntemleri uygulanmıştır. [3]'te düşük maliyetli navigasyon ve kontrol sistemleri üzerine odaklanılmış, GPS ve hız ölçümlerini kullanan düşük maliyetli sistem tasarımı sunulmuştur. Paraşüt-yük sistemlerinin kontrolünü kolaylaştıran kararlık artırma yöntemi ise [4]'te sunulmuştur.

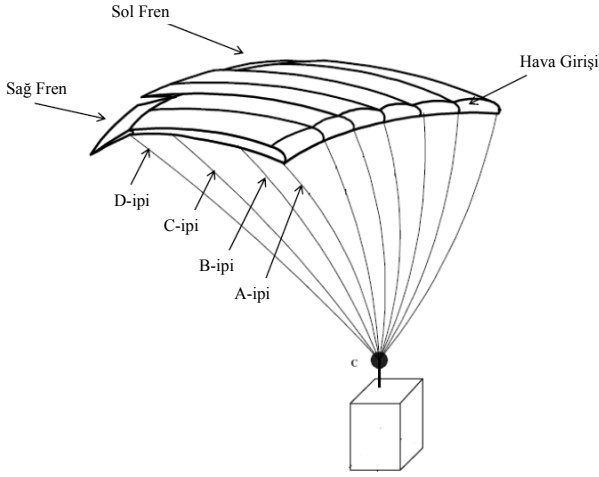
Paraşüt-yük sistemlerinin dinamik modellenmesi konusu ise [5,6,7,8]'de anlatılmaktadır. Paraşüt-yük sistemleri genel olarak 6 serbestlik derecesinden 12-15 serbestlik derecelerine kadar modellenebilmektedir. Ancak, 8 yada 9 serbestlik dereceli modellerin, kontrol sistemi tasarımı için yeterli uygunluk seviyesinde olduğu bu çalışmalarda değerlendirilmiştir.

Bu makale iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda literatürde mevcut olan bir paraşüt-yük sisteminin genel özellikleri verilip 9 serbestlik dereceli paraşüt-yük sistemi dinamik modeli kısaca anlatılmıştır. İkinci kısımda ise oluşturulan model kullanılarak sistemin, istenen nokta koordinatlara gitmesini sağlayacak kontrol algoritması anlatılmıştır. Sunulan algoritma rüzgarlı ve rüzgarsız durumlar için simüle edilmiş, sonuçlar gösterilmiştir.

2. Paraşüt-Yük Sistemi Dinamik Modeli

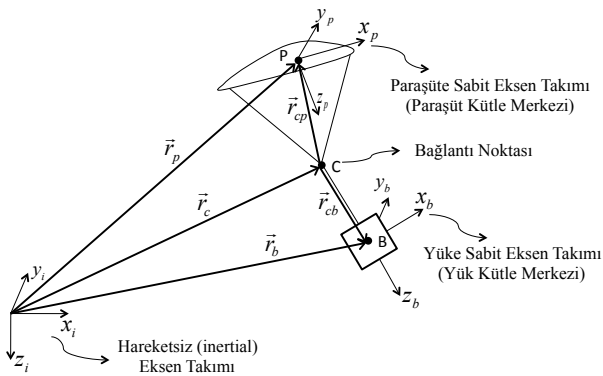
Tipik bir paraşüt-yük sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu tip paraşüt-yük sistemlerinde sistemin temel kontrolü, paraşüte ait olan sol ve sağ frenlerin kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Bu frenler simetrik olarak çekilince (D ipleri kullanılarak) boylamsal bir hareket, asimetrik çekilince ise yanal bir hareket olmaktadır. Bu iki girdi tipi kullanılarak paraşüt-yük sistemleri kontrol edilebilmektedir. A-B-C ipleri sadece yapısal olarak sistemin bütünlüğünü sağlamaktadır.

Şekil 2’de paraşüt-yük sisteminin yandan görünüşü verilmiştir. Bu sistemin modellenmesinde, Şekil 2’deki B noktasının (yükün kütle merkezi) C noktasına (bağlantı noktası) göre her zaman sabit uzaklıkta olduğu varsayılmaktadır. Aynı zamanda P noktası (Paraşüt kütle merkezi) da C noktasında göre sabit uzaklıktadır. Dolayısıyla iplerde oluşacak olası uzunluk değişiklikleri ihmal edilmektedir.



Şekil 1: Tipik Paraşüt-Yük Sistemi [7]

Matematiksel modelleme için sistemin serbestlik derecelerinin belirlenmesi gereklidir. Şekil 2’deki sisteme bakıldığında yükün, bağlantı noktasına göre 3 eksende açılabilir hareket edebileceği düşünülebilir. Aynı zamanda paraşüt de bağlantı noktasına göre üç eksende açılabilir hareket edebilir. Bu durum 6 serbestlik derecesini oluşturur. Bunun yanında, bağlantı noktasının da hareketsiz (inertial) eksen takımında üç eksende lineer hareket edeceği düşünülürse, toplamda dokuz serbestlik dereceli paraşüt-yük dinamik modeli oluşturulmuş olur. Referanslar [5,6,7,8]’de dokuz serbestlik dereceli matematik modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmada [5]’teki paraşüt-yük modeli üzerinde durulmuştur.



Şekil 2: Paraşüt-Yük Sistemi Koordinat Sistemleri

Şekil 2’de gösterilen Paraşüt-yük sistemi Newton’un ikinci yasası kullanılarak modellenebilir. Oluşturulacak hareket denklemleri Denklem (1)’deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} (M_p + M_F)T_p & -(M_p + M_F)R_{cp} & 0 & -T_p \\ 0 & I_p + I_F & 0 & R_{cp}T_p \\ & M_bT_b & 0 & -M_bR_{cb} & T_b \\ 0 & 0 & 0 & I_b & -R_{cb}T_b \\ F_A^p + W^p - (M_p + M_F)\Omega_p\Omega_p X_{cp} - \Omega_p M_F(T_p V_c + \Omega_p X_{cp}) \\ M_A^p - T_p T_p^T M_c - \Omega_p(I_p + I_F)\omega_p - \Xi_p M_F V_p \\ F_A^b + W^b - M_b\Omega_b\Omega_b X_{cb} \\ M_c - \Omega_b I_b \omega_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_c \\ \dot{\omega}_b \\ \dot{\omega}_p \\ F_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{F_a^p} S_{M_a^p} \\ \delta_a \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

Denklem (1)’de $[\dot{V}_c \dot{\omega}_b \dot{\omega}_p F_R]^T$ vektörü bilinmeyen olup zamana bağlı çözdürülmesi gereken durum değişkenlerini taşır. Burada \dot{V}_c bağlantı noktasının hareketsiz eksen takımına (Şekil 2) göre üç eksende ivmelerini, $\dot{\omega}_b$ yükün bağlantı noktasına göre üç eksende açılabilir ivmelerini, $\dot{\omega}_p$ paraşütün bağlantı noktasına göre üç eksende açılabilir ivmelerini ve F_R ise bağlantı noktasındaki reaksiyon kuvvet ve momentlerini temsil eder. $[\delta_a \delta_s]^T$ ise sistemin asimmetrik (δ_a) ve simetrik girdilerini (δ_s) temsil eden vektördür.

Denklem (1)’in en genel hali Denklem (2)’de, aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A \begin{bmatrix} \dot{V}_c \\ \dot{\omega}_b \\ \dot{\omega}_p \\ F_R \end{bmatrix} = B + S \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

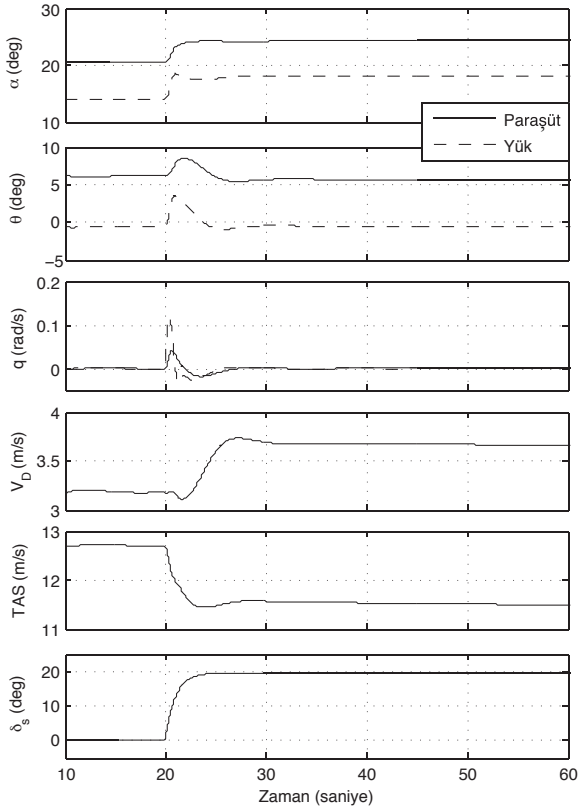
Burada A matrisi, Denklem (1)’den de görülebileceği gibi, geometrik, ataletsel ve açılabilir bilinenlerin bulunduğu her simülasyon adımında bilinen matristir. B matrisi ise aerodinamik kuvvet ve momentlerin modellendiği, görünür kütle etkisinin modellendiği yine bilinenlerden oluşan matristir. $S = [S_{F_a^p} S_{M_a^p}]$ vektörü ise kontrol girdilerinin aerodinamik modelini oluşturan vektördür.

Denklem (1), $[\dot{V}_c \dot{\omega}_b \dot{\omega}_p F_R]^T$ vektörü için zamana bağlı çözdürülüp, sistemin farklı $[\delta_a \delta_s]^T$ girdilerine verdiği açık çevrim cevapları görülebilir. Denklem (1)’in detayları [5]’te mevcuttur. Paraşütün ve yükün geometrisi, eylemsizlik bilgileri ve aerodinamik modeli [5]’teki değerler ile aynı seçilmiştir. Seçilen paraşüt ve yük sistemine ait geometrik bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Paraşüt-Yük Sistemine Ait Geometrik Bilgiler

	Yük	Paraşüt
Kütle (kg)	135	13
Geometri (m)	0.5x0.5x0.5	7x3x0.3
Yüzey Alanı (m x m)	0.5	21
Bağlantı Noktasına Uzaklık (m)	0.5	7.5

Geliştirilen matematik modelin simetrik girdiye verdiği cevap Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te yukarıdan aşağıya, paraşüt ve yükün hücum açıları, yunuslama açıları, yunuslama hızları, bağlantı noktasının dikey hızı, bağlantı noktasının gerçek hızı ve simetrik paraşüt girdisi gösterilmiştir. Uygulanan 20 derecelik simetrik frenleme (girdi) paraşüt-yük sisteminin yeni bir hücum açısı, dikey hız ve ileri hızda dengeye ulaşmasına sebep olmuştur.



Şekil 3: Paraşüt-Yük Sisteminin Simetrik Girdiye Verdiği Açık Çevrim Cevabı

Sistemin asimetrik girdiye verdiği cevap ise Şekil 4'te sunulmuştur. Asimetrik frenler her iki yöne sırayla uygulanmıştır. Şekil 4'te sırasıyla Paraşüt-yük sisteminin yatış açısı, baş açısı, yatış ve yalpalama hızları, yana kayış açısı ve asimetrik fren girdisi gösterilmiştir. Paraşüt-yük sistemi 50. saniyeden sonra tekrar dengeye ulaşmaktadır.

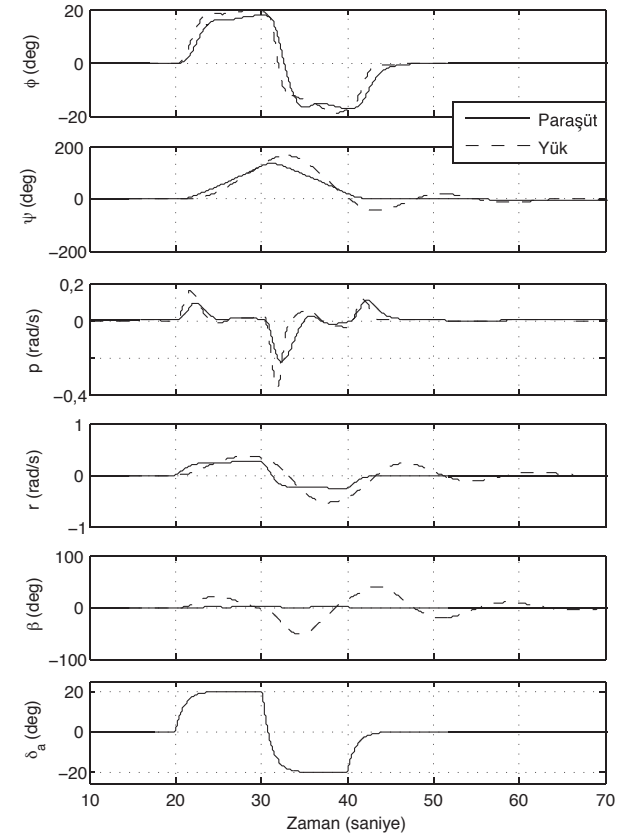
Şekil 3 ve 4'te sistemin boylamsal ve yanal girdiler kullanılarak sürülebildiği görülmektedir. Verilen girdilere karşılık sistem yeni denge noktalarına yakınsamıştır.

3. Paraşüt-Yük Sistemi Yol-Nokta Kontrolü

Paraşüt yük sisteminin kontrol edilebilmesi için, öncelikle, sistemin koordinat bilgisinin bilinmesi gereklidir. Bu çalışmada paraşüt-yük sisteminin koordinat bilgisi her simülasyon anında model yardımıyla hesaplanmaktadır. Gerçek uygulamalarda ise GPS kullanılarak bu bilgiye ulaşılabilir. İkinci olarak, paraşüt-yük sisteminin iki nokta arasında sürülmesine olanak sağlayacak olan baş açısı bilgisi

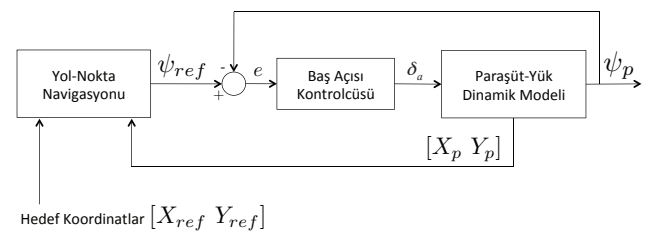
bilinmelidir. Bu çalışmada sistemin baş açısı her simülasyon anında model yardımıyla hesaplanmaktadır. Gerçek uygulamalarda ise kumpas (gyro-compass) kullanılarak bu bilgi elde edilebilir.

Sistemin pozisyonu ve baş açısı bilgileri bilindikten sonra Şekil 5'teki gibi bir otopilot algoritması kullanılarak hedef



Şekil 4: Paraşüt-Yük Sisteminin Asimetrik Girdiye Verdiği Açık Çevrim Cevabı

noktalara paraşüt sürülebilir. Şekil 5'te sunulan algoritmada, paraşüt-yük sistemini hedef koordinatlara, $[X_{ref} Y_{ref}]$, götüreceği gerekli baş açısı, ψ_{ref} , yol-nokta navigasyonu (waypoint navigation) bloğunda hesaplanmaktadır. Gerekli baş açısı hesaplandıktan sonra ise, baş açısı kontrolcüsüne ψ_{ref} referansı gönderilmekte, paraşütün baş açısının bu referansa sürülmesi amaçlanmaktadır. Bu makalede Şekil 5'te sunulan algoritma hedef koordinatlara ulaşmak için kullanılmıştır.



Şekil 5: Yol-Nokta Takip Algoritması Blok Diyagramı

3.1. Baş Açısı Kontrolcüsü

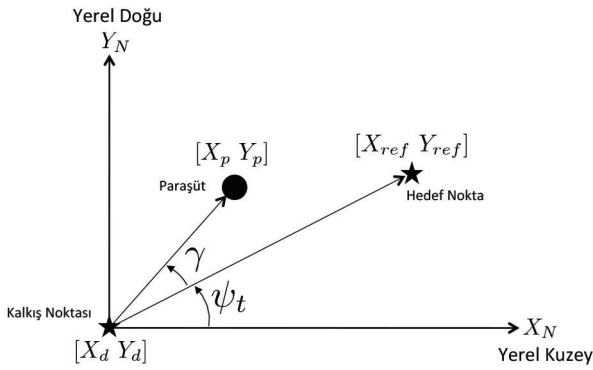
Yukarıda verilen algoritmanın doğru çalışabilmesi, ψ_{ref} sinyalinin doğru hesaplanmasını gerektirmektedir. Şekil 6'da yerel kuzey ve doğu eksenleri, kalkış ve hedef noktaları, paraşüt lokasyonu ve ψ_{ref} sinyalinin hesabı için gerekli açılar gösterilmiştir. Kalkış noktasından hedef noktasına gidebilmek, ideal-rüzgarsız bir ortamda, paraşütün baş açısını (ψ_p), hedef noktanın sapma açısına (ψ_t) sürerek gerçekleştirilebilir. Bu durum aşağıdaki kontrol kuralına tekabül eder:

$$\delta_a = K_p(\psi_t - \psi_p) \quad (3)$$

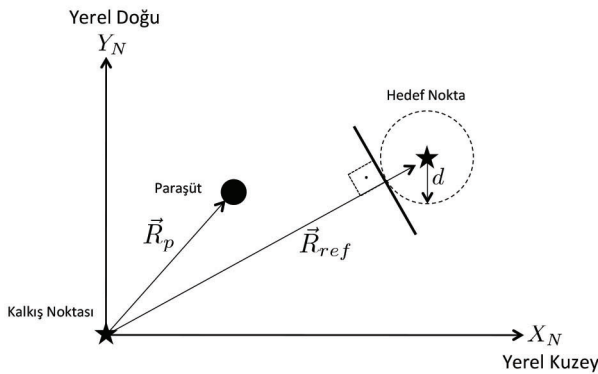
Ancak Denklem (3)'te verilen kontrol kuralı ideal olmayan (rüzgarlı) ortamda oluşabilecek sapma açlarına (γ) karşı yetersiz olabilecektir. Bu durum, ψ_t sinyalinin γ açısı kullanılarak güncellenmesini gerektirmektedir. Denklem (3) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\delta_a = K_p((\psi_t - K_\gamma \gamma) - \psi_p) \quad (4)$$

Denklem (4)'te, $(\psi_t - K_\gamma \gamma)$, baş açısı referansını, $((\psi_t - K_\gamma \gamma) - \psi_p)$ ise Şekil 5'te gösterilen ve kontrolcü girdisi olan hata sinyalini, e , temsil etmektedir. Türev ve integral kontrolcülerini de Denklem (4)'e eklenebilir. Denklem (4), Şekil 5'te gösterilen baş açısı kontrolcüsünü temsil etmektedir.



Şekil 6: Açılar, Eksenler ve Koordinatlar

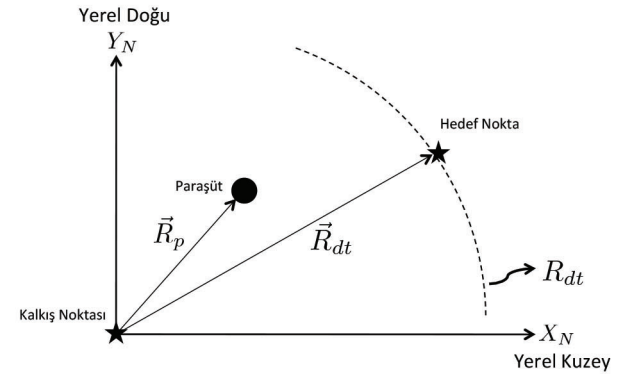


Şekil 7: Nokta Güncelleme Kriteri-1

3.2. Yol-Nokta Navigasyonu

Yol-Nokta navigasyon bloğu temel olarak iki farklı işlevi yerine getirmektedir. İşlevlerden birincisi hedef ve kalkış koordinatlarını kullanarak Şekil 6'da tanımlanan açılar hesaplayıp, ψ_{ref} açısını oluşturmaktır. İkinci işlev ise nokta güncelleme kriterlerini kullanarak noktalara varıldığı veya noktaların kaçırıldığı tespit etmek, ve bu gibi durumlarda hedefe ulaşabilmek için gerekli yeni noktalar tayin etmektir. Birinci işlev, koordinatlar bilindiği takdirde geometri kullanılarak kolayca yerine getirilebilir. İkinci işlev ise doğru kriterlerin kullanımına bağlıdır. Bu bölümde bu çalışma için geliştirilen nokta güncelleme kriterleri anlatılmaktadır.

Bu makalede iki farklı kriter (kural) kullanılarak paraşüt-yük sisteminin hedef noktalara götürülebildiği gösterilmiştir. İlk kriter, hedef noktaya ulaşıldığı anlamaya yarayan kuraldır. Bu kural, paraşüt ile hedef nokta arasındaki mesafe belli bir değerden küçük olduğunda bir sonraki noktanın hedef yapılması şeklinde tanımlanabilir. Bu güncelleme kriteri, $|\vec{R}_p - \vec{R}_{ref}| < d$ olarak Şekil 7'de tanımlanmıştır. Bu koşul sağlandığında ise bir sonraki geçilmesi istenen nokta, hedef nokta yapılmaktadır.



Şekil 8: Nokta Güncelleme Kriteri-2

Özellikle, değişken rüzgara sahip hava koşullarında türlü sebeplerle paraşütün hedef noktayı kaçırması olasıdır. Böyle durumlar için bir başka güncelleme kriterinin kullanılması gereklidir. İkinci kriter olarak paraşüt ile kalkış noktası arasındaki mesafe ($|\vec{R}_p|$), hedef noktası ile kalkış noktası arasındaki mesafeden ($|\vec{R}_{dt}|$) büyük olduğunda yeni bir kalkış noktasının tayin edilmesi şeklinde kurulabilir. Bu kriter, Şekil 8'de $|\vec{R}_p| > |\vec{R}_{dt}|$ olarak gösterilmiştir.

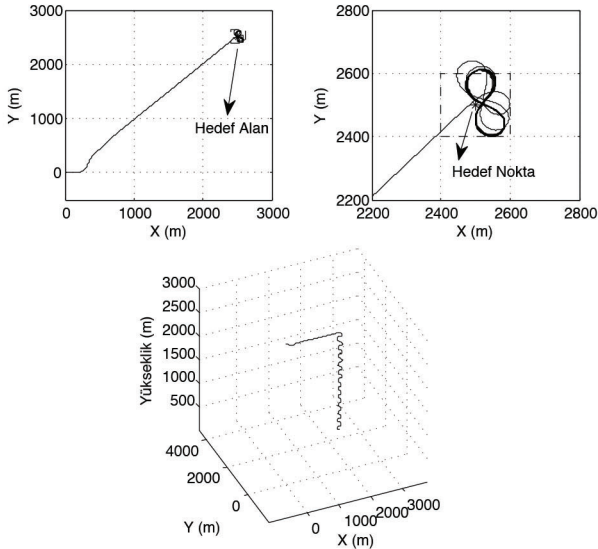
4. Simülasyon Sonuçları

Bu kısımda, geliştirilen algoritmanın rüzgarlı ve rüzgarsız durumlarda aynı hedef nokta yada noktalar dizisini nasıl takip ettiği karşılaştırılmıştır. Simülasyon başlangıç noktası olarak 1500 m irtifa ve 15 m/s ileri hız seçilmiştir. Simülasyonlarda paraşüt-yük sistemi boylamsal düzlemde açık çevrim, yanal düzlemde ise kapalı çevrim (Şekil 5) koşturulmuştur.

İlk simülasyonun sonuçları Şekil 9'da sunulmuştur. Paraşüt-yük sistemi (0,0) noktasından serbest bırakılmıştır. Hedef nokta (2500,2500) noktasına yerleştirilmiş, sistemin hedefe

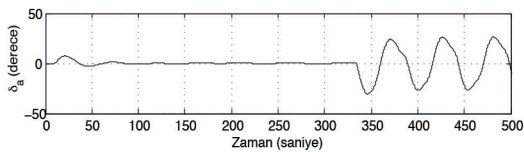
ulaşımca kadar izlediği yol gösterilmiştir. Görüldüğü üzere paraşüt-yük sistemi, hedef noktaya ulaşmakta, hedefe ulaşınca ise Şekil 7 ve 8'e ait olan nokta güncelleme kriterleri sayesinde hedef üzerinde otomatik dolanım yapmaktadır. Bu simülasyona ait asimetrik kontrol girdisi Şekil 10'da gösterilmiştir.

İkinci uygulama olarak, Şekil 9'da sunulan simülasyon senaryosu güneyden 5 knot rüzgar uygulanarak Şekil 11'de tekrarlanmıştır. Şekil 11'de paraşüt-yük sisteminin hedefe ulaşmak için izlediği yol gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sistem rüzgardan ötürü kuzeye doğru kaymış, asıl izlemesi gereken direkt yolu izleyememiştir. Ancak sistem X=2800 m civarında hedef noktayı kaçırdığını anlamış, nokta güncelleme kriterlerini kullanarak hedef noktaya dönmüştür. Hedef nokta üzerinde dolanıp yakın bir lokasyona düşürülmüştür. Şekil 12'de asimetrik kontrol girdisi gösterilmiştir.

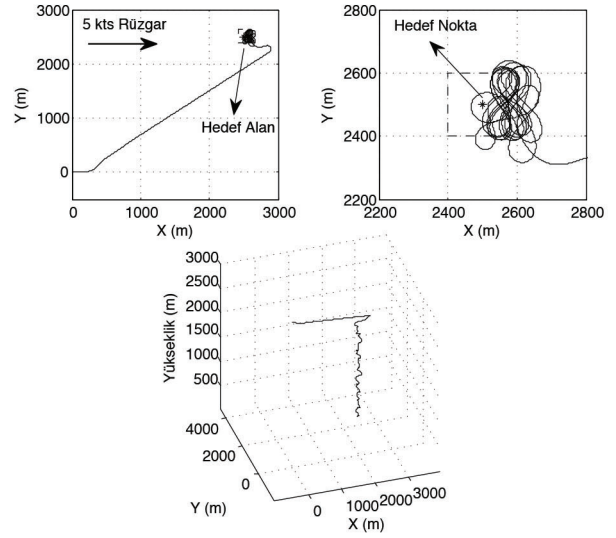


Şekil 9: Rüzgarsız Durumda Tek Hedef Nokta Simülasyonu

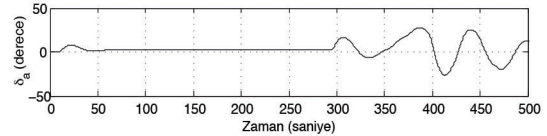
Üçüncü simülasyonda, tek hedef yerine, sistemin çoklu hedef nokta referanslarına nasıl cevap vereceği incelenmiştir. Şekil 13'te gösterilen 4 hedef nokta, (2500,2500) noktasına ulaşabilmek amacı ile kullanılmıştır. Sistem ilk iki noktayı başarı ile geçmiş, üçüncü noktada ise hedefin kaçırıldığını algılayıp dönüş manevrası yapmıştır. Sonrasında ise (2500,2500) noktasına direkt ulaşmıştır. Şekil 14'te bu simülasyona ait asimetrik kontrol girdisi gösterilmiştir. 200 ve 250'inci saniyeler arasında dönüş manevrası için otomatik uygulanan asimetrik kontrol girdisi görülebilir.



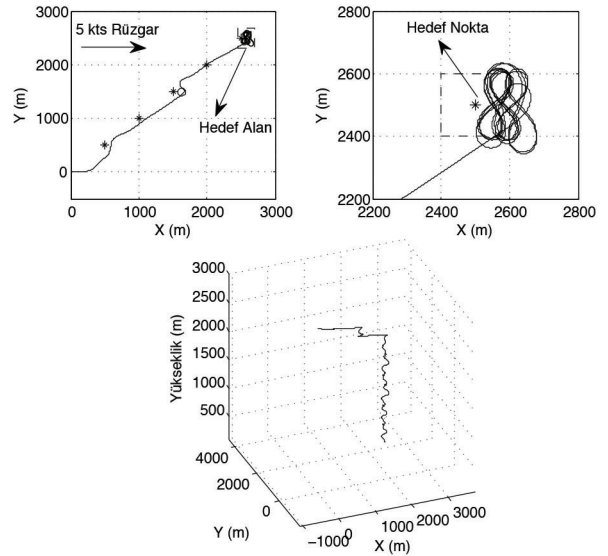
Şekil 10: Rüzgarsız Durumda Tek Hedef Nokta Simülasyonu, Asimetrik Kontrol Girdisi



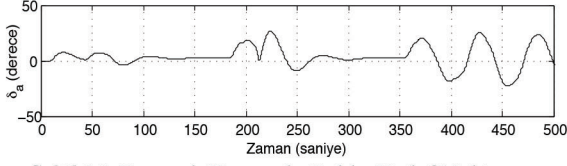
Şekil 11: Rüzgarlı Durumda Tek Hedef Nokta Simülasyonu



Şekil 12: Rüzgarlı Durumda Tek Hedef Nokta Simülasyonu, Asimetrik Kontrol Girdisi



Şekil 13: Rüzgarlı Durumda Çoklu Hedef Nokta Simülasyonu



Şekil 14: Rüzgarlı Durumda Çoklu Hedef Nokta Simülasyonu, Asimetrik Kontrol Girdisi

5. Sonuç

Bu makalede paraşüt-yük sistemleri için geliştirilen model, yol-nokta takip algoritması ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Geliştirilen algoritma baş açısı kontrolü kullanarak sistemi hedef noktalara götürmekte, baş açısı kontrolcüsünün yetersiz kaldığı rüzgarlı durumlarda ise nokta güncelleme kriterlerini kullanarak hedef noktalardan geçmeyi sağlamaktadır. Ayrıca hedef noktaya ulaşıldığında, nokta güncelleme kriterleri kullanılarak, hedef üzerinde otomatik dolanım hareketleri sağlanmaktadır.

Kontrolcü tasarımı için doğrusal kontrolcü algoritmaları kullanılmış, kontrolcü parametreleri düzenlenmiştir. Kontrolcü parametrelerinin hassas ayarını yapmak mümkündür, ancak sunulan algoritmalar, hedef noktaların şaşması durumunda otomatik olarak yeni yol-noktaları belirleyerek sistemi yine hedef noktaya ulaştırabilmektedir.

6. Teşekkür

Gökhan Koyuncu'ya paraşüt modelinin doğrulanması aşamasında verdiği fikirlerden ve tecrübe paylaşımından ötürü teşekkür ederiz.

7. Kaynaklar

- [1] Jann T., "Advanced Features for Autonomous Parafoil Guidance, Navigation and Control", 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2005.
- [2] Rademacher B. J. et al., "Trajectory Design, Guidance and Control for Autonomous Parafoils", AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 18-21 August 2008.
- [3] Kaminer I.I., Yakimenko O. A., "On the Development of GNC Algorithm for a High-Glide Payload Delivery System", Proceedings of 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, Vol. 5, December 2003.
- [4] Calise A. J. et al., "Modeling for Guidance and Control Design of Autonomous Guided Parafoils", 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Williamsburg, VA, 21-24 May 2007.
- [5] Toglia, C., Vendittelli, M., "Modeling and Motion Analysis of Autonomous Paragliders", Technical Report n.5 2010, University of Rome.
- [6] Prakash, O., Ananthkrishnan, N., "Modeling and Simulation of 9-DOF Parafoil-Payload System Flight Dynamics", August 2006, In Proceedings of the Atmospheric and Flight Mechanics Conference and Exhibit, AIAA 2006-6130, Keystone, Colorado.

- [7] Slegers, N., Costello, M., "Aspects of Control for a Parafoil and Payload System" *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 26, No. 6, 2003.
- [8] Müller, S., Wagner, O., Sachs, G., "A High Fidelity Nonlinear Multibody Simulation Model For Parafoil Systems", Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, May 2003, Monterey, California.